

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE
HUAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y
CIVIL

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

ÁREA DE INVESTIGACIÓN: TOPOGRAFÍA Y VÍAS DE
TRANSPORTE



INFORME FINAL:

**"Complejidad Estructural en la
Métrica de Ciudades para el
Análisis del Equilibrio Territorial
de Regiones"**

RESPONSABLE:

Cristian Castro Pérez

AYACUCHO - PERÚ

2015

Resumen

El objeto de esta investigación es aportar 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 impedancias en las ciudades.

PALABRAS CLAVES:

Ingeniería de tráfico, transporte urbano, optimización de redes, modelo basado en actividades, transporte y uso de suelo.

Summary

The purpose of this research is to contribute in the development and programming of an integrated transport model and territory, which considers the characteristics of the network and incorporate the dynamics of travel based activities to improve the prospects of a discrete approach. The aim is to develop models based on a continuous focus according to the general configuration of an average city, considering land use, network and impedances. the impact of the territory, discretization, configuration, attractors points, areas of travel, travel volume is studied, by conducting computational experiments, which demonstrate that all techniques studied are affected to a greater or lesser extent by the characteristics of traffic before different urban changes, creating a dependence on development of cities to the operating capacity of the tracks. quantifies the extent in which the arrangement of the attractors points in the domain of a city creates dynamic areas of travel depends on factors like the outline of subdomains, discretization, location of activities; and the importance of obtaining travel areas according to the distance impedances affected by stresses in the cities.

KEY WORDS:

Traffic engineering, urban transportation, network optimization, activity based model, Land-Use Transport .

Índice

Portada	I
Agradecimientos	I
Índice General	II
Índice de Figuras	IV
INTRODUCCIÓN	1
1. INTRODUCCIÓN.	1
1.1. Importancia.	1
1.2. Fundamento científico.	2
CAPÍTULO I: CONSIDERACIONES GENERALES	4
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.	4
2.1. Antecedentes.	4
2.2. Explicación del marco teórico.	5
2.2.1. Consideraciones generales.	6
2.2.2. Representación de las redes.	7
2.2.3. Descripción de una red.	9
2.2.3.1. Técnicas de modelación.	9
2.2.4. Representación de una red vial urbana.	9
2.2.5. Problemas del camino más corto.	10
2.2.6. Métrica del espacio.	11
2.2.7. Modelos geográficos.	11
2.2.8. Datos vs. Información.	12
2.2.9. Datos vectoriales.	13
2.2.10. Actividad urbana.	14
2.2.11. Geometría computacional.	14
2.2.11.1. Problemas estáticos.	15
2.2.12. Modelamiento de superficies.	15
2.2.13. Modelo digital del terreno.	16
2.2.14. Métodos de interpolación de superficies.	17
2.2.15. Geometría de la Ciudad.	18
2.3. Complejidad en la métrica de ciudades.	18
2.3.1. Localización y medición de distancias entre puntos.	18
2.3.2. Estimación de las distancias por carretera.	20
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	22
3. MATERIALES Y MÉTODOS.	22
3.1. Metodología de la investigación.	22
3.1.1. Efecto de la impedancia - fricción.	22
3.1.2. Análisis de mínimo costo-distancia para interpolación espacial.	22
3.1.2.1. Análisis de mínimo costo-distancia.	23
3.1.2.2. Método: Inverso distancia ponderada (IDW).	23
3.1.3. Modelo para simular el flujo peatonal bidireccional.	24
3.1.4. Superficies de costo anisotrópicas.	25
3.1.5. Descripción de los problemas de rutas.	26
3.1.6. Cálculo de rutas óptimas.	26
3.1.6.1. Fricción, accesibilidad y distancia.	27
3.2. Métrica del espacio.	29
3.2.1. Distancia Manhattan (Métrica City block).	29
3.2.1.1. Algoritmo de cálculo.	30
3.3. Desarrollo de la investigación.	30
3.3.1. Enfoque de modelado continuo del sistema de transporte en una ciudad urbana.	30
3.3.2. Modelo continuo para análisis de redes.	31
3.4. Determinación de atributos.	32

3.4.1.	Caracterización de las instancias.	32
3.4.1.1.	Territorio.	32
3.4.1.2.	Localización.	33
3.4.1.3.	Simetría.	33
3.4.1.4.	Tamaño de la matriz.	34
3.4.2.	Estudio detallado de la caracterización de las instancias.	34
3.4.2.1.	Territorio.	34
3.4.2.2.	Localización.	35
3.4.2.3.	Simetría.	36
3.4.2.4.	Número de nodos.	37
3.5.	Matrices asimétricas.	38
3.5.1.	Costo de la asimetría.	38
3.5.2.	Especificación del modelo.	39
3.5.3.	Tratamiento del modelado.	40
3.6.	Modelos de Representación de Terrenos	41
3.7.	Programación en MATLAB	42
CAPÍTULO III: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN		54
4.	RESULTADOS.	54
4.1.	Análisis de investigación.	54
4.1.1.	Especificación del modelo.	54
4.1.1.1.	Alcances.	54
4.1.2.	Tratamiento del modelado.	55
4.1.3.	Representación del modelo.	55
4.2.	Enfoque de la investigación.	56
4.2.1.	Enfoque de modelado continuo del sistema de transporte en una ciudad urbana.	56
4.2.2.	Modelo continuo para análisis de redes.	57
4.2.3.	Geometría de la Ciudad.	58
4.2.4.	Geometría computacional combinatoria.	58
4.2.4.1.	Problemas estáticos.	58
4.2.4.2.	Envolvente convexa.	59
4.2.4.3.	Diagramas de Voronoi.	59
4.2.4.4.	Triangulaciones.	60
4.2.4.5.	Relación diagrama de Voronoi y triangulación de Delaunay.	60
4.2.5.	Problema de rutas mínimas.	61
4.2.6.	Modelo digital del terreno.	61
4.2.6.1.	Modelo de almacenamiento.	65
4.2.7.	Topología.	66
4.2.8.	TIN.	67
4.2.9.	Métodos de interpolación de superficies.	68
4.2.10.	Resultados del cálculo de rutas óptimas.	69
4.2.10.1.	Fricción, accesibilidad y distancia.	70
4.3.	Métrica del espacio.	72
4.3.1.	Distancia Manhattan (Métrica City block).	72
4.3.1.1.	Algoritmo de cálculo.	73
4.4.	Evaluación de resultados.	73
4.4.1.	Programación matemática del algoritmo "MiM" - MOBILIS para la creación de zonas de viaje en ciudades.	74
4.4.2.	Prueba de hipótesis.	93
CAPÍTULO IV: RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN		98
5.	DISCUSIÓN.	98
5.1.	Validez y confiabilidad de los resultados.	98
5.1.1.	Sobre la implementación computacional.	98
5.1.2.	Fuentes y tipos de errores.	98
5.1.3.	Debilidades de los modelos de predicción de desplazamiento urbano.	100
5.2.	Contrastación de hipótesis	101
5.2.1.	Consideraciones.	101
5.2.2.	Modelo "Mobilis"	101
5.2.3.	Calibración.	102
5.2.4.	Análisis espacial de datos.	105
5.2.5.	Efectos de borde.	105
5.3.	Conclusiones.	109
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		112
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		112

Lista de Figuras

2.1. Representación de un nodo.	10
2.2. Representación de una subred.	10
2.3. Dimensión de los datos geográficos [Olaya,2011].	13
2.4. Representación de una superficie tipo terreno	16
2.5. Proyección WGS84.	19
2.6. Distancia ortodrómica.	20
3.1. Capas de información en un GIS.	23
3.2. Modelo morfológico de un territorio.	24
3.3. Representación continua de variable conocida en localizaciones discretas.	24
3.4. Cálculo del camino mínimo sin superficies de costo (izquierda) y con superficies de costo (derecha).	25
3.5. Pendiente - energía del desplazamiento	27
3.6. Esfuerzo en el desplazamiento con relación a la pendiente	27
3.7. Función $f(\alpha) = \cos^k \alpha$	28
3.8. Función $f(\alpha) = 1/\cos^k \alpha$	28
3.9. Fricción Isotrópica	29
3.10. Fricción Anisotrópica	29
3.11. Comparativo: distancia Manhattan(azul) vs. distancia Euclidiana(verde).	30
3.12. Localizaciones en distribución aleatoria.	35
3.13. Localizaciones en distribución aleatoria.	36
3.14. Localizaciones en distribución de rejilla.	36
3.15. Localizaciones en distribución radial.	37
3.16. Superficie equivalente de las matrices asimétricas.	39
3.17. Dominio de la Ciudad de Ayacucho y Red Vial de Transporte Público.	40
3.18. Mapa del dominio de Ayacucho al año 2014 con 23 subzonas de división con el algoritmo "MiM" - MOBILIS.	48
3.19. Modelación de ciudad con CBD: Ciudad de Ayacucho 2014.	49
3.20. Diseño de experimento de generación de zonas de viaje con EF obtenidos con teselación de tipo Delaunay.	50
3.21. Zona de viaje considerando modelo isotrópico (sin impedancia) para dominio y subdominios de la Ciudad de Ayacucho con 46 atractores de viaje.	51
3.22. Zona de viaje considerando modelo anisotrópico (con impedancia) para dominio y subdominios de la Ciudad de Ayacucho con 46 atractores de viaje.	52
3.23. Discretización de superficie con FEM, para la ciudad de Ayacucho de 1963, 1971, 1982, 1992, 1996 superpuestos al dominio del año 2014 con 46 atractores de viaje.	53
4.1. Ejemplo de una región de estudio.	56
4.2. Composición urbana para el análisis.	57
4.3. Cálculo de la envolvente convexa de un conjunto aleatorio de puntos.	59
4.4. Triangulación de Delaunay del dominio de una ciudad.	60
4.5. Triangulación de Delaunay a partir del diagrama de Voronoi.	61
4.6. Ajuste especial del problema de los caminos más cortos.	62
4.7. Capa de vías de comunicación sin topología (a) o con ella (b).	66
4.8. Discretización del Programa VERNE en dominio y sub dominios con FEM.	68
4.9. Fricción Isotrópica	71
4.10. Fricción Anisotrópica	71
4.11. Comparativo: distancia Manhattan(azul) vs. distancia Euclidiana(verde).	73
4.12. Mapa del dominio de Ayacucho al año 2014 con 23 subzonas de división con el algoritmo "MiM" - MOBILIS.	77
4.13. Caso de estudio: Resultados Ciudad de Ayacucho 1944.	78
4.14. Resultados con MOBILIS: Ciudad de Ayacucho 1944.	79
4.15. Caso de estudio: Resultados Ciudad de Ayacucho 1963.	80
4.16. Resultados con MOBILIS: Ciudad de Ayacucho 1963.	81
4.17. Caso de estudio: Resultados Ciudad de Ayacucho 1971.	82
4.18. Resultados con MOBILIS: Ciudad de Ayacucho 1971.	83
4.19. Caso de estudio: Resultados Ciudad de Ayacucho 1982.	84
4.20. Resultados con MOBILIS: Ciudad de Ayacucho 1982.	85
4.21. Caso de estudio: Resultados Ciudad de Ayacucho 1992.	86
4.22. Resultados con MOBILIS: Ciudad de Ayacucho 1992.	87
4.23. Caso de estudio: Resultados Ciudad de Ayacucho 1996.	88
4.24. Resultados con MOBILIS: Ciudad de Ayacucho 1996.	89

4.25. Caso de estudio: Resultados Ciudad de Ayacucho 2014.	90
4.26. Resultados con MOBILIS: Ciudad de Ayacucho 2014.	91
4.27. Resultados simplificados tipo CBD con MOBILIS: Ciudad de Ayacucho 2014.	92
4.28. Validación de la hipótesis de creación de zonas de viaje con superficies de fricción, considerando atractores de viaje basados en actividades del Programa con VERNE - MOBILIS, para el dominio de la ciudad de Ayacucho, según el recorrido "Ruta 10" para el año 2014	97
5.1. Evolución de dominio de la Ciudad de Ayacucho con VERNE - MOBILIS.	103
5.2. Diseño de experimento para la calibración de MOBILIS, según atractores de viaje, factores de ajuste, costos de la cantidad de nodos, impedancia, generación de zonas de viaje con EF obtenidos con teselación de tipo Delaunay.	104
5.3. Resultados de la discretización de las superficie con elementos finitos del Programa con VERNE - MOBILIS, para el dominio de la ciudad de Ayacucho en los años 1963, 1971, 1982, 1992, 1996 superpuestos al dominio de la ciudad el año 2014 con 46 atractores de viaje.	106
5.4. Resultados de zona de viaje considerando modelo isotrópico (sin impedancia) para dominio y subdominios de la Ciudad de Ayacucho con 46 atractores de viaje.	107
5.5. Resultados de zona de viaje considerando modelo anisotrópico (con impedancia) para dominio y subdominios de la Ciudad de Ayacucho con 46 atractores de viaje.	108

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN.

1.1. Importancia.

Razones por las cuales es importante impulsar los modelos de simulación de transportes en ciudades es que busquen el mejor desempeño de las vías, usen la tecnología disponible, aseguren la inversión y permitan conservarlas en condiciones favorables. Asimismo, la optimización de las vialidades, permite lograr que el tráfico vehicular fluya de una mejor manera, evitando la congestión vehicular y reduciendo los tiempos de traslado. El estudio es para proponer metodologías de modelación de TAP que se aparten de los conceptos tradicionales, pues usualmente los ingenieros de transportes se han concentrado en mejorar los sistemas de tráfico a través de la construcción de nuevas infraestructuras; no obstante, ahora la tendencia es evaluar los sistemas actuales para mejorarlos en términos de eficiencia, seguridad, rapidez, comodidad y sostenibilidad.

Existe un consenso cada vez más amplio respecto a la insuficiencia del concepto tradicional de ciudad para dar cuenta de las complejas dinámicas que caracterizan lo que se ha venido en llamar fenómeno urbano. Esta constatación se reflejan en las cada vez más abundantes reflexiones desde la perspectiva del nuevo paradigma de la sostenibilidad en torno a las invariantes territoriales donde se yuxtaponen las infraestructuras y usos heterogéneos.

Un mejor conocimiento de los patrones que rigen la evolución de las áreas metropolitanas podría resultar útil; sobre todo, si tenemos en cuenta que para 2050 se espera que dos tercios de la humanidad vivan en entornos urbanos. *"Si los urbanistas piensan que una ciudad adquirirá cierta forma pero después resulta que no tiende a comportarse así, estaremos desperdiciando recursos"* [Barthelemy, 2013]. Ahora los autores trabajan para refinar su modelo. Las versiones futuras probablemente incluyan otros tipos de transporte que, como el transporte público, tiendan a ralentizar el proceso de aparición de nuevos centros de actividad. Es en este contexto donde adquiere una especial relevancia la *planificación del transporte urbano*, la que tiene como objetivo predecir y controlar la evolución del equilibrio entre la oferta y la demanda de servicios de transporte.

El desarrollo de las ciudades hace que surjan altos volúmenes de tránsito que deterioran la calidad del servicio, aumentan el congestionamiento y el número de accidentes. Para enfrentar estos problemas se ha alcanzado un notable desarrollo en cuanto a tecnología que permite generar diversas alternativas de solución apoyadas en conocimientos

matemáticos y científicos [Ortuzar, 2000]. El resultado del proceso expansivo ha colocado al medio urbano en una situación difícil en términos de sostenibilidad, en donde la congestión del tráfico constituye una de las externalidades negativas de fuerte impacto, pues provoca importantes pérdidas de tiempo en los desplazamientos privados y el incumplimiento de horarios en el transporte público (en Tokio se calcula que la congestión del tráfico causa pérdidas del orden de los 70 millones de dólares/día) [System, 2001]. Por lo que, se vienen dando una serie de cambios en la concepción del desarrollo del transporte, de carácter tecnológico.

Los resultados de la investigación se materializarán en el desarrollo de herramientas computación numérica, que tendrán el impacto de posibilitar elaborar proyectos que abarquen los sistemas de transporte de la Ciudad de Ayacucho, con la completa consideración del sistema, que dada la complejidad del diseño óptimo de las redes de transporte, permitirá sistematizar y modelar reglas generales que produzcan el procedimiento idóneo para el problema de asignación. Un impacto directo se derivará de la puesta a punto de un programa que aplique las técnicas de simulación numérica, pues se presentará todas las condiciones y fundamentos que pueden ocurrir en la simulación de redes de transporte y el procedimiento descrito puede modificarse fácilmente y extenderse cambiando o introduciendo las nuevas condiciones.

1.2. Fundamento científico.

La investigación contribuirá a generar un modelo para el tráfico urbano en las ciudades de tamaño medio, que han alcanzado su desarrollo actual tras un proceso descentralizador [46]; pues el tráfico es uno de los problemas que más influyen en la calidad de vida, el mismo que se ha acentuado, por una creciente movilidad y por la generalización del modelo de ciudad difusa. Este nuevo y generalizado modelo urbano acentúa la relocalización de la población, comercio y servicios hacia la periferia próxima, en tanto que relega la actividad industrial al espacio exterior de la urbe y en la que el centro tradicional queda reducido a una función simbólica. *"una ciudad tiene de todo y mucho pero disperso, separado funcionalmente"*[43].

1. **Conveniencia:** La investigación sirve para analizar y comprender la complejidad de los emergentes sistemas económicos, sociales y culturales según el *"paradigma tecnológico"* pues la construcción de infraestructuras ha sido la base de la construcción del propio territorio, que transforma y adapta la geografía física y que actualmente está en boga todo lo relacionado a lo urbano [9].
2. **Relevancia social:** La investigación tiene la trascendencia de permiten evaluar los programas de movilidad antes de llevarlos a cabo para predecir su utilidad; de tal forma que se beneficien los habitantes de las ciudades, que según la ONU, hacia 2014 se estima que la mitad de la humanidad se ha desplazado ya hacia núcleos urbanos [24] y dado que se prevé que esa tendencia continúe a lo largo de los próximos decenios, se tendrá la proyección de qué ocurrirá con una ciudad.
3. **Implicancias prácticas:** La investigación permitirá solucionar problemas reales que afectan a la ciudades de tamaño medio, pues la infraestructura vial existente demanda la reorganización del sistema en un territorio con poca infraestructura y espacio de circulación, y una movilidad baja para la población que tiene que

aceptar un transporte público deficiente e integrado parcialmente, con crecientes niveles de congestión.

4. **Valor teórico:** La investigación ofrece la posibilidad de explorar en la búsqueda teórica de alternativas desde la perspectiva tecnológica, pues se contribuirá al conocimiento en territorio de redes de ciudades de baja densidad, por cuanto la mayoría de soluciones consolidadas a lo largo de las dos últimas décadas son sólo para entornos puramente urbanos, en la que las ideas de ciudad compacta, diversidad de usos y espacio público positivo forman el centro de gravedad.
5. **Utilidad metodológica:** La investigación ayudará a crear un nuevo instrumento para procesar y analizar datos para modelar la asignación de viajes basados en actividades, contribuyendo a resaltar aspectos en que ingenieros intervienen y aportando un valor añadido sobre aspectos novedosos de la modelación continua de transporte, buscando crear un diseño sostenible para las redes de ciudades.

Asistimos, a un proceso expansivo en lo urbano y en la movilidad sobre la base de un creciente número de desplazamientos y el incremento de éstos; lo que redundará en la propia expansión de las infraestructuras viarias [52]. Se desea entonces un modelo que permita analizar, desde un punto de vista agregado y prospectivo, los impactos integrales de la configuración del territorio sobre el sistema de movilidad, y este a su vez sobre la configuración del territorio en próximos períodos. El análisis mediante estas metodologías permitiría valorar las externalidades de tal forma que las soluciones más integrales sean competitivas frente a soluciones desde un solo punto de vista.

Se desea entonces un modelo que permita analizar, desde un punto de vista agregado y prospectivo, los impactos integrales de la configuración del territorio sobre el sistema de movilidad y transporte, y este a su vez sobre la configuración del territorio en próximos períodos. El análisis mediante estas metodologías permitiría valorar las externalidades de tal forma que las soluciones más integrales sean competitivas frente a soluciones desde un solo punto de vista.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

2.1. Antecedentes.

En el contexto latinoamericano, las grandes urbes están representadas por el espacio de las avenidas y los grandes ejes, este territorio ocupa una gran extensión en comparación con sus núcleos históricos. En muchas de ellas el germen del crecimiento ha sido la ciudad colonial de los siglos XVI y XVII, sus principales estructuras urbanas no están caracterizadas por la traza ortogonal del núcleo fundacional, sino por el territorio urbanizado posterior a la segunda mitad del siglo XX [24]. Las condiciones del sistema de transporte urbano para la mayoría de ciudades peruanas de baja densidad son muy similares. Los procesos migratorios generaron tasas altas de crecimiento poblacional, crecimiento desordenado, carencia de planificación urbana. Este fenómeno se ha reflejado, en un inadecuado desarrollo del sistema de transporte urbano. El énfasis puesto en infraestructuras como símbolo de progreso, desequilibró los elementos necesarios para producir una estructura de ciudad [15].

Las invariantes territoriales como la "red", asociada a una visión de la ciudad como un sistema estable de actividades, ha sido una constante en el planeamiento y dimensionado de las redes de infraestructuras, considerando a las actividades como la variable que predeterminaba la forma y nivel de servicio que debería alcanzar la red para mantener la eficacia del sistema. Con esta visión de demanda, han sido multitud las investigaciones sobre los métodos de planificación del transporte, hasta tal punto que han dado paso a una rama propia de la ingeniería civil, denominada ingeniería de transporte [25]. Es sabido que las necesidades de movilización de una población en términos de espacio y tiempo se encuentran indudablemente determinadas por variables asociadas a la demanda del transporte, las cuales se han obtenido a partir de las relaciones existentes entre aspectos socioeconómicos y actividades urbanas [25].

Se ha constatado que los avances conseguidos en la formulación de alternativas de sostenibilidad en las ciudades medias está vinculado al tratamiento de las *invariantes territoriales* en los cuales el término ciudad sigue siendo plenamente aplicable. En efecto, por muy vagas que sigan siendo en términos generales las alternativas para el ámbito de la "*ciudad difusa*", no cabe duda de que los avances decididos hacia la sostenibilidad en el interior y el entorno de la ciudad consolidada se traducirán ineludiblemente en la creación de vectores positivos [24].

Actualmente, existen diversas metodologías, modelos y software especializado en el es-

tudio de los diferentes sistemas de transporte que posee una ciudad, que normalmente se han formulado a partir de experiencias de los países más desarrollados, habiendo pocas experiencias que se centren en países del tercer mundo o países en vía de desarrollo. Estas metodologías, desarrolladas a partir del enfoque de cuantificación de la demanda que introdujeron los primeros estudios de tráfico urbano (Mitchell,1954, Voorhees,1955) han ido sufriendo una evolución conceptual e instrumental importante, caracterizada más por una fascinación por las formulaciones matemáticas que permitían una mayor correlación con la realidad observada, que por la constatación posterior de la eficacia de sus propuestas.[19].

2.2. Explicación del marco teórico.

La complejidad estructural de ciudades desde el punto de vista de la integración del transporte y territorio es de difícil obtención, ya que la dinámica de las ciudades, yuxtapuesto a usos de suelo, condiciones de operación, morfología del territorio, y otros factores del entorno en ciudades de tamaño medio, está fuertemente condicionadas por la evolución histórica y las invariantes territoriales; por lo que sus parámetros pueden cambiar. En la actualidad, América Latina está viviendo un fenómeno de revalorización de la ciudad construida: la histórica y la urbana, del cual el sistema de transporte es un componente importante; por lo que un modelo que tenga un carácter integrador del territorio, que considere las características propias de la red e incorpore las dinámicas de viajes basadas en actividades, hace que puedan superarse las expectativas de un enfoque discreto; con lo que, se contribuirá a superar el problema en el que no se conocen completamente los parámetros del modelo (incertidumbre paramétrica) y la diferencia de estructura real de la ciudad con respecto a la estructura del modelo matemático (incertidumbre estructural).

Resultados recientes muestran que el sistema de transporte urbano, es uno de los patrimonios más valiosos de una ciudad, pues actúa transformando el espacio y las actividades urbanas. Actualmente, muchas intervenciones en materia de transportes no se toman basadas en modelos, sino en propuestas empíricas basadas en la construcción de infraestructura o ampliación de vías, sin ser una solución adecuada, que complica el panorama del uso y distribución del suelo, donde se compite por un bien escaso y caro, como es el espacio público. De esta forma, existe un consenso respecto a la insuficiencia del concepto tradicional de ciudad para dar cuenta de las complejas dinámicas que caracterizan el fenómeno urbano. Este punto de vista es utilizado como una forma de enfrentar la optimización de las redes urbanas de transporte considerando un enfoque continuo en la presente tesis, donde es fundamental conocer qué caminos se elegirán ante modificaciones en la topología o el propio funcionamiento de la red.

En el campo de la ingeniería del transporte, en problemas reales se nos presentan varias dificultades como el gran número de variables a manejar y las malas propiedades de los modelos, como la no diferenciabilidad y la no convexidad. Por esta razón, un problema interesante surge cuando alguna parte o toda la dinámica del sistema no es conocida. Por esto, una modelación continua que enfrentan esta falta de información es un tema importante. Esto conduce a entender que un sistema que no ha sido hecho a la medida y este sistema siempre tiene incertidumbre estructural o paramétrica. Por esta razón, una manera natural de desarrollar modelos con menos incertidumbre

es combinar la asignación en equilibrio con algoritmos de resolución que permitan estimar ciertas predicciones (*output*) en función de la parametrización (*input*) del modelo [52], que recogiesen el mayor número de aspectos relevantes.

"Si se sabe dónde trabaja la gente, pueden reconocerse los centros de actividad", explica Berthelemy [4], pues a medida que aumentan los habitantes, también lo hace la cantidad de centros; sin embargo, ese aumento no es lineal (si la población se multiplica por 10, el número de centros aumenta en un factor 5). Levinson señala que un mejor conocimiento de los patrones que rigen la evolución de las áreas metropolitanas podría resultar útil, si tenemos en cuenta que para 2050 se espera que dos tercios de la humanidad vivan en entornos urbanos. *"Si los urbanistas piensan que una ciudad adquirirá cierta forma pero después resulta que no tiende a comportarse así, estaremos desperdiciando recursos"* [4]. Es en este contexto donde adquiere una especial relevancia la *planificación del transporte urbano*, la que tiene como objetivo predecir y controlar la evolución del equilibrio entre la O-D de servicios de transporte.

El desarrollo de las ciudades hace que surjan altos volúmenes de tránsito, aumentan el congestionamiento y el número de accidentes. Para enfrentar estos problemas se ha alcanzado un notable desarrollo en cuanto a tecnología que permite generar diversas alternativas de solución apoyadas en conocimientos matemáticos y científicos [37]. El resultado del proceso expansivo ha colocado al medio urbano en una situación difícil en términos de sostenibilidad, en donde la congestión del tráfico constituye una de las externalidades negativas de fuerte impacto; por lo que, se vienen dando una serie de cambios en la concepción del desarrollo del transporte, de carácter tecnológico.

En este contexto, la finalidad de esta investigación es estudiar la métrica de las ciudades para obtener una distribución de regiones basada en el análisis de equilibrio de las invariantes territoriales, de tal manera que se obtenga las zonas de viaje a través del entendimiento de la existencia de impedancias, considerando la variabilidad temporal y espacial de los atractores de viajes, de tal forma que se obtengan regiones de viaje incluyendo su diseño e implementación computacional.

2.2.1. Consideraciones generales.

A través de la influencia de las superficies de fricción en las invariantes territoriales se aborda un enfoque vinculado al análisis cuantitativo de la red (localización, estructura, flujos en las redes e intensidades y modelos predictivos de demanda) al ser sus métodos, técnicas y operaciones estadísticas y matemáticas.

Uso del suelo.- El uso del suelo puede ser determinado y pronosticado con facilidad y aceptable precisión. Dentro de esta variable se pueden distinguir tres atributos que influyen en la generación de viajes, esos atributos son: tipo, intensidad y ubicación.

Los tipos de usos del suelo tienen diferentes características de generación y por ello es importante distinguirlos. La clasificación de tipos de usos del suelo más habitual suele ser: residencial, comercial, industrial, educacional y esparcimiento. El uso del suelo residencial produce más viajes que los otros usos, mientras que los restantes usos son, en general, mayores atractores de viajes que productores.

La intensidad del uso del suelo expresa el nivel de actividad que caracteriza una determinada zona y usualmente se expresa en términos de cantidad o de densidad tal como número total de viviendas en la zona o empleos por unidad de superficie. La intensidad de uso del suelo tiene una marcada influencia en el número y tipo de viajes que genera una determinada zona. En general, a menor densidad habitacional mayor número de viajes generados por persona. Lo mismo sucede con la distribución por modo en que se realizan los viajes, las zonas de menor densidad de hogares producen mayor cantidad de viajes en automóvil por vivienda.

La ubicación de las actividades se refiere a la distribución espacial de los usos del suelo y de las actividades dentro del área en estudio. Las modalidades de viaje de habitantes de un barrio de alta densidad pero rodeado por zonas de baja densidad y alejado del centro de una urbe son distintas a las que tendría si ese mismo barrio estuviera próximo al centro.

Características socioeconómicas.- Las características socioeconómicas que influyen en la generación de viajes se refieren a los hogares y son las siguientes: ingreso familiar, tamaño del hogar, posesión de automóvil, tipo de vivienda y actividad de los integrantes del hogar.

Sistema de transporte.- El tipo, disponibilidad y calidad de las facilidades de transporte disponibles en el área determina la variable denominada accesibilidad. A mayor accesibilidad mayor cantidad de viajes realizados. La accesibilidad se define de la siguiente manera:

$$ACC_i = \sum (A_j \times F_{ij})$$

Siendo:

ACC_i = accesibilidad de la zona i.

A_j = viajes atraídos por la zona j. Se adoptan las atracciones como ponderación de la importancia relativa de cada zona.

F_{ij} = factor de impedancia entre la zona i y la zona j, a mayor factor mayor accesibilidad.

n = número de zonas.

2.2.2. Representación de las redes.

- Un **grafo** $G(N,A)$ es una entidad compuesta por un conjunto (finito) no ordenado de nodos, N y un conjunto (finito) ordenado de arcos A que unen a pares de nodos. En el conjuntos $G = (N,A)$, sólo queda lo esencial del dibujo, la forma de las aristas no son relevantes, sólo importa a qué vértices están unidas.
- Los **nodos** suelen corresponder a O-D de los viajes y en general corresponde a puntos en el mapa en que pueden ocurrir cambios en las unidades que viajan. Es usualmente llamado **vértice o punto**. Se representa por un círculo. En las redes de transporte, estos deberían ser las localidades o las ciudades en un mapa.
- Los **arcos** son los vínculos que unen a los nodos, pueden representar por ejemplo

2.2.3. Descripción de una red.

Una red incorpora la descripción de tres componentes:

- a La infraestructura: Son las vías, terminales, etc. Esta se simboliza a través de arcos, que representan tramos de vías y de nodos. Los arcos tienen dirección.
- b La regulación de la circulación: Considera la conexidad, leyes de funcionamiento del tránsito definidas sobre los nodos, otros parámetros que se definen sobre la red.
- c Los usuarios: Se especifican a través de una matriz O-D referenciada con centroides, parámetros característicos de la red (s, v, etc.).
 - El objetivo es tratar de construir una red que replique la realidad.
 - Los arcos son representados por: una longitud, una velocidad de recorrido y un flujo.
 - Los centroides solo tienen asociados flujos como $O - D$.

Hay dos enfoques que condicionan las estrategias de representación de la red:

- Reasignación de flujos: Si se considera fija la demanda, no es necesario considerar fija la asignación. Aquí no se tiene flujos por arco pero si matrices $O - D$, conectores, centroides.
- Sin reasignación: Es decir, el supuesto que la asignación es invariante. En este caso ya no necesito la matriz $O - D$, sino los flujos por arco (Se supone que no se van a modificar).

2.2.3.1. Técnicas de modelación.

Está ligada a estilos y métodos computacionales.

1. Arcos: en el arco se dispone de un flujo en el cual puede suceder: un flujo heterogéneo y arcos para corrientes diferentes, de modo que se puede tener un tramo de vía con diferentes arcos (disponer de esta posibilidad es muy interesante en nuestros países donde el flujo es mixto y la composición no es típica).
2. Nodos: Tienen que interactuar con los arcos. Se considera desde el punto de vista de los vehículos que llegan por un tramo de vía de interés.

Los modelos de asignación tienen un enfoque, para el tratamiento de redes, menos flexible que los de modelación.

2.2.4. Representación de una red vial urbana.

Representación de intersecciones

1. Representación del nodo simple:
 - sin diferenciación de dirección
 - sin conflicto de movimiento

Tabla 2.1: Representación de una red

Física	Conceptual
Intersecciones	Nodos
Calles	Enlaces
Zonas	Centroides

2. Representación de una subred:

- Representación explícita de la dirección
- Conflicto en giros y en intersección son capturados por los enlaces internos y sus impedancias

3. Representación conceptual no es única y depende de:

- Tipo de análisis
- Disponibilidad de datos para construir, validar y aplicar modelos
- Precisión en función del tiempo de cálculo del tráfico

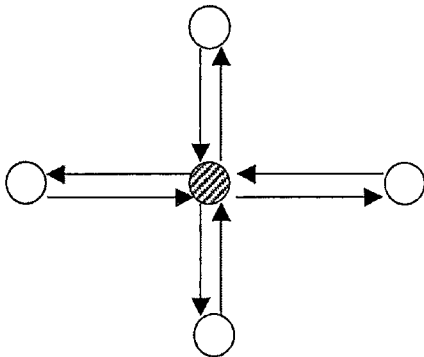


Figura 2.1: Representación de un nodo.

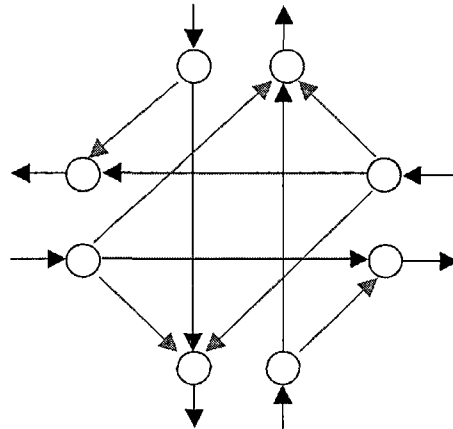


Figura 2.2: Representación de una subred.

2.2.5. Problemas del camino más corto.

Problema básico para encontrar una ruta más corta y la distancia más corta entre dos nodos. Entre los tipos de problemas de ruta más corta, tenemos:

- One-to-one (uno a uno): problema del camino más corto.
- One-to-all (uno a todo): encontrar los caminos más cortos de un nodo a todos los nodos.
- All-to-one (todo a uno): encontrar los caminos más cortos de todos los nodos a un nodo.
- Many-to-many (muchos a muchos): encontrar los caminos más cortos de muchos nodos con muchos otros nodos.

- All-to-all (todos para todos): encontrar los caminos más cortos de todos los pares de nodos.

"Más corta" también denota costo mínimo general. Hay cientos de algoritmos del camino más corto, pero son similares.

2.2.6. Métrica del espacio.

Desde un punto de vista matemático, se han definido diversos tipos de espacio. En primer lugar puede distinguirse entre espacios métricos y no métricos. Los primeros son aquellos en los que puede establecerse una medida de distancia a partir de la que pueden deducirse diversas propiedades métricas (área, perímetro, forma, etc.), pudiendo utilizarse diversas definiciones de distancia:

1. **Distancia Euclídea**, responde al concepto tradicional de distancia como hipotenusa de un triángulo rectángulo. Es la más utilizada para resolver problemas

geoespaciales:
$$d_{i,j} = \sqrt{\sum_{k=1}^N (x_{k,i} - x_{k,j})^2}$$

2. **Distancia de Manhattan**, corresponde, siguiendo con el símil del triángulo rectángulo, a la suma de los catetos. Resulta útil en aplicaciones muy concretas

como por ejemplo en estudios de ciudades:
$$d_{i,j} = \sum_{k=1}^N |x_{k,i} - x_{k,j}|$$

3. Distancia como distancia máxima, corresponde a la longitud del cateto más largo.

$$d_{i,j} = \max_{k=1}^N (x_{k,i} - x_{k,j})$$

El espacio geográfico, es decir el que procede de una aproximación empírica al mundo real, es un espacio euclídeo de 3 dimensiones, aunque su representación suele ser una proyección bidimensional.

2.2.7. Modelos geográficos.

Se trata de conceptualizar el espacio estudiado, la variable tratada y la variación de esta a lo largo del espacio. Existen muchos modelos geográficos distintos, entre los cuales cabe destacar dos de ellos: ²

1. **Campos**.- es un modelo de variación dentro de un marco n-dimensional, en el cual en cada punto dentro de dicho marco se tiene un valor de la variable estudiada. En su concepto matemático, un campo es una función de la forma $\varphi: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, donde una función que asocia cada punto de un espacio vectorial con otro en un espacio vectorial distinto. En el caso más habitual, $m = 1$, y tenemos un *campo escalar* en el que a cada punto del espacio vectorial origen se le asocia un único valor

²H. Couclelis. People manipulate objects (but cultivate fields): beyond the raster vector debate in GIS. In Frank A. U., I. Campari, and U. Formentini, editors, Theories and Methods of Spatio-Temporal Reasoning in Geographic Space, vol. 639, Lecture Notes in Computer Science, pages 65-77. Springer-Verlag, 1992.

escalar. No obstante, también encontramos los denominados *campos vectoriales*, en el cual el espacio vectorial de destino es multidimensional.³

2. **Entidades discretas.**- este modelo no asocia a cada punto geográfico un valor, sino que concibe un entorno como un espacio vacío sobre el que se sitúan distintos elementos. Cada entidad posee características propias, constantes para toda ellas, que son las que conferirían sus propiedades particulares a los puntos. Este modelo no es tan adecuado como los campos para conceptualizar variables continuas, ya que la continuidad de estas es opuesta al esquema discreto planteado; no obstante, otras variables no continuas se modelizan mejor mediante entidades discretas, ya que la forma en que se presentan coincide en cierta medida con dichas entidades como unidades mínimas.

La presencia de vías de comunicación, se puede asimilar perfectamente al modelo de entidades discretas. Se tiene un espacio vacío (sin vías), en el cual se disponen las distintas vialidades en una serie de localizaciones concretas. Hay puntos que no estarán afectados por ninguna entidad, mientras que otros (los situados en las intersecciones) lo están por varias de ellas.

2.2.8. Datos vs. Información.

Entendemos como dato al simple conjunto de valores o elementos que utilizamos para representar algo, y es necesario interpretarlo para que surja ese significado, y es en ese momento cuando podemos emplearlo para algún fin y llevar a cabo operaciones sobre él que tengan sentido y resulten coherentes con el significado propio que contiene. La información es, por tanto, el resultado de un dato y una interpretación, y el trabajo con datos es en muchos casos un proceso enfocado a obtener de estos toda la información posible. Un dato puede esconder más información que la que a primera vista puede apreciarse.

A partir de un MDE podemos calcular parámetros tales como la pendiente, extraer el trazado de la red vial o delimitar las zonas de viaje. El dato en este caso lo constituyen los valores que representan la elevación en los distintos puntos. La información que contienen está formada por todo ese conjunto de elementos que podemos obtener, desde la pendiente a la estructura viaria, pasando por todo aquello que mediante la aplicación de procesos u operaciones de análisis podamos extraer de esos datos. El estudio de la relación entre datos e información y sus características no es en absoluto sencilla. Existe una disciplina, la ciencia de la información dedicada a estudiar los aspectos teóricos relativos a la información y la forma en que esta puede contenerse en los datos⁴.

Un concepto a tener en cuenta en relación con las componentes de la información geográfica es la dimensión. Los elementos que registramos pueden ir desde sencillos puntos (0D) hasta volúmenes tridimensionales (3D). Un caso particular lo encontramos

³El empleo del término vectorial para calificar a los campos vectoriales o los espacios vectoriales no debe confundirse con el modelo de representación vectorial. En el caso de campos y espacio, se trata de la terminología estándar del ámbito matemático, mientras que en el modelo de representación vectorial es una terminología propia de SIG

⁴R. Diener. Information science: What is it. What should it be. Bulletin of ASIS, June/July:17 (21, 1989). Information science: definition and scope. In J. Williams and Carbo T., editors, Information Science: Still an Emerging Discipline. Cathedral Publishing, 1997

cuando estudiamos la forma tridimensional del terreno, pero tratando la elevación como variable temática, no como una parte más de la componente espacial. En este caso, tenemos una serie de valores de elevación (Z) localizados en el plano XY . Esto no es realmente equivalente a utilizar una componente espacial tridimensional, ya que no permite recoger en un mismo punto distintos valores, por lo que se conoce como representación en 2.5 dimensiones (2.5D).

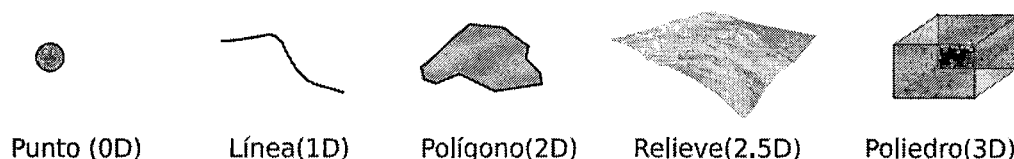


Figura 2.3: Dimensión de los datos geográficos [Olaya,2011].

2.2.9. Datos vectoriales.

Cada objeto está compuesto por una serie de pares coordenados (x,y) . En la estructura vectorial los puntos inicial y final de una línea se llaman **nodos**, cualquier cambio de dirección en una línea es un **vértice**. Las líneas unidas comparten un nodo común. Los polígonos adyacentes están unidos si comparten una línea común. Los objetos vectoriales son creados a partir de las primitivas gráficas generales de coordenadas individuales (x,y) . Los puntos son coordenadas únicas, las líneas son cadenas de coordenadas, los polígonos son una cadena cerrada de coordenadas (a menudo compuesto por varias líneas).

- Puntos.- simples pares (x,y)
- Líneas.- nodos al principio y al final, vértices en los cambios de dirección.
- Polígonos.- conjunto cerrado de líneas.

Entre los aspectos críticos de la representación de datos vectoriales, tenemos:

Topología.- se refiere a la relación entre las características: conectividad de las entidades de línea, direccionalidad de las entidades de línea, adyacencias de los polígonos, contención de las funciones incluidas en polígonos.

Escala.- el número de vértices determina la precisión con la que una entidad lineal se puede representar. Más vértices permite una mayor curvatura de línea a ser representado. Los datos vectoriales se introducen mediante la digitalización de los mapas o a través de entrada de coordenadas. La escala de la fuente de los datos está relacionada con la precisión espacial de la entidad de línea.

Regiones.- Las regiones están compuestas de combinaciones de polígonos vectoriales creados por la intersección de un conjunto de áreas poligonales componentes. Básicamente, una solución para permitir la superposición de polígonos es utilizando el formato de datos de cobertura.

Segmentación.- Medios para manejar de manera más eficiente eventos o ubicaciones a lo largo de un segmento de línea. Esto se puede hacer mediante la creación de una

línea de intersección y el nodo en cada lugar a lo largo de un segmento de línea, pero esto es ineficiente, pues aumenta el almacenamiento de datos.

Red de triángulos irregular (TIN).- Cuasi representación tridimensional usando una aplicación de datos de vectores. TIN consisten en datos de puntos entre los que son entidades de borde que crean colectivamente áreas triangulares de gradiente constante que representa los gradientes del terreno.

2.2.10. Actividad urbana.

La mayoría de las ciudades comenzaron siendo una plaza o un mercado; con el tiempo, sin embargo, acabarían desarrollando varios centros en los de trabajo, comercio, etc. Se tienen modelos matemáticos que describen la manera en que una ciudad y los suburbios de su periferia desarrollan varios centros. Sus hallazgos sugieren que el tamaño de la población y la congestión circulatoria influyen de manera considerable en la creación de nuevos puntos clave, un fenómeno que también afectaría a las ciudades de tamaño medio o incluso a las pequeñas.⁵ *"Existe una tensión entre cuán atractivo resulta el centro y cuánto cuesta llegar hasta él"*[Barthelemy, 2013]. En un principio todo el mundo va allí; pero, a medida que la población aumenta, cada vez resulta más difícil acceder a él. Al final, comienzan a surgir otros subcentros en la periferia, ya que su aparición facilita las actividades laborales y comerciales de los residentes. Las ciudades con un sistema de transporte eficiente permanecerían centralizadas durante más tiempo; pero, una vez que se supera cierto umbral, se convierten inevitablemente en policéntricas.

Otros modelos económicos apuntan a la relación entre el número de habitantes de una ciudad y su número de centros de actividad [David Levinson]; sin embargo, eran "borrosos" y que carecían de verificación empírica, pues no llegaban a ninguna predicción concreta con la que poner a prueba. A fin de verificar predicciones sobre el modo en que aumenta el número de centros urbanos a medida que crece la población, los investigadores emplearon los datos de 9000 ciudades de EE.UU. de diversos tamaños [Barthelemy, 2013], *"Si se sabe dónde trabaja la gente, pueden reconocerse los centros de actividad"*. Los datos mostraron que, a medida que aumenta el número de habitantes, también lo hace la cantidad de centros; sin embargo, ese aumento no es lineal: si la población se multiplica por 10, el número de centros lo hace por un factor de 5 como media; en la presente investigación se verificará dicha observación en ciudades medias.

2.2.11. Geometría computacional.

La Geometría Computacional⁶, es un campo de las matemáticas, que busca el desarrollo de algoritmos eficientes para resolver problemas que se describen en términos de objetos geométricos básicos [<http://nbviewer.ipython.org/>]. Se diferencia entre:

1. **Geometría computacional combinatoria**, que se ocupa de la interacción de

⁵Modeling the Polycentric Transition of Cities, Barthelemy Marc y Rémi Louf, Physical Review Letters, 2013

⁶Fue bautizada en 1975 por Michael Shamos al acuñar este término por primera vez en el título de su tesis doctoral, dirigida por Franco Preparata

los objetos geométricos básicos: puntos, segmentos, líneas, polígonos y poliedros. En este contexto tenemos tres categorías de problemas:

- **Problemas estáticos:** La construcción de un objeto de destino conocido se requiere de un conjunto de objetos geométricos de entrada.
- **Problemas de búsqueda geométrica:** Dado un conjunto de objetos conocidos (espacio de búsqueda) y una propiedad que se busca (la consulta), estos problemas se refieren a la búsqueda de objetos que responden a la consulta.
- **Problemas Dinámicos:** Similar a los problemas de las dos categorías anteriores, con el reto añadido de que la entrada no se conoce de antemano, y los objetos se insertan o eliminan en la búsqueda en la base de datos.

2. **Geometría computacional numérica**, que se ocupa principalmente de la representación de los objetos en el espacio que se describen por medio de curvas, superficies y regiones en el espacio delimitadas por aquellos.

En la presente investigación, se procedió a la elaboración y el análisis de los diferentes algoritmos en esos dos ajustes.

2.2.11.1. Problemas estáticos.

Los problemas fundamentales de esta categoría son los siguientes:

- **Envolverte convexa:** Dado un conjunto de puntos en el espacio, encontrar el poliedro convexo más pequeño que los contienen.
- **Diagramas de Voronoi:** Dado un conjunto de puntos en el espacio (nodos), calculan una partición en regiones consistentes en todos los puntos más próximos a cada nodo.
- **Triangulaciones:** la partición del plano en triángulos, de manera que dos triángulos cualquiera son disjuntos, o de otra manera que comparten un borde o un vértice. Hay diferentes triangulaciones en función de los objetos de entrada, o restricciones sobre las propiedades de los triángulos.
- **Caminos más cortos:** Dado un conjunto de obstáculos en un espacio, y dos puntos, encontrar el camino más corto entre los puntos que no se intersectan con alguno de los obstáculos.

Los problemas de cálculo de cierres convexos, triangulaciones básicas y diagramas de Voronoi están íntimamente ligados. La teoría que explica este tema se explica en detalle en una monografía en Ciencias de la Computación titulado Geometría Computacional. [Franco Preparata y Michael Shamos, Springer-Verlag en 1985].

2.2.12. Modelamiento de superficies.

La Geometría Computacional es una rama de la ciencia de la computación que se define como el estudio de algoritmos y estructuras de datos eficientes para la resolución de problemas geométricos. Miller y Laflame (1958) establecen los primeros principios del uso de los modelos digitales de superficies para el tratamiento de problemas

tecnológicos, científicos y militares en la que se define como *"una representación estadística de la superficie continua del terreno, mediante un número elevado de puntos selectos con coordenadas (x, y, z) conocidas, en un sistema de coordenadas arbitrario"*.⁷

Matemáticamente una superficie puede describirse de forma genérica como una función bivariable continua $F(X,Y)$ que representa una propiedad de la superficie en el punto de coordenadas (x,y). Pero la variación espacial de cualquier propiedad continua o atributo es generalmente demasiado irregular como para que sea modelizada con una función matemática simple. La propiedad es conocida entonces como variable regionalizada. En la práctica, la función se resuelve a intervalos discretos, definiendo un conjunto finito y explícito de elementos (x,y,z) cuyos valores corresponder con las abscisas, ordenadas y la variable regionalizada respectivamente.

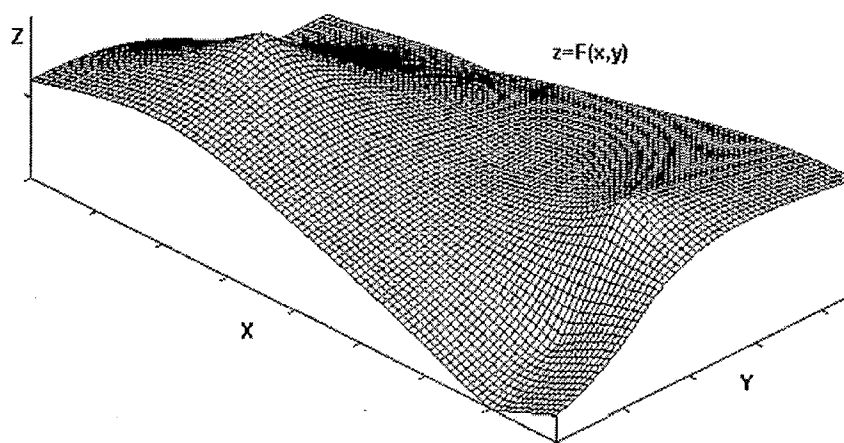


Figura 2.4: Representación de una superficie tipo terreno

Este conjunto tridimensional, con distribución totalmente irregular y procesado mediante determinados algoritmos de cálculo, nos proporcionará una representación discontinua de la variación continua de la superficie y que dará lugar a lo que denominamos un MDT. Aunque, el ejemplo típico es la elevación sobre el nivel del mar, variables como la el número de habitantes, densidad de población, etc., se pueden representar y analizar como una superficie.

2.2.13. Modelo digital del terreno.

Tradicionalmente el relieve y la topografía del terreno se han representado a través del dibujo de las curvas de nivel. No obstante, las operaciones analíticas sobre el relieve que exigían numerosos cálculos eran sumamente laboriosas y difíciles de realizar, quedando muchas aplicaciones prácticas limitadas por la organización analógica y compleja del mapa topográfico. Estas necesidades dieron origen a los MDT, que es *"una estructura numérica de datos de la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua"*⁸.

Los modelos vectoriales están basados en entidades definidas por sus coordenadas (puntos y líneas). En los modelos raster, los datos se interpretan como el valor medio de

⁷Miller, C. L, and Laflamme, R. A., (1958). The Digital Terrain Model Theory and Application.

⁸Felicísimo, A.M. Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales, Pentalfa Ed. 1994. pg.5

unidades elementales de superficie no nula que dividen el terreno con una distribución regular.⁹ Dos serán los métodos de interpolación que utilizaremos en la aproximación de las superficies para la representación gráfica del MDT: "*Polígonos de Voronoi*" y la "*Red de Triángulos Irregulares*". Estos métodos se basan en el "*Diagrama de Voronoi*", o bien, en su estructura dual, la "*Triangulación de Delaunay*".¹⁰

La generación de un MDT tiene como partida un conjunto de puntos de coordenadas tridimensionales (x,y,z) que representan la superficie, donde se tiene un subconjunto finito de estos puntos. Esta discretización implica una pérdida de información por lo que, para poder representar la superficie en el resto de los puntos, se deben estimar los valores de la propiedad investigada en aquellos lugares no muestreados contando con la información de los datos medidos.

Existen varias técnicas para interpolar dicha superficie en cualquier otro punto de la zona en la que no disponemos de su valor mediante un proceso de medición directo. Estas técnicas determinan la estructura de datos del MDT que representará las relaciones espaciales entre los puntos. Se muestra muestra un resumen de las estructuras de datos de mayor interés para la gestión de los MDT:

Vectoriales	Contornos	Secuencial	Las líneas se almacenan como cadenas de cosas
		Analítica	Las líneas se almacenan como segmentos de Bezier, polinomios, etc.
	Perfiles		Cadenas paralelas de cosas en línea con altitud variable
	Triángulos		Red de Triángulos irregulares (TIN)
Raster	Matrices	Regulares	Cotas sobre una malla cuadrada de filas y columnas equidistantes.
		Escalables	Cotas sobre submatrices jerárquicas y de resolución variable
	Polígonos		Cotas asignadas a teselas poligonales (Triángulos o hexágonos)

Tabla 2.2: Estructuras de datos usuales en un Modelo Digital del Terreno.

2.2.14. Métodos de interpolación de superficies.

La representación de una superficie con un MDT suele necesitar una fase de interpolación espacial, que es un procedimiento que permite calcular el valor de una variable en una posición del espacio (punto no muestral, donde se estima un valor de la variable), a partir de los valores conocidos de esa variable en otras posiciones del espacio (puntos muestrales iniciales, con valores conocidos) y que definirá la estructura de representación del MDT.

Desde el punto de vista de la superficie los métodos utilizados para su interpolación se pueden clasificar en: los que asumen que una *superficie es discreta* y los que asumen

⁹Sarriá, Francisco A. Universidad de Murcia. Sistemas de Información Geográfica. <http://www.um.es/geograf/sigmur/>

¹⁰Berg, M. et al. Computational Geometry: Algorithms and Applications. Springer-Verlag, 2000 y Okabe Atsuyuki et al. Spatial Tessellation. Concept and Applications of Voronoi Diagrams.

una *superficie continua*. Utilizaremos métodos basados en la presunción lógica de que cuanto más cercanos estén dos puntos sobre la superficie más se parecerán, y por tanto, los valores de cualquier variable cuantitativa que midamos en ellos serán parecidos.¹¹

2.2.15. Geometría de la Ciudad.

Un modelo teórico para explicar la manera en que evolucionan los parámetros globales que definen una ciudad (PIB, consumo de recursos para levantar infraestructuras, etc) a medida que aumenta su número de habitantes, se puede obtener a partir de una serie de analogías sencillas tomadas de la mecánica estadística y de la física de circuitos eléctricos. Bettencourt¹² ha derivado un modelo que reproduce con una fidelidad más que notable los datos empíricos observados en miles de ciudades de todo el mundo, sus conclusiones ponen de relieve la existencia de un factor clave para mejorar la vida urbana: la geometría del espacio.

Durante los últimos años, varios estudios han demostrado que las ciudades de mayor tamaño producen más con menos recursos. Así, una ciudad de 10 millones de habitantes generará entre un 10% y un 15% más PIB per cápita que dos ciudades de 5 millones de personas; sin embargo, la primera requerirá entre un 10% y un 15% menos de infraestructuras por habitante que las segundas. En este sentido, una urbe de gran tamaño resulta más sostenible que una ciudad pequeña. Los datos tomados de miles de ciudades en todo el mundo parecen indicar que dicho comportamiento es universal, independiente de la época y del nivel de desarrollo de un país. Se refleja en el hecho de que, a pesar de la aparente complejidad que revisten las interacciones entre los habitantes de una urbe, los parámetros globales de la ciudad siempre siguen sencillas leyes de potencias.

2.3. Complejidad en la métrica de ciudades.

2.3.1. Localización y medición de distancias entre puntos.

Los mapas y el resto de información contenida en los GIS son de especial utilidad en la resolución, representación y análisis de problemas VRP. Algunas de las utilidades básicas se refieren a la geo-localización de elementos (clientes, vehículos, empresas, lugares de paso o parada) sobre un punto del mapa, y el cálculo de distancias entre diferentes localizaciones.

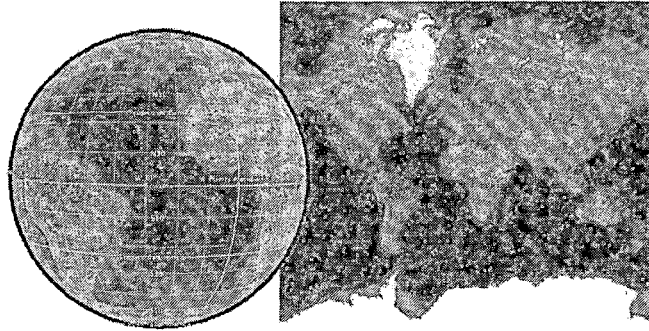
Para la geo-localización de puntos se utiliza el actual sistema de coordenadas mundiales WGS84 (*World Geodetic System* 1984) y que es la base para los actuales sistemas de posicionamiento global como el GPS. Este sistema usa como elipsoide de referencia (datum) el WGS 84. Se trata de una superficie equipotencial o geoide definido por la superficie equipotencial del campo gravitatorio terrestre que coincide con el nivel medio del mar. El geoide es la forma teórica, determinada geodésicamente de nuestro planeta Tierra.

¹¹Cliff, A.D. y J.K. Ord, *Spatial Autocorrelation* (Londres: Pion), 1973.

¹²The Origins of Scaling in Cities, Luís M. A. Bettencourt, Santa Fe Institute, USA

Existen otros sistemas geodésicos como el Universal Transversal de Mercator UTM (*Universal Transverse Mercator*). Este último está basado en la proyección geográfica transversa de Gerardus Mercator (1659), está construido como una proyección de Mercator normal, pero tangente a un meridiano en lugar de tangente al Ecuador. En la actualidad *Google Earth*, *MS Virtual Earth* y otros GIS actuales utilizan una proyección cilíndrica simple con un datum WGS84 para su base de mapas e imágenes, tal y como se muestra en la Figura 4.2

Figura 2.5: Proyección WGS84.



Fuente: Google Earth

De este modo, y tras los cálculos matemáticos necesarios (según el datum y la proyección de que se trate), se puede trasladar un punto de la superficie terrestre a su correspondiente punto sobre el plano (o viceversa) y que vendrá definido por dos coordenadas principales: la latitud y la longitud terrestre.

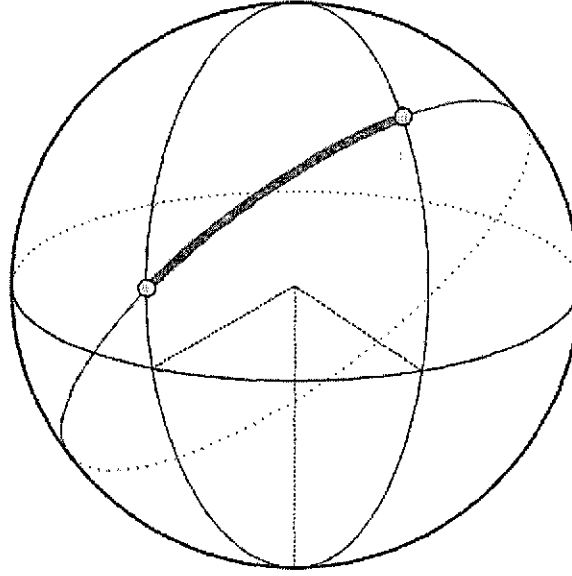
Los GIS actuales disponen de enormes bases de datos con todo un conjunto de lugares previamente geo-localizados o geo-codificados. De este modo, el usuario puede preguntar al sistema dónde (coordenadas latitud y longitud) se encuentra una determinada dirección o población. A esta función de búsqueda en la base de datos de una dirección y devolución de coordenadas se le conoce con el nombre de *geo-coding*. A partir de la geo-localización y gracias a la geometría euclidiana (Euclides 300 a.C) se puede calcular la distancia entre un par de puntos (distancia euclidiana). La ecuación para el cálculo de la distancia entre dos puntos $P = (p_x, p_y)$ y $Q = (q_x, q_y)$ situados en un plano deducida a partir del Teorema de Pitágoras es:

$$d(P, Q) = \|P - Q\| = \sqrt{(p_x - q_x)^2 + (p_y - q_y)^2} \quad (2.3.1)$$

La distancia ortodrómica es el resultado del camino más corto (ortodroma) entre dos puntos de la superficie terrestre, es el arco del círculo máximo que los une menor de 180 grados. Los círculos máximos que pasan por los polos determinan las líneas de longitud (meridianos). En cambio, en la latitud sólo existe un círculo máximo (el ecuador terrestre). El resto de latitudes están determinadas por círculos menores paralelos al ecuador (paralelos).

Para calcular la distancia ortodrómica entre dos puntos de la Tierra es necesario recurrir a la trigonometría esférica. Sea ϕ_1, λ_1 y ϕ_2, λ_2 las coordenadas en latitud y longitud de los dos puntos respectivamente, y $\Delta\phi, \Delta\lambda$ las diferencias entre ambos. Siendo r el

Figura 2.6: Distancia ortodrómica.



Fuente: Wikipedia

radio de la esfera terrestre (dimensión promedio en WGS84 se estima en 6371.01 km). Se denota como $\Delta\hat{\sigma}$ a la diferencia o distancia angular (en radianes). Entonces la distancia ortodrómica es:

$$d = r\Delta\hat{\sigma} \quad (2.3.2)$$

Donde $\Delta\hat{\sigma}$ se calcula con la fórmula de *Vincenty* (1976) que es un método general válido para calcular distancias con un error menor en elipsoides:

$$\Delta\hat{\sigma} = \arctan \left(\frac{\sqrt{(\cos \phi_2 \sin \Delta\lambda)^2 + (\cos \phi_1 \sin \phi_2 - \sin \phi_1 \cos \phi_2 \cos \Delta\lambda)^2}}{\sin \phi_1 \sin \phi_2 + \cos \phi_1 \cos \phi_2 \cos \Delta\lambda} \right) \quad (2.3.3)$$

Este cálculo, si bien es muy preciso en relación al tamaño del planeta Tierra, no es exacto con la realidad. Según *Mandelbrot* (1997) el mundo real tiene una superficie fractal dinámica, que cambia constantemente debido a la erosión y a la acción del ser humano. Desde ese punto de vista la distancia entre dos puntos situados en un espacio finito puede llegar a ser infinita e imposible de calcular con total precisión, así que es necesario establecer una medida reconocida como la anterior.[42]

2.3.2. Estimación de las distancias por carretera.

En el ámbito de la planificación del transporte, es imprescindible contar con una matriz de distancias c_{ij} entre pares de localizaciones. Esta matriz también podría estar valorada en tiempo, velocidad, y/o costo necesario para comunicar cada par de localizaciones $i - j$. El tiempo, la velocidad y el costo suelen estar calculados en función de la distancia, siendo por tanto imprescindible la obtención de dicha matriz de distancias.

La necesidad de contar con dicha matriz de distancias ha sido patente desde los primeros trabajos sobre problemas de rutas, *Clarke y Wright* (1964). Una posibilidad,

consiste en calcular la distancia euclidiana u ortodrómica entre cada par de localizaciones. Pero desde hace ya muchos años, los investigadores han sido conscientes de que dicha distancia no se corresponde con la distancia real entre dos localizaciones que están comunicados por una red de transporte o carretera. Dicho de otro modo, la distancia real del camino mínimo (más corto) que comunica dos puntos de una red de carreteras será siempre igual o superior a la distancia euclidiana u ortodrómica. Por ese motivo, algunos investigadores propusieron hace años estimar dicha distancia real mediante la ponderación o multiplicación de la distancia ortodrómica por un factor. Tal fue el caso de *Christofides y Eilon* (1969) en su estudio sobre problemas de localización.

Love y Morris (1972) investigaron otros métodos o funciones que permitan estimar la distancia real de una manera más precisa. En su trabajo original proponen 7 funciones para calcular la distancia entre dos puntos. Cada una de las funciones tiene a su vez un conjunto de parámetros k, p, s . Tomando los datos de distancias entre ciudades, hicieron el ajuste de los parámetros de las diferentes funciones de distancia, con el objeto de intentar encontrar aquella función que mejor se adaptara a las características de la red de transporte entre dichas ciudades. Es importante señalar que los autores no encontraron diferencias de rendimiento de las funciones según el tipo de territorio, si bien observaron que según la distancia era mejor una función que otra.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS.

3.1. Metodología de la investigación.

La red de carreteras utilizada para el transporte de bienes, se describe generalmente como un grafo donde los arcos representan los segmentos o secciones de las vías, y los vértices corresponden a las uniones o nodos de la red. En algunos casos los clientes o los depósitos pueden estar situados en dichos nodos, mientras que en otros casos pueden estar localizados en un arco del grafo. Los arcos (y por consiguiente el grafo) pueden ser dirigidos o no dirigidos, dependiendo de si pueden ser circulados en un único sentido o en ambos (por ejemplo, calles de una única dirección o de ambos sentidos de circulación).[42]

Cada arco puede tener asociado un costo que puede representar su longitud en distancia, el tiempo de viaje, o el coste monetario del mismo. Alguno de estos parámetros pueden a su vez depender del tipo de vehículo o del momento en el que se recorra este arco (por ejemplo, las condiciones del tráfico en un momento dado).

3.1.1. Efecto de la impedancia - fricción.

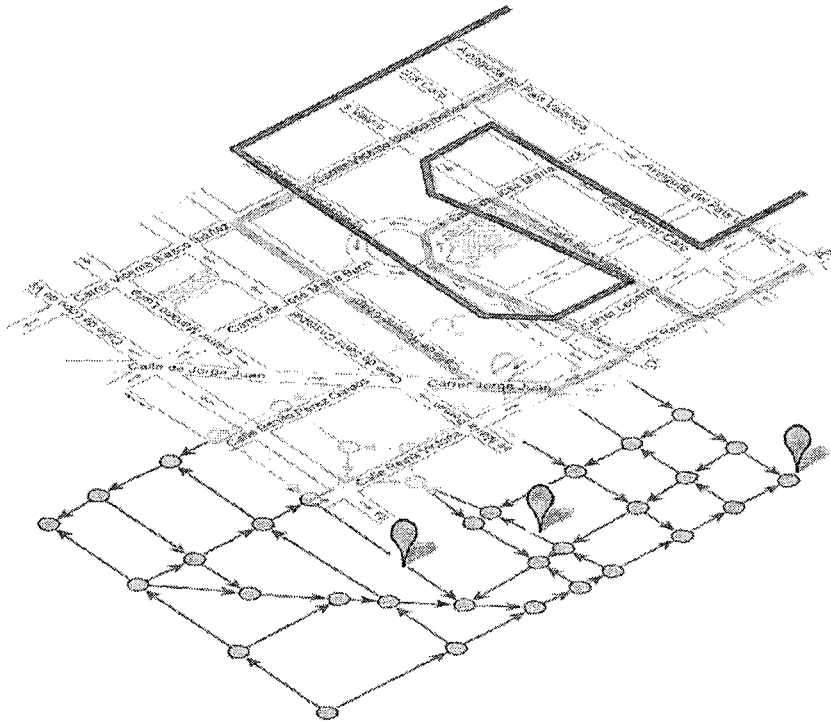
La medida de la distancia euclidiana resulta poco realista, ya que el espacio no es isotrópico. Por el contrario, el efecto de fricción de la distancia (resistencia al desplazamiento por el espacio) varía en función de distintos criterios, como el tipo de relieve. Estas características pueden ser tenidas en cuenta en el cálculo de las capas de información de costos de transporte y en los análisis de proximidad.

Para ello se debe especificar en una nueva capa cual es el costo de transporte (el efecto de fricción) asociado a cada elemento finito. Si existe un área que no puede ser atravesada por constituir una barrera absoluta al movimiento, a los EF celdas correspondientes a esa área se le debe asignar un costo de transporte tan elevado que en la práctica se comporten como si se trataran de barreras absolutas.

3.1.2. Análisis de mínimo costo-distancia para interpolación espacial.

La interpolación espacial es un proceso matemático para predecir el valor de un atributo en una localización precisa a partir de valores del atributo obtenido en localizaciones vecinas situadas al interior de la región. Representación continua de una variable conocida en localizaciones discretas. [35]

Figura 3.1: Capas de información en un GIS.



Fuente: Rodríguez Villalobos, A., 2012

Métodos interpolación:

- Distancias euclidianas
- Otras medidas de distancia (conectividad geográfica compleja)

El método utilizado es el análisis de mínimo costo-distancia con interpolación inverso de la distancia (método distancias no-euclidianas) para obtener rendimientos interpolación más realistas.

3.1.2.1. Análisis de mínimo costo-distancia.

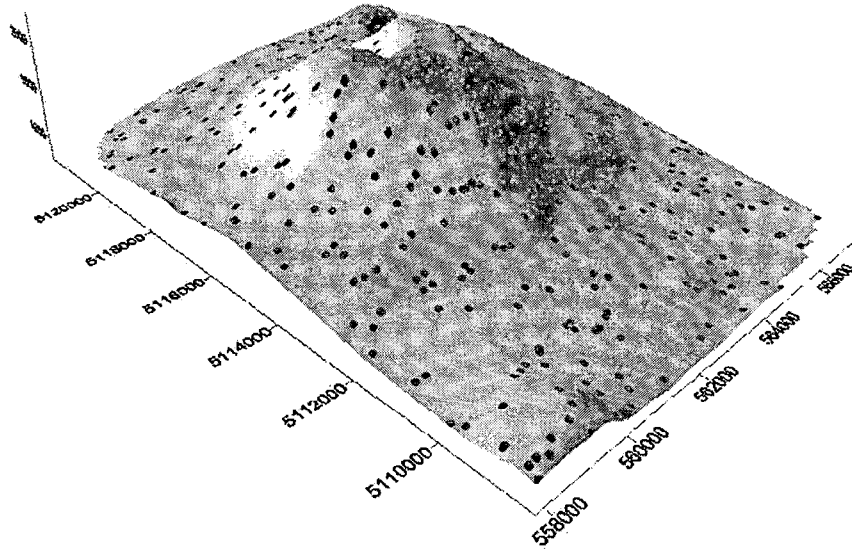
Determina la ruta de menor coste desde un punto de destino i a un origen j .

3.1.2.2. Método: Inverso distancia ponderada (IDW).

Se trata esencialmente de una media ponderada y, por tanto, el resultado se encuentra siempre incluido dentro del rango de variación de los datos. El correcto tratamiento de las formas cóncavas y convexas depende estrechamente de la distribución de los puntos originales y la presencia de datos auxiliares se hace muy conveniente. Para cada ubicación j , d_{ij} es el termino de distancia que se calcula tradicionalmente usando una solución euclidiana, en este caso se usa el método de distancia de menor costo entre una ubicación j y una ubicación i conocida.

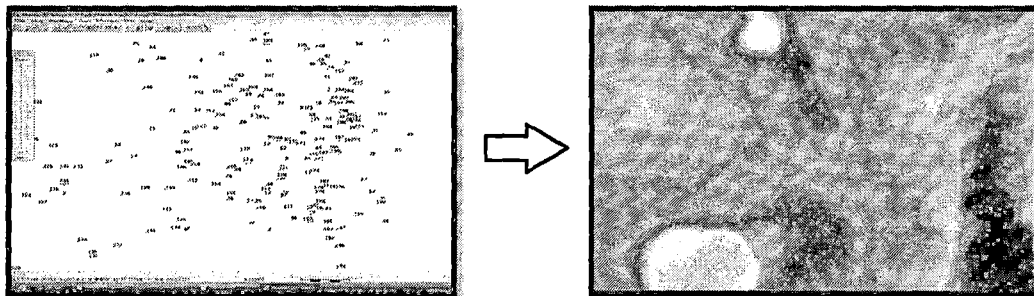
$$Z_{estj} = \sum \frac{z_i}{(d_{ij} + s)^p} / \sum \frac{z_i}{(1 + s)^p} \quad (3.1.1)$$

Figura 3.2: Modelo morfológico de un territorio.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.3: Representación continua de variable conocida en localizaciones discretas.



Fuente: Elaboración propia

Donde:

Z_{estj} : valor de la localización estimada de j .

Z_i : valor de la muestra medida en la localización i .

d_{ij} : distancia entre i y j ; s : factor de suavización; p : poder de ponderación.

3.1.3. Modelo para simular el flujo peatonal bidireccional.

Proceso mediante el cual se cuantifican los viajes realizados por las personas que residen o desarrollan actividad en una determinada área urbana, o por vehículos relacionados con dicha área. En este trabajo los viajes se referirán a movimientos de personas. La generación de viajes es función de:

1. Uso del suelo. Existe una estrecha relación entre la generación de viajes y la manera en que el suelo es utilizado, incluyendo la ubicación e intensidad de uso.
2. Las características socioeconómicas de la población del área.

3. Tipo, disponibilidad y calidad de las facilidades de transporte disponibles en el área.

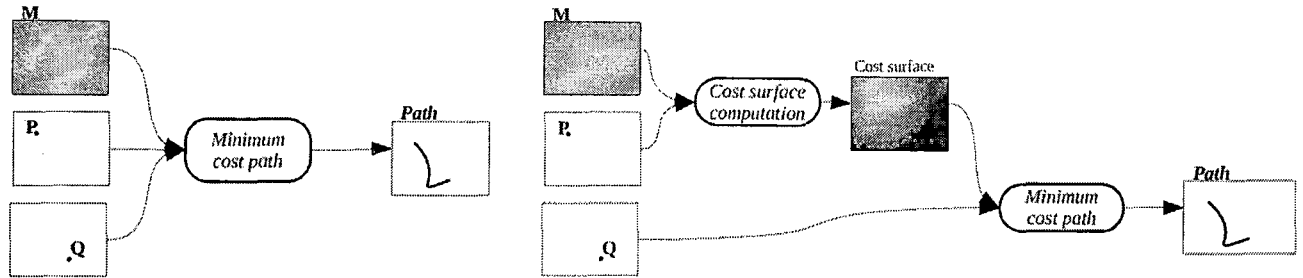
Estas relaciones funcionales se utilizan en el proceso de planeamiento del transporte con el objeto de obtener información cuantitativa sobre la demanda de transporte.

3.1.4. Superficies de costo anisotrópicas.

Es la conjunción de tres palabras con significado propio: "an" (partícula negativa), "iso" (igual o equivalente) y "tropo" (figura) quedando por tanto definida como el "desigual comportamiento en las diferentes direcciones del espacio" [31]. Se basa en la percepción del espacio que no es homogénea en sentido vertical y horizontal. Esta desigualdad entre las diferentes dimensiones del espacio, tal y como son percibidas por los humanos, es lo que se llama anisotropía espacial, donde se distinguen dos tipos de anisotropía: vertical y horizontal. En la visión humana la anisotropía se manifiesta en sentido vertical debido a la acción general que ejerce sobre todos los organismos la fuerza gravitatoria, y en sentido horizontal (izquierda/derecha) a causa de la asimetría cerebral propia de los humanos [17].

La utilización de superficies de costo permite realizar el proceso en dos pasos: primero, calculamos el costo de desplazarse siguiendo el camino mínimo; luego, calculamos el camino mínimo al punto destino usando la superficie de costo como entrada. Las superficies de costo son una alternativa de cálculo para determinar las onas de viaje, considerando el problema de camino mínimo desde cada elemento finito al atractor de viaje. El problema se puede definir de la siguiente forma: "Dado un dominio discretizado se puede incluir una función de fricción (cada subdominio contiene el costo de cruzarla), y dos puntos P y Q sobre una determinada zona tendrán en cuenta el costo de impedancia del desplazamiento de P a Q ."

Figura 3.4: Cálculo del camino mínimo sin superficies de costo (izquierda) y con superficies de costo (derecha).



Las superficies de costo tienen aplicaciones en sí mismas, ya que permiten mostrar información de distribución de costos sobre el territorio, para analizar tiempos de desplazamientos, optimización de emplazamientos, etc. Para calcularlas se suele usar el *algoritmo de Dijkstra*. Para calcular superficies de costo anisotrópicas, se asume una variación continua de la fricción, que se especifica dando la dirección de máxima fricción, y la fricción en esta dirección:

$$F = F_0 \cdot \cos(\alpha - \alpha_0) \quad (3.1.2)$$

También, para calcular superficies de costo anisotrópicas que representan tiempo de desplazamiento andando, se calcula la fricción a partir de la fricción isotrópica y del MDE; se expresa el tiempo de desplazamiento en función de la distancia recorrida, y la diferencia de altura, con tres coeficientes distintos en función del desnivel presente, se utiliza la formula de *Langmuir*:

$$T = a \cdot \Delta S + b \cdot \Delta H_+ + c \cdot \Delta H_- + d \cdot \Delta H_{-+} \quad (3.1.3)$$

3.1.5. Descripción de los problemas de rutas.

Los problemas de rutas de vehículos o de distribución física de mercancías desde almacenes a clientes aparecen en la literatura científica como *Vehicle Routing Problems*, más comúnmente como VRP. También se puede encontrar, aunque en menor medida, referencias como *Vehicle Scheduling Problems*.

En términos generales, un problema de rutas de vehículos consiste en determinar las rutas de un conjunto (o flota) de vehículos que deben iniciar un recorrido (y finalizarlo) en los almacenes (o depósitos) para atender la demanda de servicio de un conjunto disperso de clientes sobre una red. Las diferentes características de los clientes, la demanda, los almacenes y los vehículos, así como de las restricciones operativas sobre las rutas, horarios, etc. dan lugar a gran número de variantes del problema.[42]

3.1.6. Cálculo de rutas óptimas.

En esta propuesta metodológica utilizaremos como variables natural el relieve o pendiente, que es la única indispensable, como demuestran algunos autores en sus trabajos la orografía que indican que es el factor más importante para el cálculo de las rutas óptimas de un territorio basando su análisis prácticamente en esta variable [6] [20]. Para la variable del relieve es necesario la construcción de un MDE. Este se realiza a partir de las curvas de nivel, transformando éstas en una malla donde cada una contendrá la información de la irregularidad del terreno (altura).

Se utiliza TIN como capa vectorial que representa la topografía mediante una serie de caras de triángulos conectadas por una *triangulación de Delaunay* de puntos de observación (cotas) irregularmente distribuidos [?]. De esta manera, la pendiente será un factor esencial a la hora de examinar las posibilidades de desplazamiento sobre un terreno. Existirán 2 criterios de clasificación:

1. **Isotrópico** donde se mantiene un valor continuo independientemente de su dirección, por tanto se considera que el esfuerzo aplicado en el ascenso de una pendiente es de forma constante.
2. **Anisotrópico**, relacionando la energía consumida con el grado de pendiente, donde se considera que el gasto energético varía según el grado de pendiente, por tanto de forma irregular y no constante.

Estos criterios se asientan en estudios psicomotrices, señalándose persistentemente que la pendiente es un factor anisotrópico, porque obviamente invertimos un esfuerzo diferente, y en general mayor, para ascender una cuesta que para descenderla. Debido a

la importancia dada a la pendiente como factor para reconocer la accesibilidad a un territorio o el trayecto más económicos entre dos puntos, ha sido objeto de numerosos estudios interpretativos de la relación de esfuerzo respecto a la pendiente [18] [30]. Se muestra los resultados de varios estudios comparativos donde se relaciona la energía consumida por una persona según el tipo de pendiente que atraviesa.

Figura 3.5: Pendiente - energía del desplazamiento

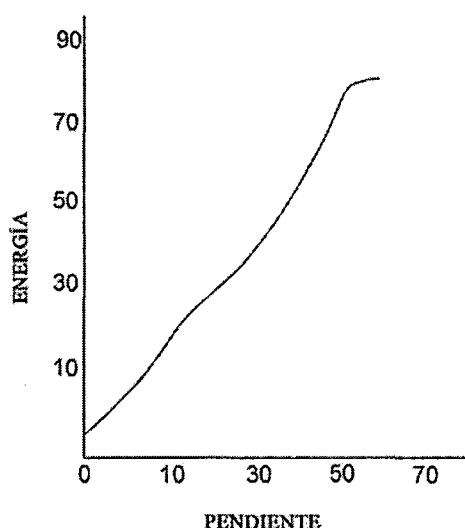
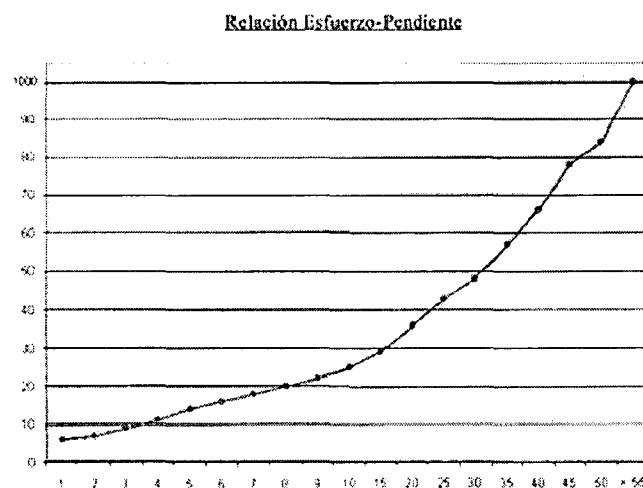


Figura 3.6: Esfuerzo en el desplazamiento con relación a la pendiente



3.1.6.1. Fricción, accesibilidad y distancia.

Una vez obtenidos los mapas de costos para cada uno de los factores utilizados (relieve, usos de suelo) se compone con ellos el mapa general de fricción. Para ello se multiplican las variables, obteniendo un nuevo coeficiente que es el total de fricción del terreno a estudio. De este modo, se obtiene un mapa de rugosidades, en el que se representa la mayor o menor dificultad para el desplazamiento. En este caso, la rugosidad la podemos considerar como un sinónimo de la fricción. Asimismo, si conocemos para una zona dada el valor de esta fricción en cada punto será sencillo hallar cualquier índice derivado de ella, como líneas de isócronas a partir de un punto o distancia en tiempo entre dos determinados puntos.

La mayoría de aplicaciones poseen un comportamiento isotrópico o no direccional. Sin embargo, existen fenómenos como los basados en ecuaciones de difusión, que no puede ser considerados procesos direccionalmente uniformes. En estos casos, no es posible la utilización de las técnicas y herramientas que no consideran el aspecto direccional del problema. Un módulo de cálculo de costo anisotrópico puede ser usado para modelar los efectos de fricciones anisotrópicas asociados al desplazamiento a través de una superficie. En los estudios de costo no solamente influye el costo generado por el movimiento, debemos tener también en cuenta las fuerzas y fricciones que impiden o facilitan dicho desplazamiento. Se puede representar las fuerzas y las fricciones anisotrópicas a través de un vector, para modelar el **costo anisotrópico**, se requieren la magnitud y dirección de fuerzas y fricciones. Por ejemplo:

Supongamos que se quiere calcular el costo consumido al andar a una velocidad normal. Si traducimos el costo a tiempo, la pendiente será un parámetro que influirá de manera directa en su consumo. Y aún más, podemos afirmar que la pendiente afectará de diferente manera dependiendo de la dirección. Ya que si subimos, la fricción producida será mayor que si nos movemos perpendicularmente a la pendiente; y en el caso de descender la pendiente actuará como una fuerza que reduce el costo. Por lo que podemos afirmar que existen fricciones anisotrópicas, es decir, elementos de fricción que producen efectos diferentes en direcciones diferentes. Observamos que hay una conexión directa entre la pendiente y la fuerza de fricción, denominada **fricción efectiva** (stated friction). Esta función cumple lo siguiente: "La fricción efectiva toma el valor 1 en el punto de máxima pendiente". De manera que si nos movemos en la dirección opuesta a la máxima fricción, la fricción podría descender progresivamente hasta alcanzar el valor de 90° .

La variación de la *fricción/fuerza efectiva* en función de la dirección es lo que llamamos **función anisotrópica**. La fricción efectiva depende del coeficiente k definido por el usuario y el ángulo diferencia α (diferencia entre la dirección en la que el fenómeno alcanza su máximo valor de fricción y la dirección real de actuación), se calcula a través de las fórmulas siguientes:

$$d(\alpha) = \text{friccion_efectiva} = \text{friccion_patron}^{f(\alpha)} \quad (3.1.4)$$

Donde $f(\alpha) = \cos^k \alpha$. Un exponente extremadamente alto haría que la fricción fuera cero. Independientemente del exponente usado, la función anisotrópica devuelve valores negativos para los ángulos comprendidos entre 90° y 270° .

$$d(\alpha) = \text{friccion_efectiva} = \text{friccion_patron} * f(\alpha) \quad (3.1.5)$$

Donde $f(\alpha) = 1/\cos^k \alpha$. El propósito de esta función es modificar las fricciones para alcanzar el valor máximo en el ángulo 0° con incrementos progresivos de fricciones, llegando al valor infinito para el ángulo de 90° .

Figura 3.7: Función $f(\alpha) = \cos^k \alpha$

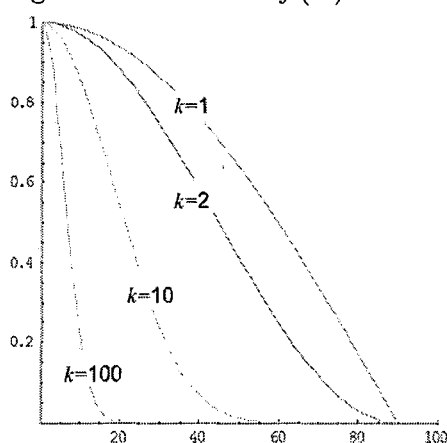


Figura 3.8: Función $f(\alpha) = 1/\cos^k \alpha$

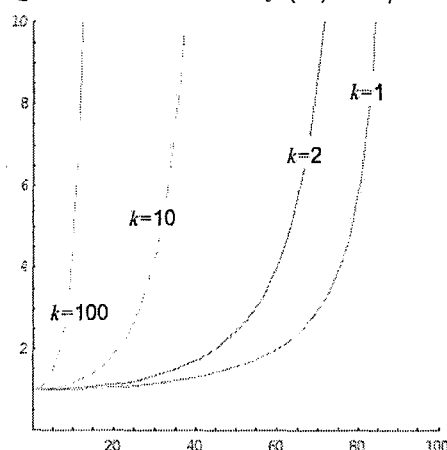


Figura 3.9: Fricción Isotrópica

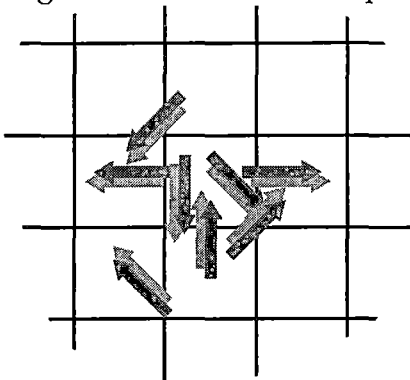
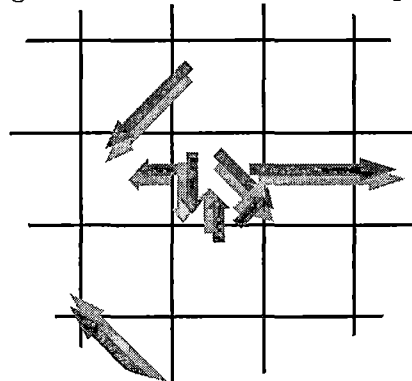


Figura 3.10: Fricción Anisotrópica



3.2. Métrica del espacio.

Desde un punto de vista matemático, se han definido diversos tipos de espacio. En primer lugar puede distinguirse entre espacios métricos y no métricos. Los primeros son aquellos en los que puede establecerse una medida de distancia a partir de la que pueden deducirse diversas propiedades métricas (área, perímetro, forma, etc.), pudiendo utilizarse diversas definiciones de distancia:

1. **Distancia Euclídea**, responde al concepto tradicional de distancia como hipotenusa de un triángulo rectángulo. Es la más utilizada para resolver problemas geoespaciales:

$$d_{i,j} = \sqrt{\sum_{k=1}^N (x_{k,i} - x_{k,j})^2}$$

2. **Distancia de Manhattan**, corresponde, siguiendo con el símil del triángulo rectángulo, a la suma de los catetos. Resulta útil en aplicaciones muy concretas como por ejemplo en estudios de ciudades:

$$d_{i,j} = \sum_{k=1}^N |x_{k,i} - x_{k,j}|$$

3. **Distancia como distancia máxima**, corresponde a la longitud del cateto más largo.

$$d_{i,j} = \max_{k=1}^N (x_{k,i} - x_{k,j})$$

El espacio geográfico, es decir el que procede de una aproximación empírica al mundo real, es un espacio euclídeo de 3 dimensiones, aunque su representación suele ser una proyección bidimensional.

3.2.1. Distancia Manhattan (Métrica City block).

Definida por *Herman Minkowski* en el siglo XIX, esta distancia descrita ampliamente en [10], [5] permite calcular la geometría *Taxicab* siendo una forma en la que la función de distancia usual o métrica de geometría euclidiana se sustituye por un nuevo indicador en el que la distancia entre dos puntos es la suma de las diferencias absolutas de su coordenadas. La métrica también se conoce como distancia de la ciudad de bloques o *distancia Manhattan*.

La distancia d_1 entre dos vectores p, q en un espacio vectorial fijo real de n dimensiones, con sistema de coordenadas cartesianas, es la suma de las longitudes de las proyecciones del segmento de línea entre los puntos en los ejes de coordenadas. Se define [38]:

$$d_1(p, q) = \|p - q\|_1 = \sum_{i=1}^n |p_i - q_i| \quad (3.2.1)$$

Donde los vectores p, q están expresados como:

$$p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$$

$$q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$$

Considerando lo anterior, en un plano 2D, la distancia Manhattan entre (p_1, p_2) y (q_1, q_2) es:

$$D = |p_1 - q_1| + |p_2 - q_2| \quad (3.2.2)$$

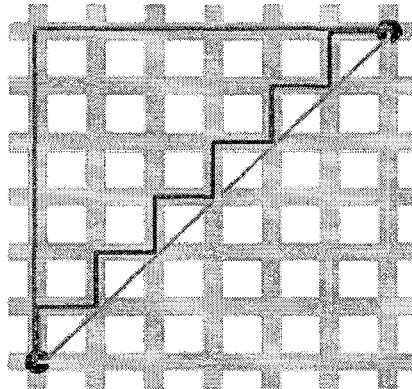
3.2.1.1. Algoritmo de cálculo.

A continuación se describen los pasos que se deben seguir para calcular esta distancia:

1. Se ingresan dos vectores con el mismo número de k componentes.
2. Se recorren los dos vectores simultáneamente, en su *esima* componente.
3. Se resta la *esima* componente del vector 2 a la *esima* componente del vector 1, obteniendo como resultado final el valor absoluto de la diferencia.
4. Se acarrea esta diferencia para sumarle a la diferencia de las demás componentes hasta que $i = k$.

Originalmente, se empleó la distancia Manhattan para resolver el problema relacionado con el cálculo de distancias en espacios metropolitanos, en el que cotidianamente existen obstáculos, a diferencia de la distancia Euclidiana, para obtener resultados más prácticos ya que considera los movimientos en una retícula.

Figura 3.11: Comparativo: distancia Manhattan(azul) vs. distancia Euclidiana(verde).



3.3. Desarrollo de la investigación.

3.3.1. Enfoque de modelado continuo del sistema de transporte en una ciudad urbana.

Supuestos básicos en el enfoque de modelado continuo:

- La diferencia en el patrón de uso del suelo y la configuración de red entre zonas adyacentes es relativamente pequeña, en comparación con la variación en toda la ciudad.
- Las características del uso del suelo y de la red se pueden representar mediante funciones matemáticas suaves a trozos (Vaughan, 1987).
- La interrelación entre estas funciones matemáticas se rigen por unas formas adecuadas de ecuaciones diferenciales o integrales.
- Las condiciones de equilibrio de usuario que son comúnmente adoptadas en el modelado de la red discreta se pueden generalizar al caso continuo en un plano de dos dimensiones.

Bases para el uso enfoque de modelado continuo:

- Para la fase inicial de planificación y modelado en estudios regionales a gran escala, el enfoque puede ser en la tendencia y el patrón de distribución y elección de los viajes de usuarios y sus cambios en respuesta a los cambios de política a nivel macroscópico.
- Datos insuficientes para la creación de una red densa de transporte para un análisis.
- Plan conceptual para las regiones de influencia de servicios competencia (Ej. aeropuertos, terminales), la ubicación de cadenas de congestión, la ubicación de un CBD adicional, la expansión estratégica del sistema de transporte en diferentes partes de la ciudad, etc
- La demanda de viajes se propaga continuamente intrínsecamente sobre la ciudad.

3.3.2. Modelo continuo para análisis de redes.

En este estudio, inicialmente el modelo está configurado para encontrar las zonas de viaje considerando las superficies de fricción en la región de estudio, para lo cual se construyen un conjunto de algoritmos que posteriormente se programarán para describir el tener adecuadas asignaciones a un problema de equilibrio tráfico. Posteriormente, el modelo trata de un problema de minimización restringida, configurado para asignación de viajes de acuerdo a los atractores y al índice de accesibilidad de la región de estudio. Se propone un algoritmo de solución basada en el FEM para resolver el modelo.

El análisis de la asignación de viajes basado en actividades para redes urbanas considerando las superficies de fricción se enfrentó a los tres temas críticos siguientes:

1. Los caminos menores no pueden ser incluidos en codificación de la red.- la omisión de los caminos de menor importancia puede dar lugar a una sobrestimación de la importancia de algunos enlaces importantes, debido a la falta de rutas alternativas.
2. Lugares de demanda se definen por centroides de zona y conectores centroeide. Debido a la representación discreta de distribución de la demanda, un enlace de red puede estar unido a una demanda en particular, y, por lo tanto, el fracaso de este enlace causará impacto a estos viajeros.

3. Enlaces insuficientes en el marco actual de modelado de redes basado en actividades.- las interrupciones catastróficas en las redes de transporte a menudo involucrados diferentes tipos de desastres naturales de área amplia (por ejemplo, inundaciones, terremotos) que no se pueden representar con precisión la estructura de modelos de red.

3.4. Determinación de atributos.

Este proceso ha sido diseñado con el objeto de garantizar los principios fundamentales de una investigación científica: medible, reproducibilidad, generalidad y aplicabilidad, tal y como se recomienda entre otros, en *Eco, Baranda y Clavería* (2001).

A continuación se aborda el proceso de caracterización y descripción detallada de las instancias hasta llegar al diseño experimental. De este modo, en los siguientes apartados se irá profundizando en la caracterización y definición detallada de todos los factores que definen el conjunto de experiencias llevado a cabo. Este proceso de caracterización y el diseño experimental se ha realizado siguiendo las recomendaciones de *Montgomery* (2009).

3.4.1. Caracterización de las instancias.

Se considera como instancia a cada uno de los casos o problemas que se utilizarán en esta experimentación. Cada instancia, caso o experiencia está definido por una serie de propiedades o características diferenciadas que habrá que estudiar con detalle para poder comprender mejor su comportamiento de manera comparativa, y probar o refutar las hipótesis planteadas. El estudio de las características ayudará en la definición del diseño experimental. En primer lugar se presenta una clasificación de las características de las instancias. Dentro de cada dimensión o factor se identifican diferentes tipos.

3.4.1.1. Territorio.

Es la región geográfica del planeta donde se sitúa la instancia. El territorio se acota con un cuadrante que a su vez estará definido en situación y tamaño por dos pares de coordenadas geográficas de latitud y longitud (esquinas opuestas del cuadrante). Se distinguen las siguientes variantes:

1. **Corta distancia:** las localizaciones estarán ubicadas dentro del ámbito geográfico de una ciudad, es decir, intramuros (*intra-city*). La comunicación o itinerarios estarán sujetos a la ordenación urbana (calles, rotondas, circunvalación, centro urbano, etc.).
2. **Media distancia:** las localizaciones se extienden a una región mayor, provincial por ejemplo. Están sujetas a la comunicación disponible entre diferentes ciudades (*inter-city*), caminos, carreteras, autovías y también a las redes intramuros.
3. **Larga distancia:** la región abarca el territorio nacional o internacional. La comunicación está condicionada por el diseño de la red de transporte nacional, las grandes vías de comunicación y todo lo anteriormente expuesto (*national and international transport*).

3.4.1.2. Localización.

Se refiere a la posición que tomarán los nodos de la instancia dentro del territorio anteriormente definido. Como se verá más adelante, la localización de los nodos puede ser completamente aleatoria o formando algún tipo de patrón ordenado (*clusters*). Se distinguen las variantes siguientes:

1. **Aleatoria:** la localización de los nodos dentro del territorio es completamente fortuita o al azar (*random*), y no responde a ningún criterio ordenado.
2. **No aleatoria:** la localización de los nodos se decide a partir de un criterio, dando lugar a un patrón de ubicaciones ordenado, por ejemplo formando algún tipo de agrupación (*clusters*) o estructura.
 - a **Cuadrícula o rejilla (*grid*):** los nodos están localizados formando un patrón de cuadrícula o conjunto de cuadrados. El objetivo es simular una distribución sobre un plano o trazado hipodámico (en griego: Hippodamos, de Hipodamo de Mileto), basado en planos ortogonales, en cuadrícula o en damero; intentando adecuarse al planteamiento urbanístico que aparece en las ciudades mediante el diseño de calles en ángulo recto y manzanas (cuadras) rectangulares.
 - b **Radial (*radial*):** en este otro planteamiento los nodos están distribuidos de manera radial a una localización central. De este modo se intenta simular una distribución más propia de los VRP, donde desde una localización central se intenta servir a un conjunto de nodos de la región distribuidos radialmente a lo largo del perímetro del central.

3.4.1.3. Simetría.

Cada instancia generada a partir de un territorio y un conjunto de nodos geolocalizados se transformará en una matriz de distancias c_{ij} . Según el territorio, la localización, el modo de medir la distancia entre nodos, y otras transformaciones dicha matriz tendrá un grado de simetría.

1. **Simétrica:** la matriz de distancias c_{ij} es completamente simétrica. Dicha matriz se calculará en principio en base a las distancias ortodrómicas entre pares de nodos, pero se tendrán en consideración otras variantes en cuanto a la construcción de las matrices simétricas.
 - a Distancias ortodrómicas (simétrica): es la matriz cuyas distancias $c_{ij} = c_{ji}$ y que han sido calculadas mediante fórmulas.
 - b Menor arco real de cada par (simétrica): en primer lugar se calculará la matriz de distancias reales con ayuda de un GIS tomando los itinerarios reales entre pares de nodos, como es sabido, esta matriz es asimétrica. A continuación se realizará una transformación a partir de esta matriz asimétrica para transformarla en simétrica, de modo que cada elemento de la nueva matriz simétrica será igual al arco de menor distancia c de cada par de arcos ij de la asimétrica, esto es, se tomará el $\min(c_{ij}, c_{ji})$ de la asimétrica.
 - c Mayor arco real de cada par (simétrica): de modo similar al caso anterior, pero al contrario, tomando como elemento de la matriz simétrica el arco de mayor distancia c de cada par de arcos ij de la matriz asimétrica real, esto es, se tomará el $\max(c_{ij}, c_{ji})$ de la asimétrica.

- d Transformada (simétrica por transformación de la asimétrica): se construirá una matriz simétrica a partir de la matriz asimétrica GIS realizando una transformación. Esta transformación de la matriz afecta al siguiente factor, ya que multiplica por 4 el tamaño de la matriz de distancias c_{ij}
2. **Asimétrica:** si la matriz de distancias c_{ij} no es completamente simétrica. En este caso se tomará la matriz calculada con ayuda de un GIS y tomando los itinerarios reales entre pares de nodos, y sin ningún tipo de transformación posterior.

3.4.1.4. Tamaño de la matriz.

En relación con el número de nodos n de la instancia la matriz tendrá un tamaño $n \times n$, o si es transformada como simétrica de $2n \times 2n$. Un mayor número de nodos n o un mayor tamaño de la matriz de distancias c_{ij} implica una mayor complejidad de cálculo, que como es sabido crece exponencialmente según el tamaño de la instancia.

1. Número de nodos: el tamaño de la matriz varía en función de n . Se establecerá un rango y un intervalo según el número de localizaciones para poder analizar este factor.

3.4.2. Estudio detallado de la caracterización de las instancias.

Se profundiza en el análisis de las características antes presentadas. Se identificarán los factores y su tipo (cuantitativo o cualitativo). Así mismo, se identificarán los posibles niveles o variantes de cada factor. Esto último define los rangos, que son la variación permitida en los valores y otras características entre unos límites definidos. Factores, niveles y variantes se irán combinando para dar lugar a una instancia de características o propiedades concretas.

La combinación de las diferentes propiedades, sus rangos, y el número total de instancias de la muestra define el espectro o ámbito de la experimentación. Más adelante, se justificará el número total de instancias y réplicas necesarias para llevar a cabo los experimentos con suficiente nivel de confianza.

3.4.2.1. Territorio.

Es un factor cualitativo, y en realidad se trata de un factor continuo; pero en este caso se va a discretizar a través de la elección de diferentes regiones de distinto tamaño, convirtiéndose en un factor cualitativo ordinal. Las variantes seleccionadas son:

1. Corta distancia
2. Media distancia
3. Larga distancia

En este trabajo de investigación se ha elegido la Ciudad de Ayacucho como territorio del estudio, sobre él se han identificado las tres regiones o variantes antes expuestas. Se utilizará la más moderna y actualizada cartografía disponible en el momento del estudio; el territorio y su infraestructura es algo dinámico, y esto podría afectar en cierto grado a futuros experimentos similares sobre el mismo territorio.

Figura 3.12: Localizaciones en distribución aleatoria.



Fuente: Plan Director de Ayacucho

3.4.2.2. Localización.

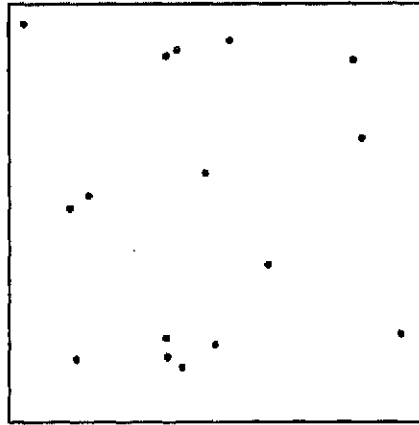
Es un factor cualitativo nominal. Se pretende analizar el comportamiento de los algoritmos en función de la naturaleza u ordenación de las localizaciones dentro del territorio. Por ello se han definido tres variantes que como se ha comentado antes se pueden dividir entre estructuras ordenadas y estructuras caóticas:

1. Aleatoria
2. Cuadrícula o rejilla (grid)
3. Radial (radial)

La siguiente Figura muestra un ejemplo de distribución aleatoria de las n localizaciones sobre un territorio. En este caso cada localización tomará unas coordenadas de latitud y longitud generadas aleatoriamente y pertenecientes a la región objeto de estudio, representada en la figura por el cuadrado exterior. Cada instancia generada tendrá una distribución completamente diferente y atendiendo a un patrón caótico.

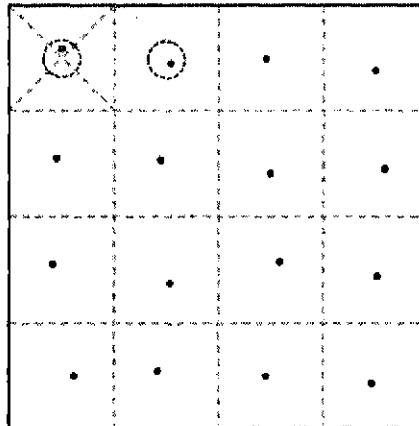
En una distribución en rejilla o cuadrícula, el territorio objeto de estudio (representado por el cuadrado exterior) se divide en tantas zonas cuadradas como sea necesario. En el centro de dichas zonas será ubicada una localización, aunque estará desplazada ligeramente del centro por un vector aleatorio. Gracias a la utilización de este vector de desplazamiento, cada instancia generada será diferente a la anterior, aunque conservando una distribución con un patrón de damero. En el caso de que $n > \text{entero}(\sqrt{n}) \cdot \text{entero}(\sqrt{n})$, las $n - \text{entero}(\sqrt{n}) \cdot \text{entero}(\sqrt{n})$ localizaciones que no quepan en la cuadrícula $\text{entero}(\sqrt{n}) \cdot \text{entero}(\sqrt{n})$ serían colocadas aleatoriamente en el espacio disponible.

Figura 3.13: Localizaciones en distribución aleatoria.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.14: Localizaciones en distribución de rejilla.



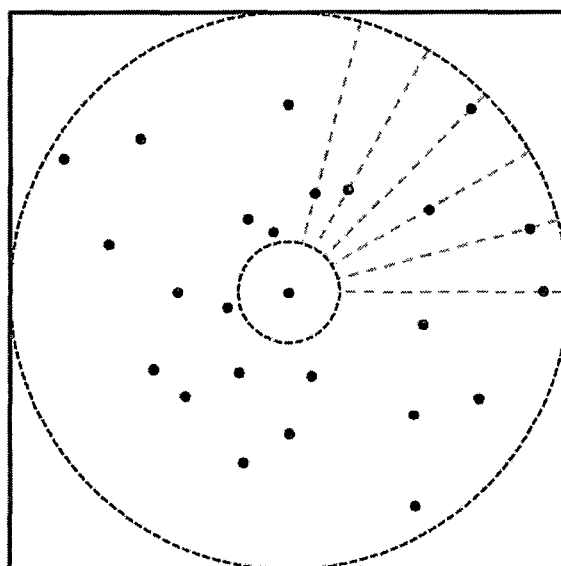
Fuente: Elaboración propia

La distribución de localizaciones de $n - 1$ localizaciones de manera radial alrededor de una localización central del territorio. Como se observa en la figura, el territorio se divide por dos fronteras circulares que forman una corona circular. Dentro de esta corona circular se localizan $n - 1$ radios a una equidistancia angular $\alpha = 2\pi/(n - 1)$. En cada radio y dentro de la corona circular se situará una localización a una distancia aleatoria del centro. En el centro de toda la región siempre estará situado una localización.

3.4.2.3. Simetría.

En cierto modo se trata de un factor cuantitativo, ya que el grado de simetría de una matriz puede variar en un rango de valores, desde completamente simétrica a completamente asimétrica, y en tantos intervalos o niveles como pares de nodos dependiendo del tamaño de la matriz. Por otro lado, al utilizar matrices de distancias basadas en localizaciones reales, el grado de simetría resultante de la matriz es en cierto modo incontrolable, ya que dependerá del territorio elegido y de la red de carreteras existentes, así como de las localizaciones.

Figura 3.15: Localizaciones en distribución radial.



Fuente: Elaboración propia

Es por ello, por lo que se ha decidido transformar la simetría en un factor cualitativo ordinal; cada tipo de matriz construida tendrá un grado de asimetría diferente. De este modo se pretende controlar en cierto modo su comportamiento, y establecer un número de variantes suficientes y relevantes que permita observar una posible no linealidad en los resultados.

1. Distancias ortodrómicas (simétrica)
2. Menor arco real de cada par (simétrica)
3. Mayor arco real de cada par (simétrica)
4. Transformada (simétrica por transformación de la asimétrica)
5. Asimétrica

3.4.2.4. Número de nodos.

Claramente es un factor cuantitativo, dependiendo del número de nodos o localizaciones cambiará el tamaño de la matriz de distancias resultantes y la complejidad del problema a tratar. El conjunto de tratamientos totales en la experimentación viene condicionado en gran medida por los siguientes factores relativos al número de nodos:

1. **Rango:** debe ser relevante, del mismo orden de magnitud que la mayoría de los problemas de reparto que aparecen en la industria y en los servicios, y que alcance cierto nivel de complejidad para poder observar el comportamiento de los algoritmos en dicho nivel.
2. **Intervalo:** estará definido de modo equiespaciado, lo que permitirá observar una posible no linealidad en los resultados.

Quedan clarificados todos los aspectos relativos a la caracterización de las instancias. A continuación se estudiarán las variables respuesta que serán medidas durante el proceso experimental.

3.5. Matrices asimétricas.

Se analiza desde diferentes puntos de vista algunas características de las instancias generadas y utilizadas en los experimentos:

1. Por un lado, valorar el alto costo en tiempo computacional de la obtención de datos de distancias reales. De este modo, se pretende cuantificar la barrera de entrada computacional. Se comparará dicho esfuerzo computacional de la obtención de datos de distancias reales respecto al de los datos de distancias ortodrómicas. En este punto, se analizará si dicho tiempo o costo computacional está condicionado por diversos factores: el territorio, la localización y el tamaño de la matriz. Con estos análisis se pretende aportar una referencia actual sobre dicho costo, que sirva en el futuro para valorar y mejorar las técnicas de cálculo de las matrices asimétricas reales.
2. Por otro lado, se cuantificará el grado de asimetría de las matrices de distancias y se analizará si existe una relación entre dicho grado de asimetría y los factores territorio y localización. Para ello se utilizan los indicadores de grado de asimetría propuestos en el capítulo anterior, la localización de los nodos en el mundo real (el ámbito geográfico del problema) representa diferente grado de asimetría.

3.5.1. Costo de la asimetría.

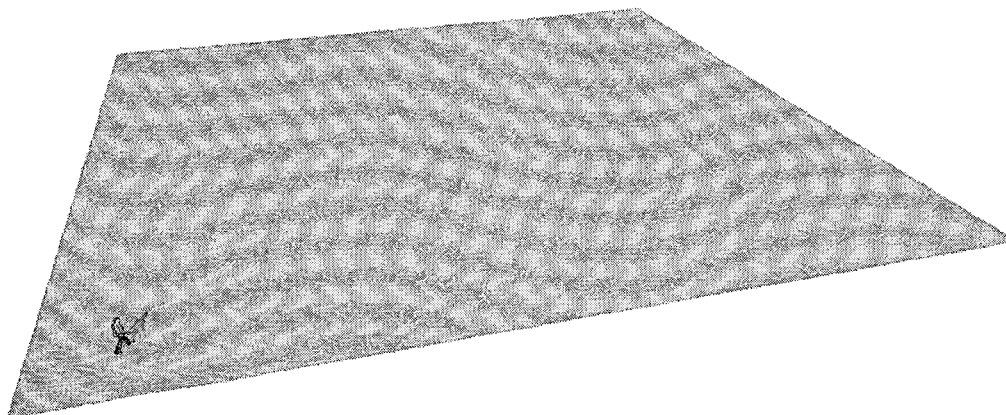
En esta sección se realiza una valoración y un análisis sobre el costo computacional de obtener datos reales provenientes de un sistema GIS. El objetivo de este estudio es valorar el coste en tiempo de computación de la obtención de datos de distancias reales respecto a la de datos de distancias ortodrómicas.

Por otro lado, se analizará cómo afectan al coste computacional o tiempo requerido diversos factores como el territorio (T), la localización (L), y el tamaño de la matriz (n); y en qué medida afectan estos factores al tiempo.

Durante la etapa de cálculo de las matrices asimétricas se fueron registrando los tiempos empleados en la obtención de cada una de las instancias. En los análisis que siguen se van a emplear dos indicadores:

1. **Tiempo total (h):** es el costo computacional en horas de la obtención de una matriz asimétrica. Este tiempo se ha calculado sin tener presente los tiempos de lectura de datos de localizaciones y escritura de datos de distancias. Si bien, incluyen otros tiempos de tráfico de datos por la red.
2. **Tiempo promedio (p):** es el tiempo total dividido entre el número de arcos (o consultas) al sistema GIS. Por tanto, es el coste computacional promedio en unidades de tiempo de la obtención de un arco de la matriz asimétrica: $p = h / (n \cdot (n - 1))$.

Figura 3.16: Superficie equivalente de las matrices asimétricas.



Fuente: Elaboración propia

En los siguiente análisis se pretende encontrar una relación entre el coste computacional (tiempo) y algunos factores clave. Por ejemplo: ¿existe una relación entre el tiempo total de obtención de una matriz y el número de arcos n ?, ¿el tiempo promedio depende de factores como el territorio o la localización?. Aunque el tiempo promedio incluye pequeños tiempos de tráfico de datos en la red, se supondrá que la mayor parte del tiempo de computación corresponde con la ejecución del algoritmo para el cálculo del camino mínimo de 2 puntos.

La siguiente figura se muestra a modo de ejemplo un plano de una sección de la ciudad de Ayacucho con sus calles y su sentido de circulación (en adelante, todas las figuras son de elaboración propia si no se cita la fuente) se puede observar como a partir de la red real antes presentada, se puede modelar su grafo.

3.5.2. Especificación del modelo.

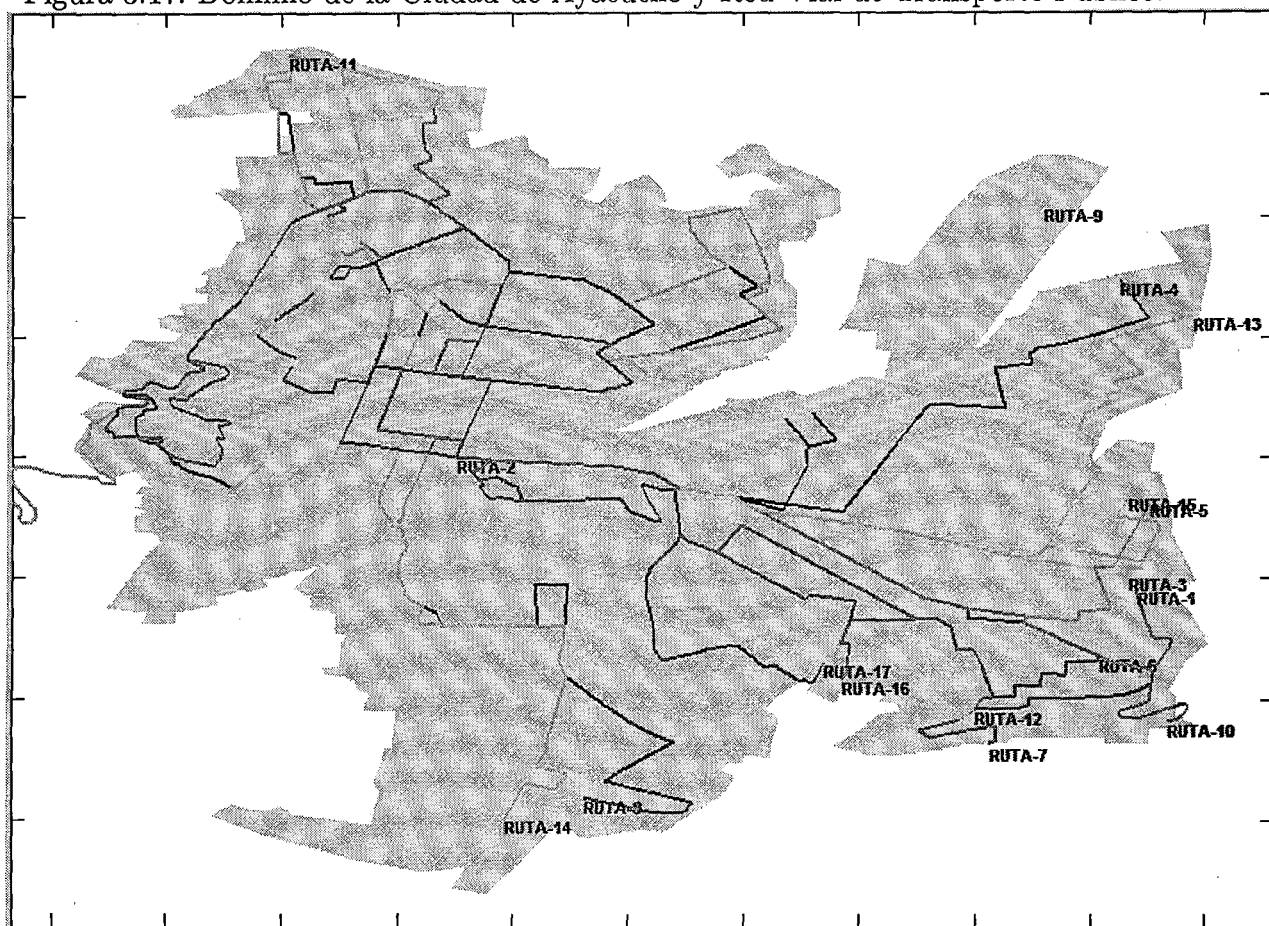
La mayoría de la información geográfica para el desarrollo del modelo que es objeto de este estudio, proviene de un inventario de la infraestructura vial, de las bases gráficas georeferenciadas y manejado con SIG. Este inventario es parte de un sistema de administración de información de transporte de las ciudades del país. En este inventario los alineamientos de las calles y carreteras, están georeferenciados, es decir, basados en coordenadas geográficas.

Consideramos el problema de enrutamiento en una red estática masivamente denso. Un dominio Ω del plano (x,y) está densamente cubierto por los recorridos potenciales. Los viajes tienen que fluir de una región S de la frontera Γ de Ω a una región disjunta R de Γ .

En la presente sección se expone el desarrollo de una aplicación informática para la representación gráfica de superficies a partir de un conjunto de puntos de coordenadas (x,y,z) utilizando los siguientes métodos de interpolación:

1. **Polígonos de Voronoi:** Método basado en la distancia euclídea y en la presunción lógica de que los puntos cercanos a un punto muestreado se parecerán a éste.

Figura 3.17: Dominio de la Ciudad de Ayacucho y Red Vial de Transporte Público.



Fuente: Elaboración propia

2. **Redes de Triángulos irregulares:** La superficie real se puede aproximar a una superficie matemática discreta formada por superficies elementales planas, en este caso triángulos, que se definen a partir de un conjunto de puntos dados.

Estos métodos están basados en 2 estructuras fundamentales de la Geometría Computacional como son la "*Triangulación de Delaunay*", y su dual, el "*Diagrama de Voronoi*".

3.5.3. Tratamiento del modelado.

Consideramos una región de forma arbitraria con múltiples zonas centrales atractoras (ZCA), en el que la red viaria se aproxima como un continuo [45]. 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 desplazarán desde la ubicación de la demanda a las ZCA a lo largo de la ruta menos costosa en el espacio bidimensional. 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.

En la definición de la región de estudio, el enfoque de modelo continuo tiene dos ventajas: arbitrarias y sin escala. A medida que la región de estudio para el enfoque

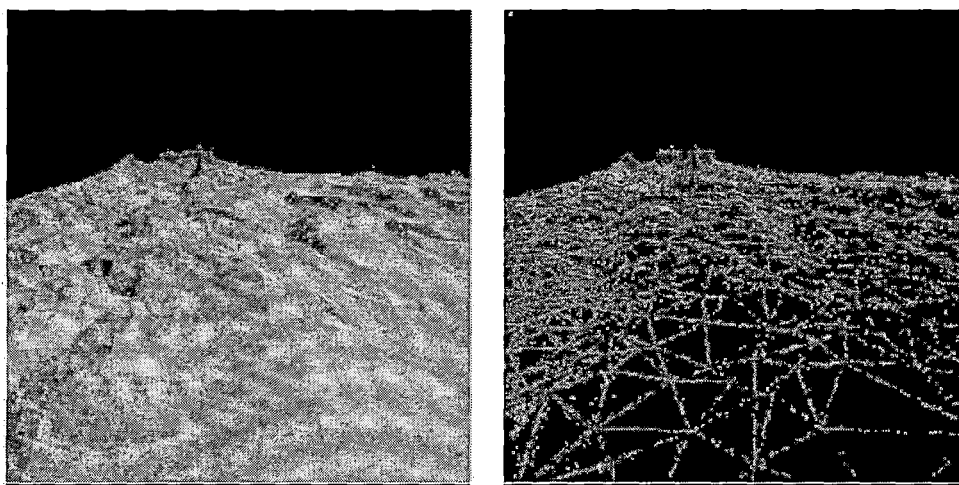
de modelado continuo se define únicamente por las localizaciones espaciales de los límites exteriores y ZCA (es decir, no se requiere ninguna forma específica), el modelo propuesto puede definir fácilmente la forma de la región de estudio basado en el ámbito de estudio (por ejemplo, una ciudad de baja densidad, un distrito, etc.). A medida que se adoptó el FEM para resolver el modelo continuo, el tamaño del problema sólo depende de la cantidad de elementos finitos utilizados, pero no el tamaño de la zona de estudio.

Por lo tanto, es posible tener un área de estudio más grande sin aumentar sustancialmente el tamaño del problema. Tal naturaleza libre de escala del enfoque de modelado continuo y el algoritmo correspondiente de solución permite la flexibilidad en el modelado de problemas.

Donde la región de estudio es Ω , y el límite exterior sea τ . La ubicación de ZCA es L_d $D \in D$, donde D es el conjunto de ZCA en la región de estudio. Para evitar la singularidad en las ZCA, se supone que cada uno de las ZCA es de tamaño finito y encerrado por un límite τ_{cd} . El costo de viaje por unidad de distancia (v.g. km) en la posición $(x,y) \in \Omega$ para los usuarios de clase m es denotado por $c_m(x,y)$, que es dependiente de la localización.

3.6. Modelos de Representación de Terrenos

La solución aparentemente mas adecuada para el tratamiento del relieve es mediante la formación de redes de triángulos irregulares (TIN), que se adaptan a la complejidad del terreno. De las numerosas triangulaciones posibles de una misma nube de puntos, no todas son validas para la aproximación el del terreno. Para que esta técnica sea efectiva, la triangulación mas lógica, sera aquella que forme los triángulos mas equiláteros posibles. Por consiguiente, la triangulación de Delaunay es la mas adecuada para la formación de redes de triángulos irregulares en la generación de modelos digitales del terreno (MDT), siendo la mas optima para la definición del terreno.



The screenshot displays the MATLAB 7.0 (R2006b) environment. The Command Window is active, showing the current directory as 'C:\Users\Equipal\Desktop\Yonatan\WORKING\'. The Command History window is open, showing a list of commands entered, including 'clear', 'clc', and 'FEM'.

Command Window:

```

>> FEM

```

Command History:

```

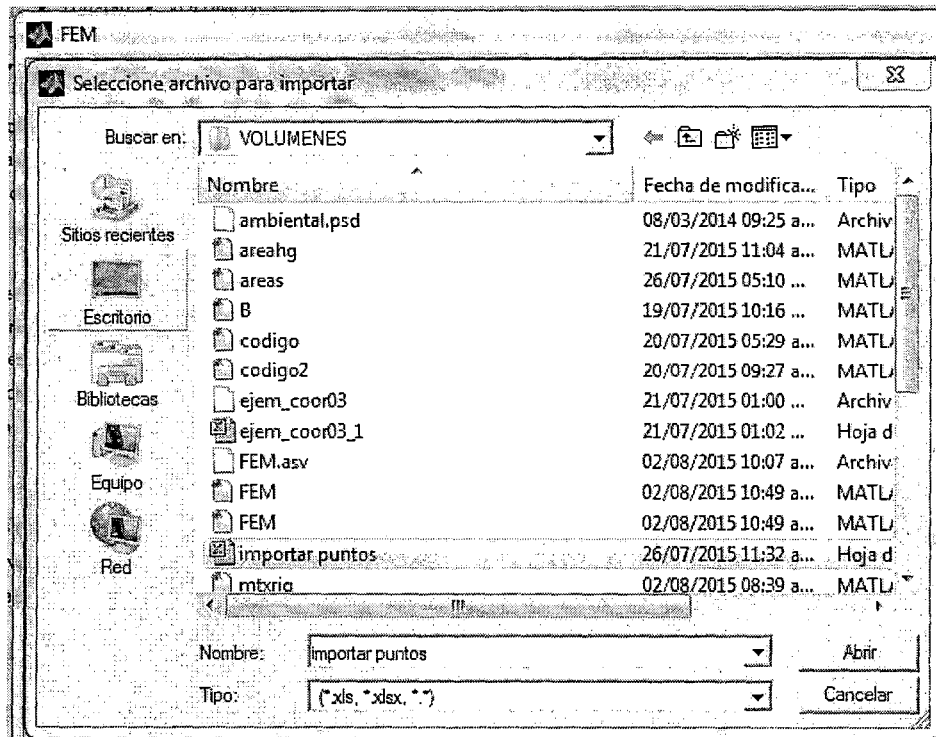
>> clear
>> clc
>> FEM

```

The Command History window also shows the time and date for each command execution.

[illegible]

Coordenadas de la superficie



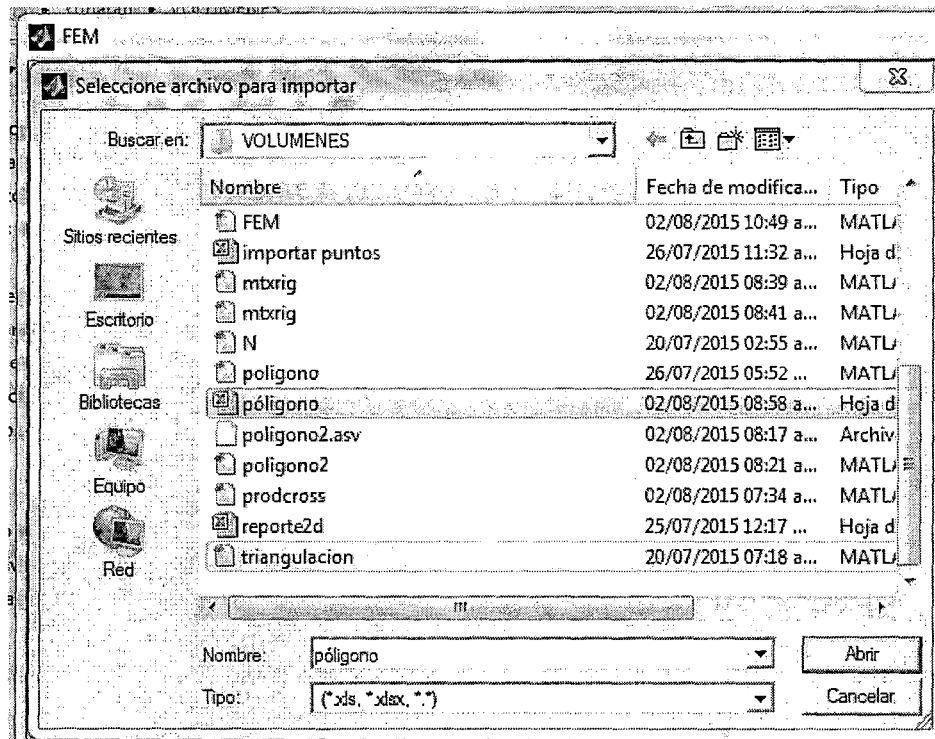
Coordenadas de la superficie, importadas en el programa:

Datos de entrada

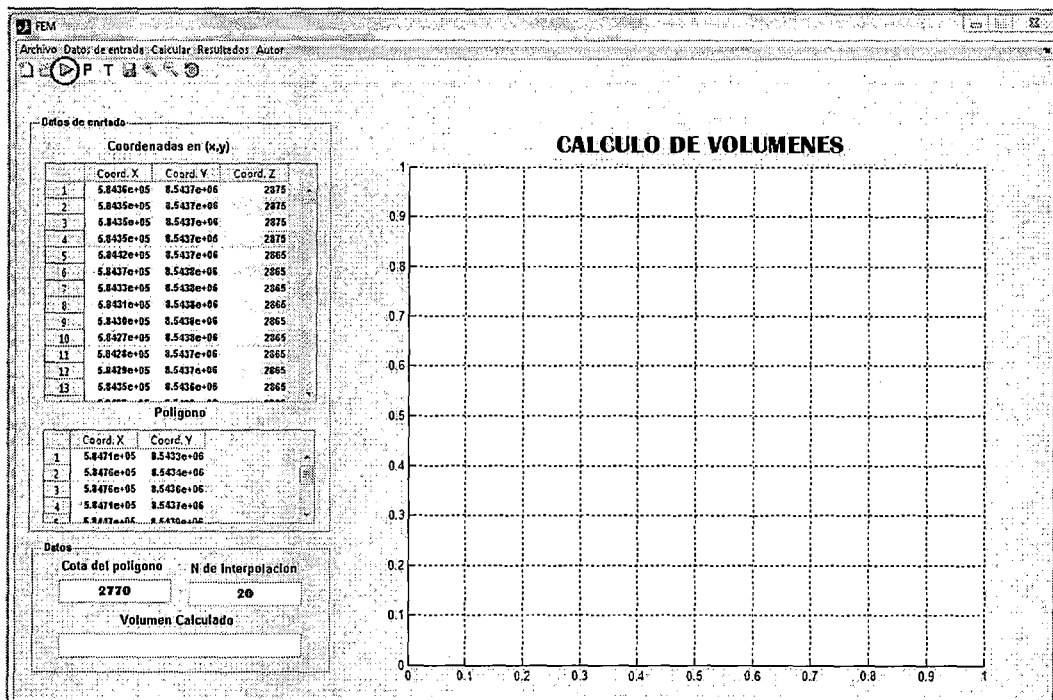
Coordenadas en (x,y)

	Coord. X	Coord. Y	Coord. Z
1	5.8436e+05	8.5437e+06	2875
2	5.8435e+05	8.5437e+06	2875
3	5.8435e+05	8.5437e+06	2875
4	5.8435e+05	8.5437e+06	2875
5	5.8442e+05	8.5437e+06	2865
6	5.8437e+05	8.5438e+06	2865
7	5.8433e+05	8.5438e+06	2865
8	5.8431e+05	8.5438e+06	2865
9	5.8430e+05	8.5438e+06	2865
10	5.8427e+05	8.5438e+06	2865
11	5.8428e+05	8.5437e+06	2865
12	5.8429e+05	8.5437e+06	2865
13	5.8435e+05	8.5436e+06	2865

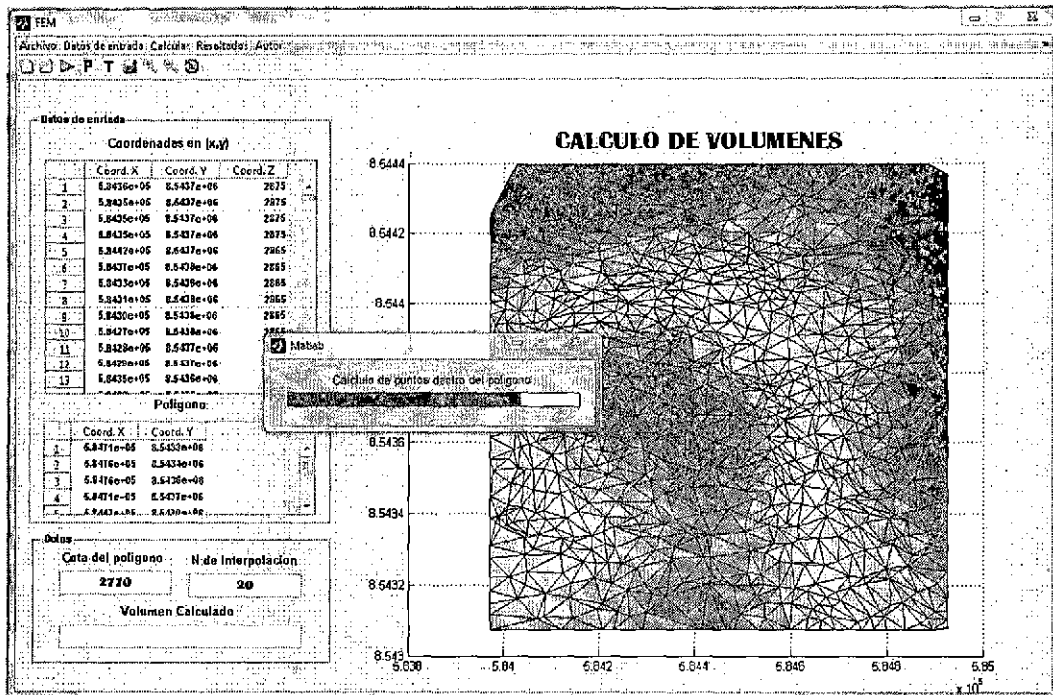
Coordenadas del polígono:



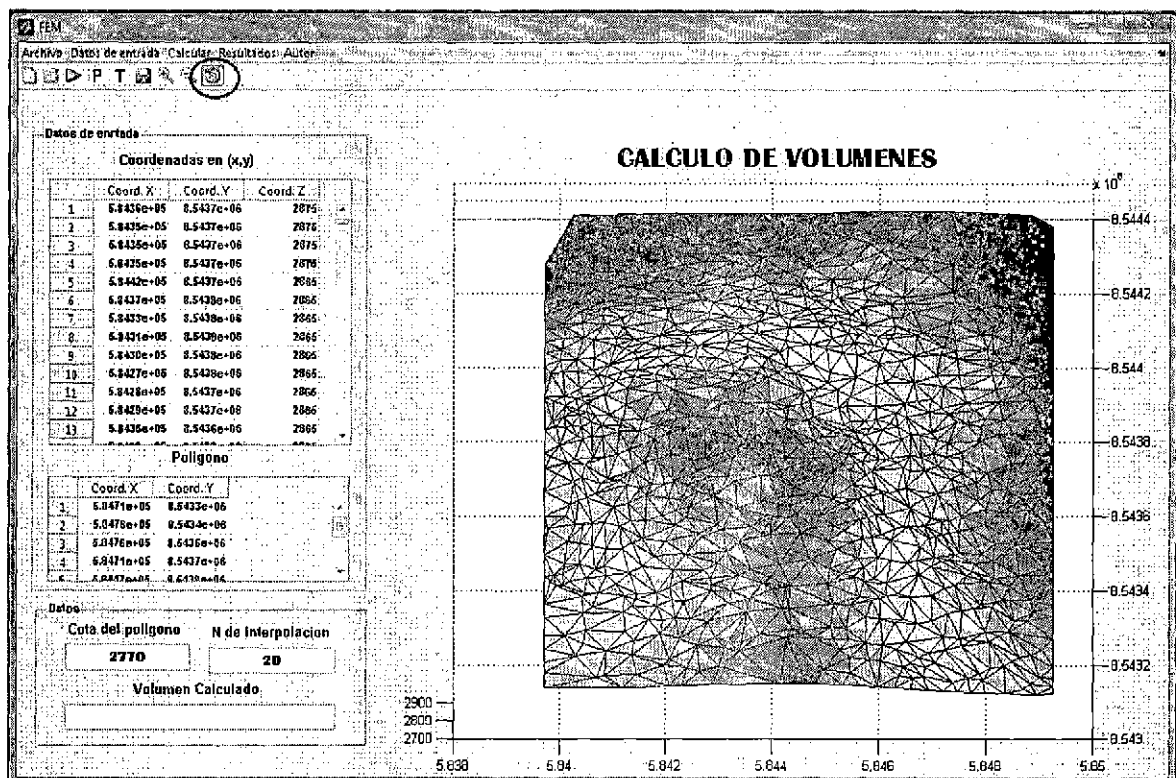
Ejecución del programa, para mostrar la superficie:

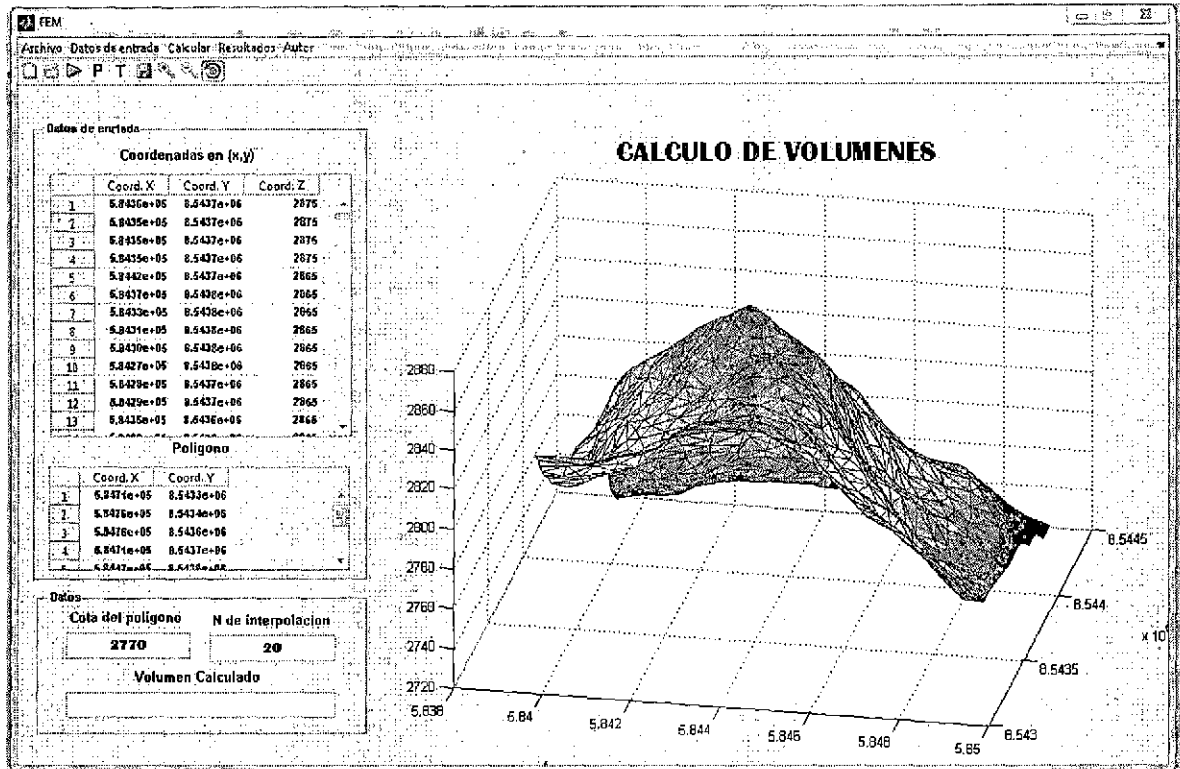


Interpolando la superficie:

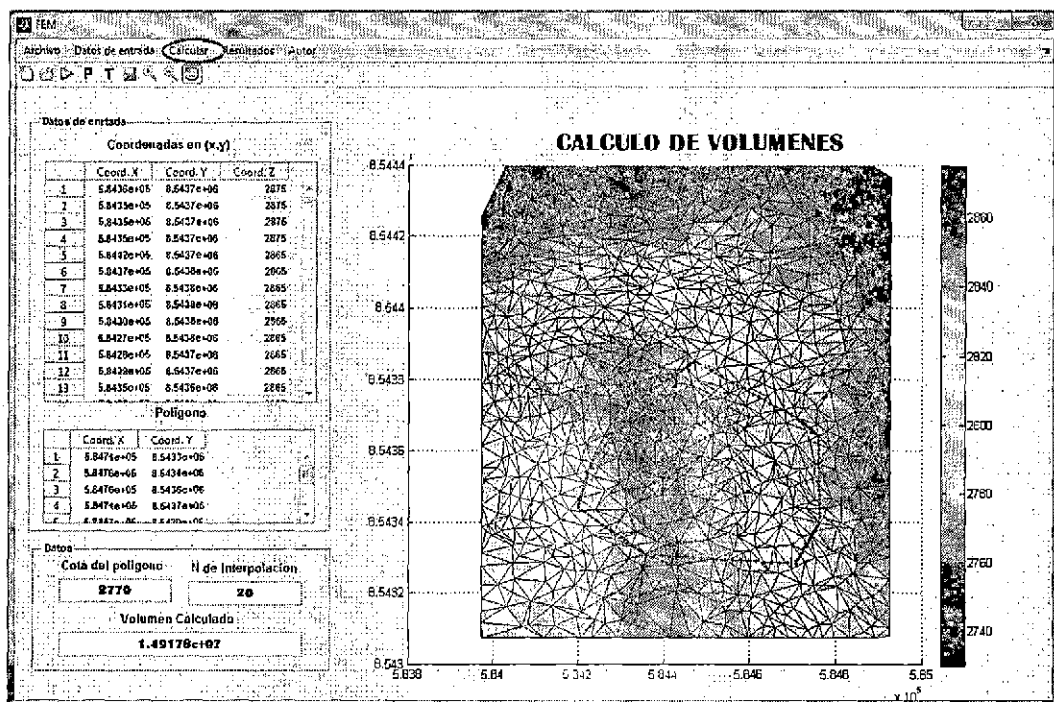


Visualizando la superficie en 3D, hacemos click en la opción (rotate 3D):

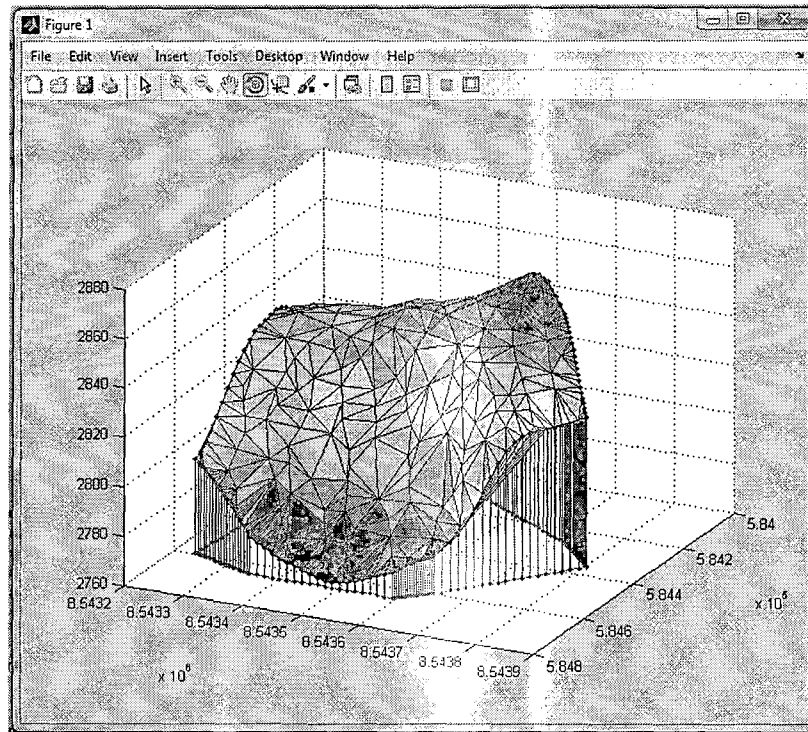




Calculando dominio del área de intervención con el experimento:



Salida del procesamiento de información del MDT:



Reporte del programa con MDT interpolado según el TIN generado:

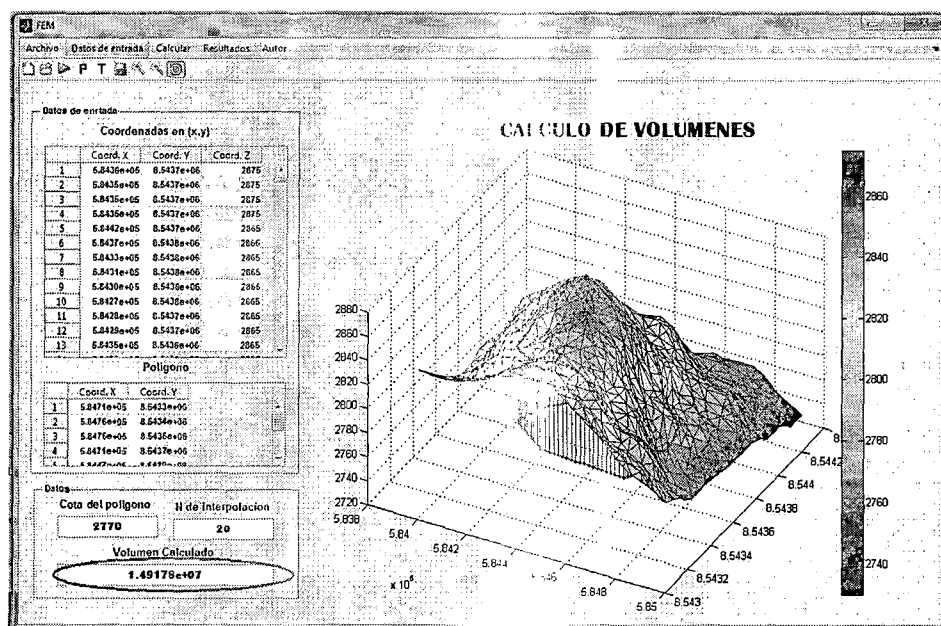
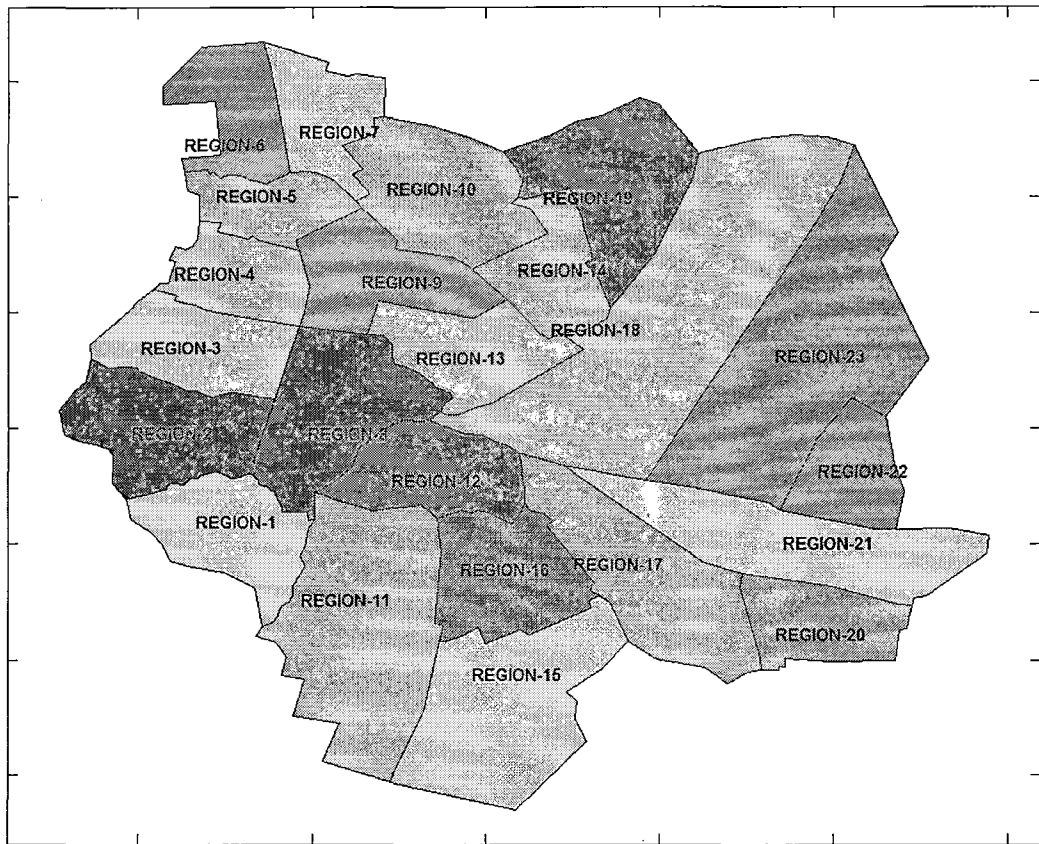
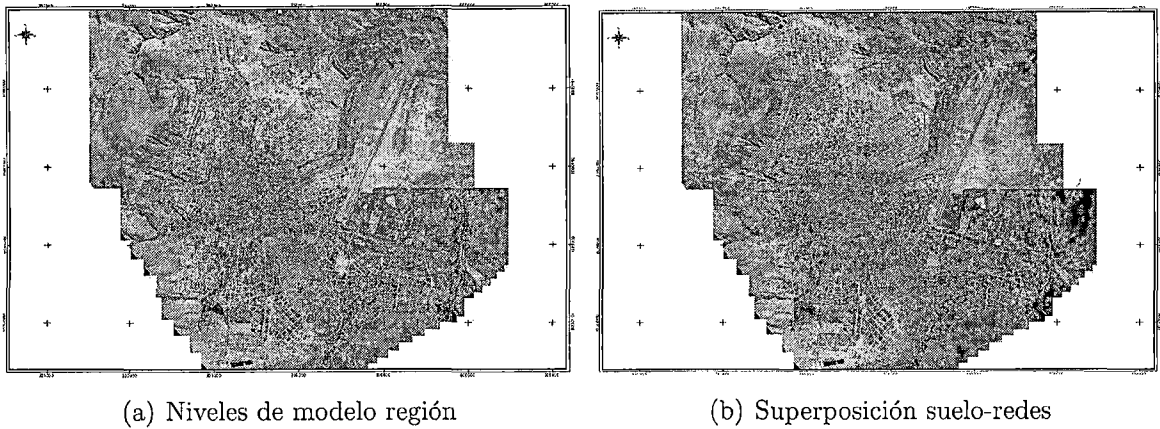


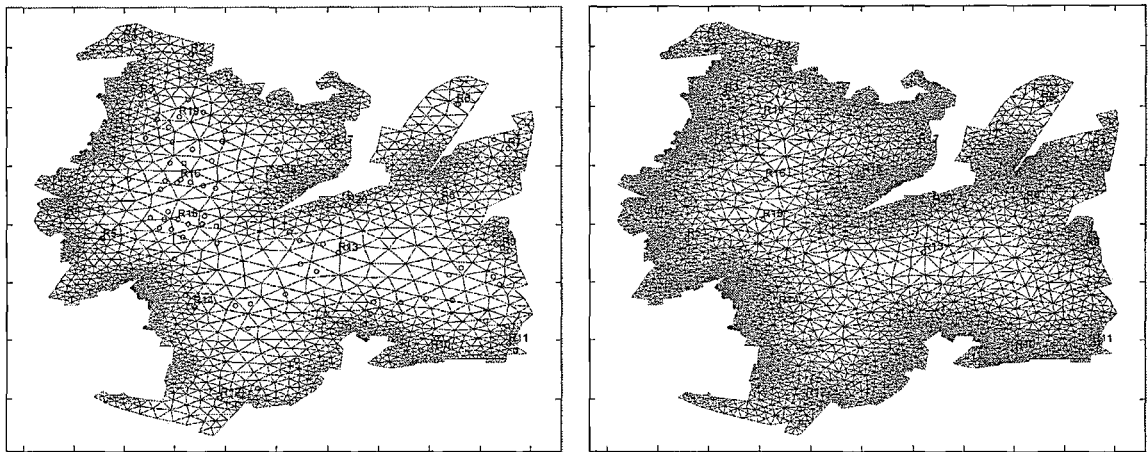
Figura 3.18: Mapa del dominio de Ayacucho al año 2014 con 23 subzonas de división con el algoritmo "MiM" - MOBILIS.



Fuente: Elaboración propia

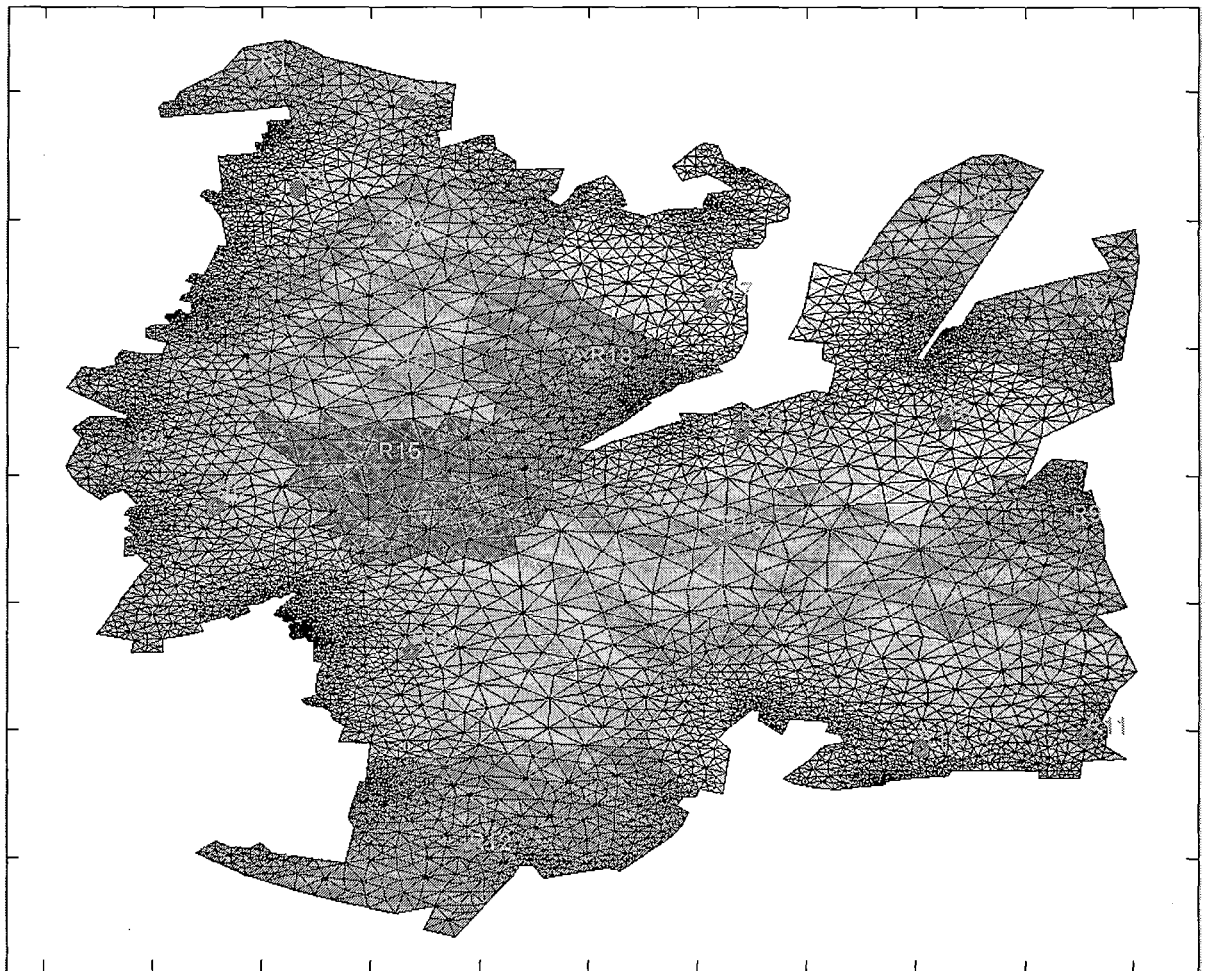
Se propone un análisis continuo de las regiones donde se generan los viajes. El modelo se resuelve mediante algoritmo de solución basada en FEM para la discretización del dominio y la determinación de las zonas de viaje, de acuerdo a la dinámica de los puntos atractores basados en actividades.

Figura 3.19: Modelación de ciudad con CBD: Ciudad de Ayacucho 2014.



(a) Discretización FEM

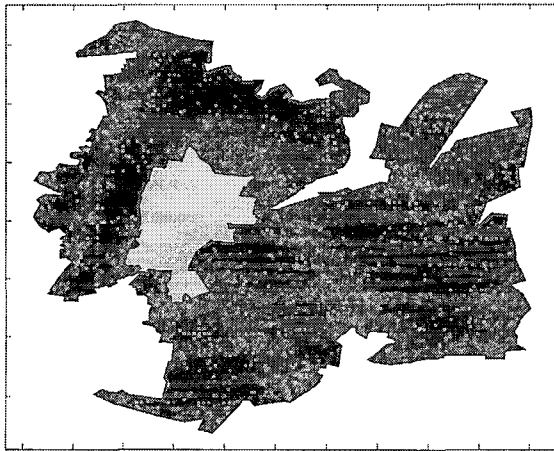
(b) Refinamiento FEM.



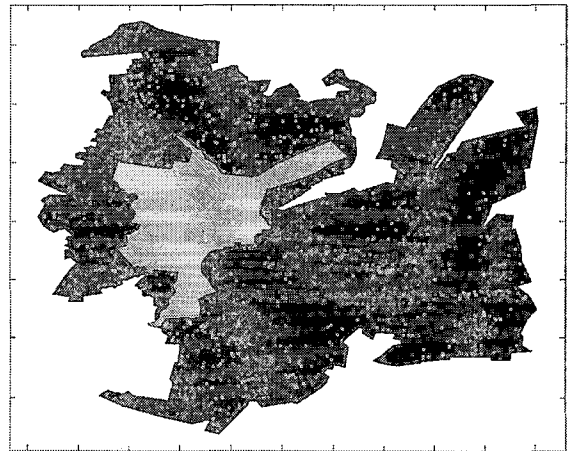
(c) Resultado de zonas de viaje.

Fuente: Elaboración propia

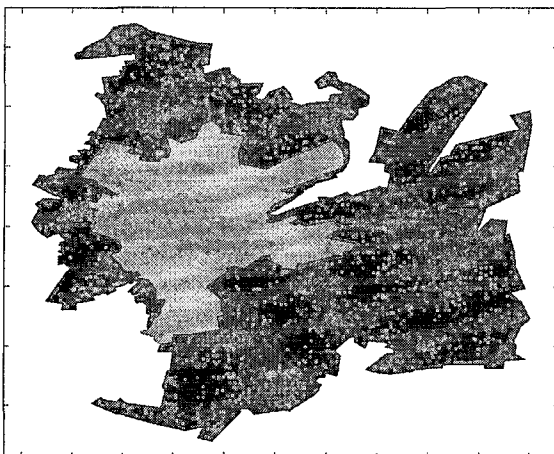
Figura 3.20: Diseño de experimento de generación de zonas de viaje con EF obtenidos con teselación de tipo Delaunay.



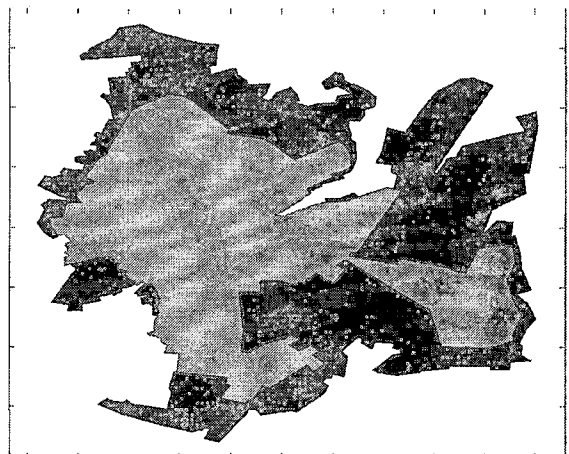
(a) Evolución con y sin fricción 1944-2014



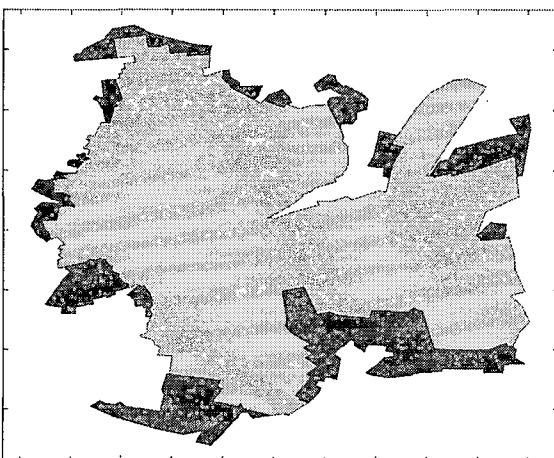
(b) Evolución con y sin fricción 1963-2014



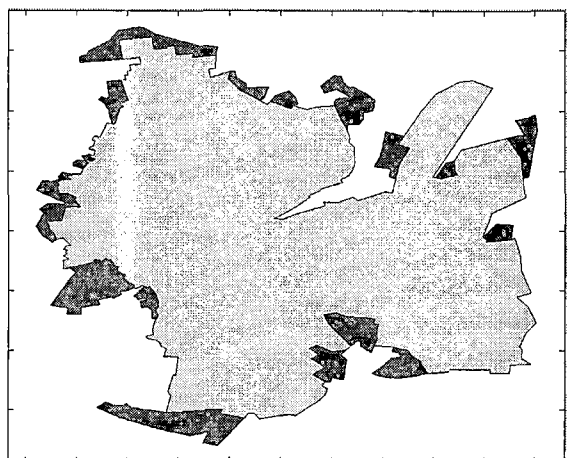
(c) Evolución con y sin fricción 1971-2014



(d) Evolución con y sin fricción 1982-2014



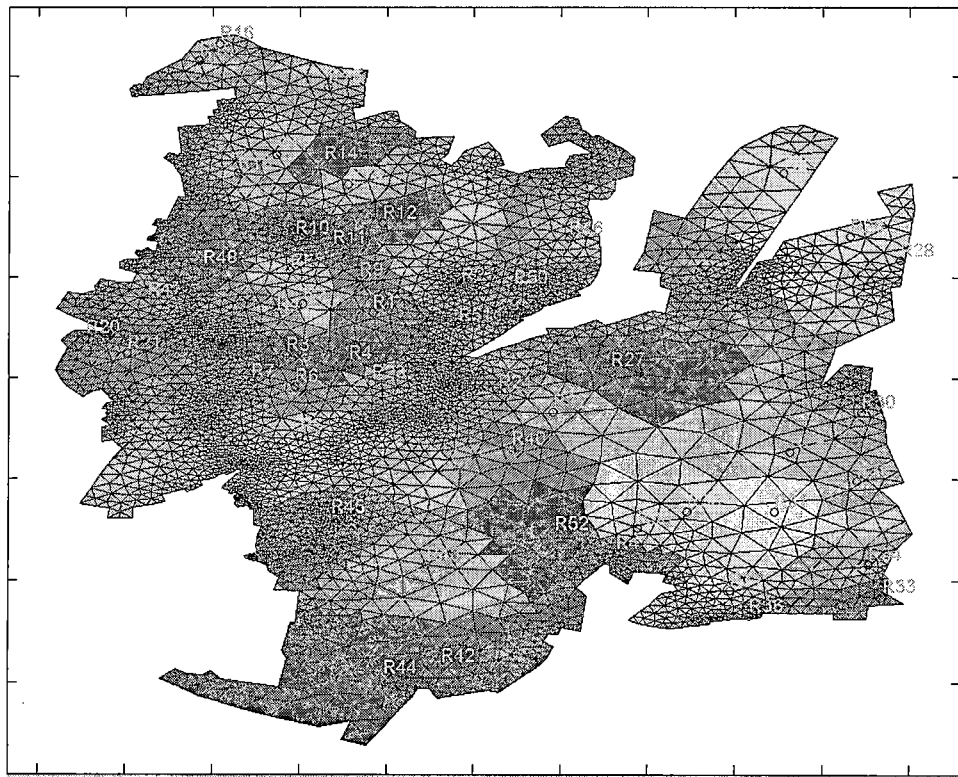
(e) Evolución con y sin fricción 1992-2014



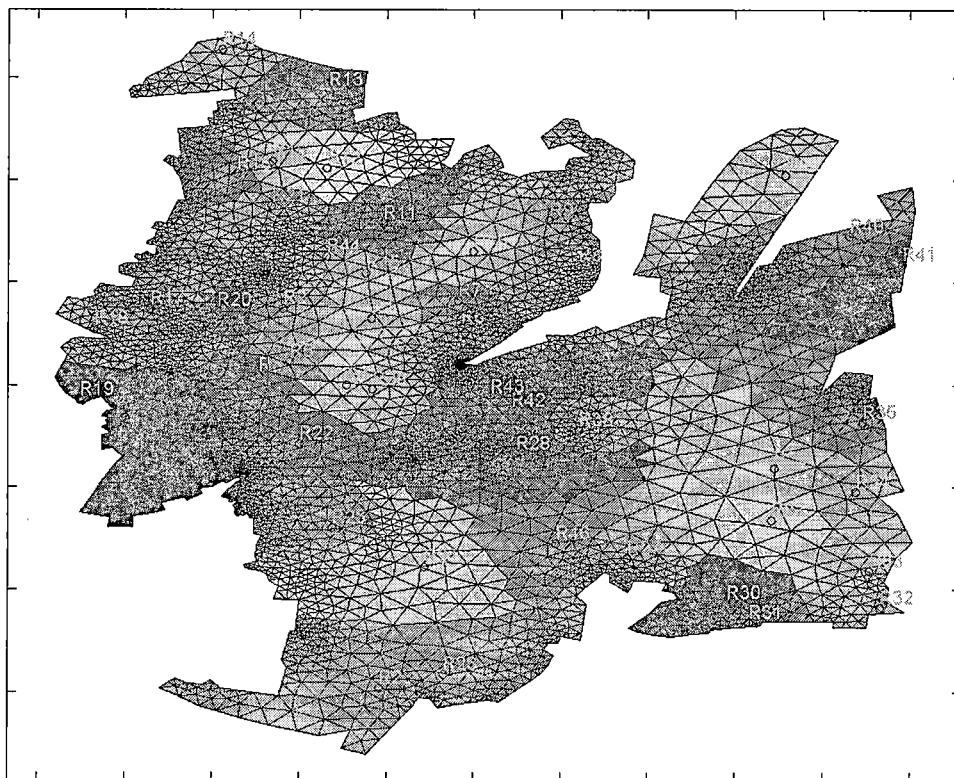
(f) Evolución con y sin fricción 1996-2014

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.22: Zona de viaje considerando modelo anisotrópico (con impedancia) para dominio y subdominios de la Ciudad de Ayacucho con 46 atractores de viaje.

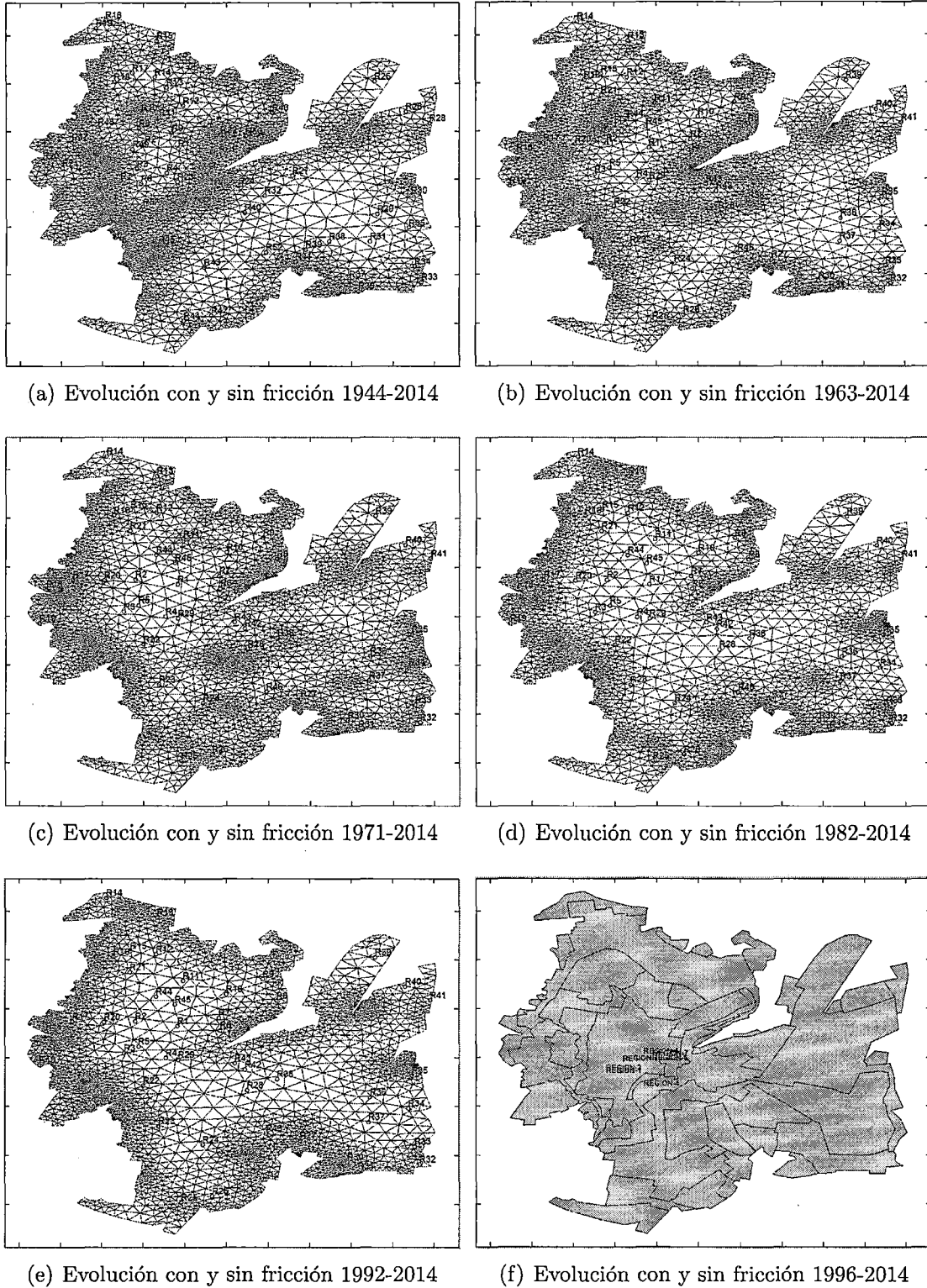


(a) Zona de viaje con superficie de fricción 1963-2014



(b) Zona de viaje con superficie de fricción 1971-2014

Figura 3.23: Discretización de superficie con FEM, para la ciudad de Ayacucho de 1963, 1971, 1982, 1992, 1996 superpuestos al dominio del año 2014 con 46 atractores de viaje.



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

RESULTADOS.

4.1. Análisis de investigación.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos, aplicando la metodología propuesta mediante la implementación computacional del Programa VERNE y el Modelo "Mobilis" desarrollado. Se mencionan los resultados de técnicas y análisis que se han empleado en estudios de transportes y usos de suelo, así como propuestas enfocadas al desarrollo de nuevas técnicas. Se interpretan los resultados a través de casos de estudios para cada uno de los métodos propuestos en esta investigación. Los datos en cuestión de análisis son para ciudades de baja densidad, siendo estos un supuesto conjunto representativo de los cuales se obtienen sus respectivas zonas de viaje, las cuales sirven para definir los patrones, acorde al programa de actividades.

4.1.1. Especificación del modelo.

La mayoría de la información geográfica para el desarrollo del modelo que es objeto de este estudio, proviene de un inventario de la infraestructura vial, de las bases gráficas georeferenciadas y manejado con SIG. Este inventario es parte de un sistema de administración de información de transporte de las ciudades del país. En este inventario los alineamientos de las calles y carreteras, están georeferenciados, es decir, basados en coordenadas geográficas.

Consideramos el problema de enrutamiento en una red estática masivamente denso. Un dominio Ω del plano (x,y) está densamente cubierto por los recorridos potenciales. Los viajes tienen que fluir de una región S de la frontera Γ de Ω a una región disjunta R de Γ .

4.1.1.1. Alcances.

En la presente sección se expone el desarrollo de una aplicación informática para la representación gráfica de superficies a partir de un conjunto de puntos de coordenadas (x,y,z) utilizando los siguientes métodos de interpolación:

1. **Polígonos de Voronoi:** Método basado en la distancia euclídea y en la presunción lógica de que los puntos cercanos a un punto muestreado se parecerán a éste.
2. **Redes de Triángulos irregulares:** La superficie real se puede aproximar a una superficie matemática discreta formada por superficies elementales planas, en este

caso triángulos, que se definen a partir de un conjunto de puntos dados.

Estos métodos están basados en dos estructuras fundamentales dentro de la Geometría Computacional como son la "*Triangulación de Delaunay*", y su estructura dual, el "*Diagrama de Voronoi*".

4.1.2. Tratamiento del modelado.

Consideramos una región de forma arbitraria con múltiples zonas centrales atractoras (ZCA), en el que la red viaria se aproxima como un continuo [45]. 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 desplazarán desde la ubicación de la demanda a las ZCA a lo largo de la ruta menos costosa en el espacio bidimensional. 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.

En la definición de la región de estudio, el enfoque de modelo continuo tiene dos ventajas: arbitrarias y sin escala. A medida que la región de estudio para el enfoque de modelado continuo se define únicamente por las localizaciones espaciales de los límites exteriores y ZCA (es decir, no se requiere ninguna forma específica), el modelo propuesto puede definir fácilmente la forma de la región de estudio basado en el ámbito de estudio (por ejemplo, una ciudad de baja densidad, un distrito, etc.). A medida que se adoptó el FEM para resolver el modelo continuo, el tamaño del problema sólo se depende de la cantidad de elementos finitos utilizados, pero no el tamaño de la zona de estudio.

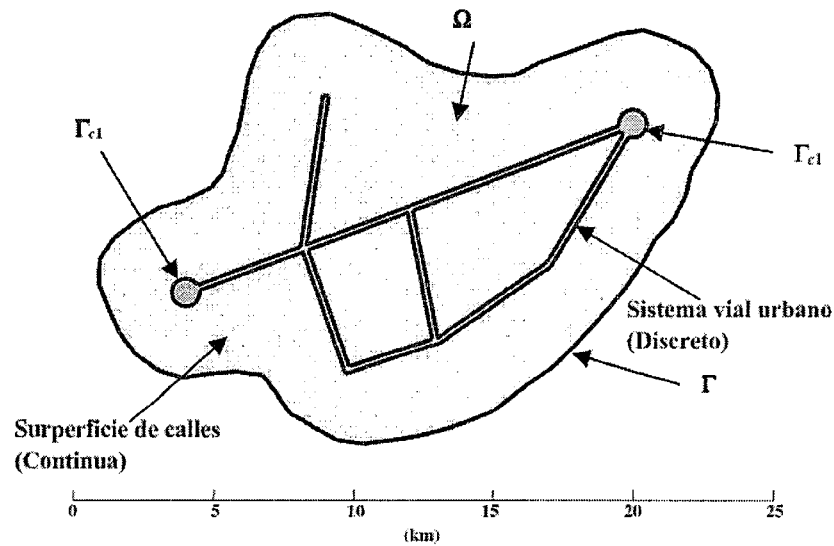
Por lo tanto, es posible tener un área de estudio más grande sin aumentar sustancialmente el tamaño del problema. Tal naturaleza libre de escala del enfoque de modelado continuo y el algoritmo correspondiente de solución permite la flexibilidad en el modelado de problemas con diferentes tamaños de ciudades.

Donde la región de estudio es Ω , y el límite exterior sea τ . La ubicación de ZCA es $L_d \ D \in D$, donde D es el conjunto de ZCA en la región de estudio. Para evitar la singularidad en las ZCA, se supone que cada uno de las ZCA es de tamaño finito y encerrado por un límite τ_{cd} . El costo de viaje por unidad de distancia (v.g. km) en la posición $(x,y) \in \Omega$ para los usuarios de clase m es denotado por $c_m(x,y)$, que es dependiente de la localización, y tiene la siguiente relación funcional con los flujos.

4.1.3. Representación del modelo.

Isoplético.- constituye una representación derivada de un mapa de puntos. Se trata de un análisis del patrón de concentración de puntos. Su objetivo es determinar los focos de incidencia o de concentración de actividades, representado bajo la forma de nube de puntos y convertirlos en una gradación de color más fuerte, cuya intensidad va disminuyendo a medida que aumenta la distancia respecto al centro - o punto en el que hay más concentración de casos. A diferencia de la densidad de puntos, este mapa establece una clara división entre zonas centrales y periféricas, concentradas y dispersas.

Figura 4.1: Ejemplo de una región de estudio.



Fuente: Elaboración propia

4.2. Enfoque de la investigación.

4.2.1. Enfoque de modelado continuo del sistema de transporte en una ciudad urbana.

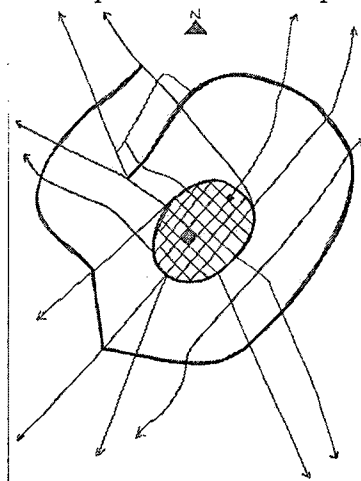
Supuestos básicos en el enfoque de modelado continuo:

- La diferencia en el patrón de uso del suelo y la configuración de red entre zonas adyacentes es relativamente pequeña, en comparación con la variación en toda la ciudad.
- Las características del uso del suelo y de la red se pueden representar mediante funciones matemáticas suaves a trozos (Vaughan, 1987).
- La interrelación entre estas funciones matemáticas se rigen por unas formas adecuadas de ecuaciones diferenciales o integrales.
- Las condiciones de equilibrio de usuario que son comúnmente adoptadas en el modelado de la red discreta se pueden generalizar al caso continuo en un plano de dos dimensiones.

Bases para el uso enfoque de modelado continuo:

- Para la fase inicial de planificación y modelado en estudios regionales a gran escala, el enfoque puede ser en la tendencia y el patrón de distribución y elección de los viajes de usuarios y sus cambios en respuesta a los cambios de política a nivel macroscópico.
- Datos insuficientes para la creación de una red densa de transporte para un análisis.

Figura 4.2: Composición urbana para el análisis.



Fuente: Elaboración propia

- Plan conceptual para las regiones de influencia de servicios competencia (Ej. aeropuertos, terminales), la ubicación de cadenas de congestión, la ubicación de un CBD adicional, la expansión estratégica del sistema de transporte en diferentes partes de la ciudad, etc
- La demanda de viajes se propaga continuamente intrínsecamente sobre la ciudad.

4.2.2. Modelo continuo para análisis de redes.

En este estudio, inicialmente el modelo está configurado para encontrar las zonas de viaje considerando las superficies de fricción en la región de estudio, para lo cual se construyen un conjunto de algoritmos que posteriormente se programarán para describir el tener adecuadas asignaciones a un problema de equilibrio tráfico. Posteriormente, el modelo trata de un problema de minimización restringida, configurado para asignación de viajes de acuerdo a los atractores y al índice de accesibilidad de la región de estudio. Se propone un algoritmo de solución basada en el FEM para resolver el modelo.

El análisis de la asignación de viajes basado en actividades para redes urbanas considerando las superficies de fricción se enfrentó a los tres temas críticos siguientes:

1. Los caminos menores no pueden ser incluidos en codificación de la red.- la omisión de los caminos de menor importancia puede dar lugar a una sobrestimación de la importancia de algunos enlaces importantes, debido a la falta de rutas alternativas.
2. Lugares de demanda se definen por centroides de zona y conectores centroeide. Debido a la representación discreta de distribución de la demanda, un enlace de red puede estar unido a una demanda en particular, y, por lo tanto, el fracaso de este enlace causará impacto a estos viajeros.
3. Enlaces insuficientes en el marco actual de modelado de redes basado en actividades.- las interrupciones catastróficas en las redes de transporte a menudo involucrados diferentes tipos de desastres naturales de área amplia (por

ejemplo, inundaciones, terremotos) que no se pueden representar con precisión la estructura de modelos de red.

4.2.3. Geometría de la Ciudad.

Un modelo teórico para explicar la manera en que evolucionan los parámetros globales que definen una ciudad (PIB, consumo de recursos para levantar infraestructuras, etc.) a medida que aumenta su número de habitantes, se puede obtener a partir de una serie de analogías sencillas tomadas de la mecánica estadística y de la física de circuitos eléctricos. *Bettencourt* [7] ha derivado un modelo que reproduce con una fidelidad los datos empíricos observados en miles de ciudades de todo el mundo, sus conclusiones ponen de relieve la existencia de un factor clave para mejorar la vida urbana: **la geometría del espacio público**.

Durante los últimos años, varios estudios han demostrado que las ciudades de mayor tamaño producen más con menos recursos. Así, una ciudad de 10 millones de hab. generará entre un 10 % y un 15 % más PIB per cápita que dos ciudades de 5 millones de hab.; sin embargo, la primera requerirá entre un 10 % y un 15 % menos de infraestructuras por habitante que las segundas. En este sentido, una urbe de gran tamaño resulta más sostenible que una ciudad pequeña. Los datos tomados de miles de ciudades en todo el mundo parecen indicar que dicho comportamiento es universal, independiente de la época y del nivel de desarrollo de un país [7]. A pesar de la aparente complejidad que revisten las interacciones entre los habitantes de una urbe, los parámetros globales de la ciudad siempre siguen sencillas leyes de potencias.

4.2.4. Geometría computacional combinatoria.

También se llama geometría algorítmica, las aplicaciones de este campo son muchas: Por ejemplo, en la robótica, estos se utilizan para resolver problemas de visibilidad y planificación de movimientos. Aplicaciones similares se emplean para diseñar la planificación de rutas. Vamos a describir los diferentes tipos de problemas, haciendo énfasis en las herramientas para resolverlos que están disponibles en el *Programa VERNE-Módulo MOBILIS* elaborado.

4.2.4.1. Problemas estáticos.

Los problemas de cálculo de cierres convexos, triangulaciones básicas y diagramas de Voronoi están íntimamente ligados [41]. Los problemas de esta categoría son:

- **Envolvente convexa:** Dado un conjunto de puntos en el espacio, encontrar el poliedro convexo más pequeño que los contienen.
- **Diagramas de Voronoi:** Dado un conjunto de puntos en el espacio (nodos), calculan una partición en regiones consistentes en todos los puntos más próximos a cada nodo.
- **Triangulaciones:** Partición del plano en triángulos, de manera que dos triángulos cualquiera son disjuntos, o que comparten un borde o vértice. Hay diferentes triangulaciones en función de los objetos de entrada, o restricciones.

- **Caminos más cortos:** Dado un conjunto de obstáculos en un espacio, y dos puntos, encontrar el camino más corto entre puntos que no se intersectan con algún obstáculos.

4.2.4.2. Envolvente convexa.

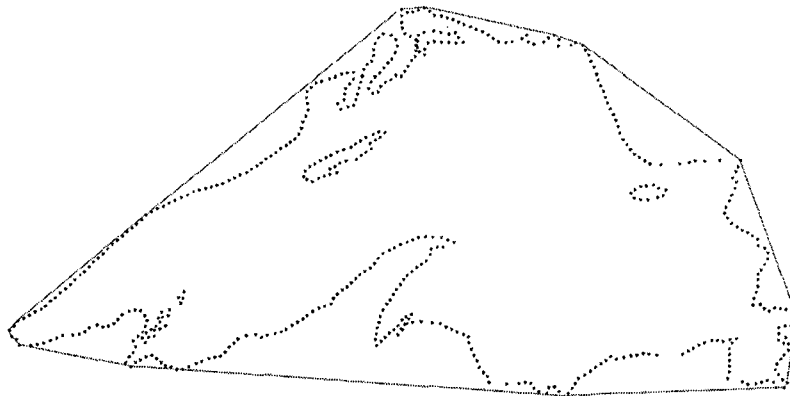
Si bien es posible calcular la envolvente convexa de un conjunto grande de puntos en el plano a través del módulo de la geometría del *Programa VERNE-Módulo MOBILIS*, siendo un código rápido y fiable está disponible a través de la rutina *ConvexHull*. Esta rutina también permite el cálculo de cierres convexos en dimensiones superiores.

```

1 % PROGRAMA VERNE: Envolvente convexa:
2 function Envolvente_Convexa_Callback(hObject, eventdata, handles)
3 global PAtractores
4 figure('Color', 'white')
5 x=PAtractores(:,1);
6 y=PAtractores(:,2);
7 Z=PAtractores;
8 n = convhull(x, y);

```

Figura 4.3: Cálculo de la envolvente convexa de un conjunto aleatorio de puntos.



Adaptado de: Jarvis, R., 1973 y Abellanas, M., 2014

4.2.4.3. Diagramas de Voronoi.

Cada celda de Voronoi se define por sus vértices y aristas que delimitan. Estos vértices son fácilmente identificables porque siempre están en la intersección de al menos dos bordes. El cálculo de un conjunto de nodos se pueden hacer con la rutina de Voronoi desde el módulo del *Programa VERNE-Módulo MOBILIS*. Los pequeños puntos son los nodos originales con coordenadas x, y . Accedemos a esos valores ya sea de la lista original de vértices, o desde los puntos.

```

1 % PROGRAMA VERNE: Diagrama de Voronoi:
2 function Diagrama_Voronoi_Callback(hObject, eventdata, handles)
3 global PAtractores
4 figure('Color', 'white')

```

```

5 x=PAtractores(:,1);
6 y=PAtractores(:,2);
7 Z=PAtractores;
8 xy=unique(Z,'rows');
9 x=xy(:,1);
10 y=xy(:,2);
11 x=x(:);
12 y=y(:);
13 dt=DelaunayTri(Z);
14 [V,C]=voronoiDiagram(dt);

```

4.2.4.4. Triangulaciones.

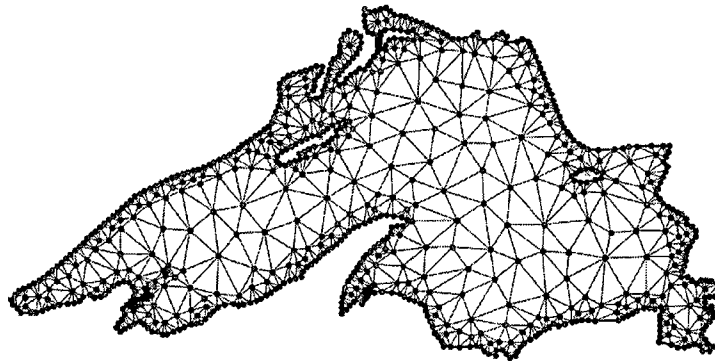
En el Programa VERNE-Módulo MOBILIS, tenemos la rutina de Delaunay, que es una envolvente a la función de generación de mallas. Dada una colección de nodos, una DT restringida es una división del espacio en triángulos con características prescritas.

```

1 % PROGRAMA VERNE: Triangulación de Delaunay:
2 function Triangulacion_Delaunay_Callback(hObject, eventdata, handles)
3 global PAtractores
4 figure('Color', 'white')
5 x=PAtractores(:,1); y=PAtractores(:,2); Z=PAtractores;
6 tr = delaunay(x,y);

```

Figura 4.4: Triangulación de Delaunay del dominio de una ciudad.



Fuente: Elaboración propia. Programa VERNE - Subprograma MOBILIS

4.2.4.5. Relación diagrama de Voronoi y triangulación de Delaunay.

Una triangulación de Delaunay posee la característica de ser el grafo dual al diagrama de Voronoi. Por lo tanto, se puede construir la triangulación de Delaunay a partir del diagrama de Voronoi si se conectan entre si los puntos que comparten un borde de una región de Voronoi. De forma inversa, se puede obtener el diagrama de Voronoi a partir de una triangulación de Delaunay calculando la mediatriz de cada arista de la triangulación, truncando cada mediatriz en el punto de intersección con otra mediatriz.

```

1 % PROGRAMA VERNE: Triangulación Dual Voronoi & Delaunay:
2 function Triangulacion_Poligonacion_Callback(hObject, eventdata, handles)

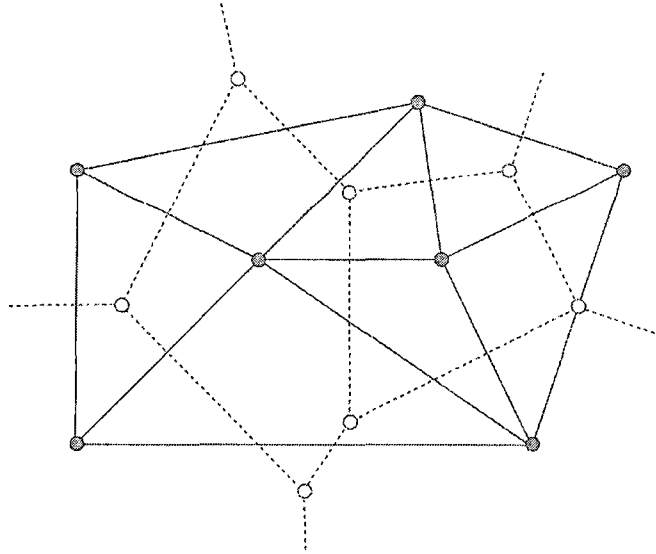
```

```

3 global PAtractores
4 figure('Color', 'white')
5 x=PAtractores(:,1); y=PAtractores(:,2); Z=PAtractores;
6 [v,c]=voronoin(Z);

```

Figura 4.5: Triangulación de Delaunay a partir del diagrama de Voronoi.



Fuente: Elaboración propia. Programa VERNE - Subprograma MOBILIS

4.2.5. Problema de rutas mínimas.

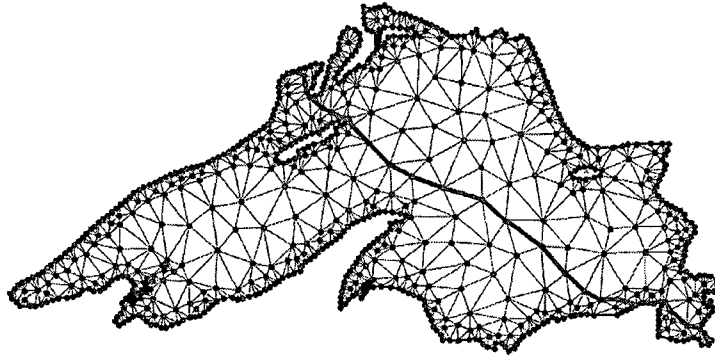
En el *Programa VERNE-Módulo REDES* logramos el cálculo de rutas más cortas en una triangulación (y en algunas otras geometrías similares que pueden codificarse por medio de gráficos) [5] [41], apoyándose en dos módulos:

- Módulo 1, para almacenar una matriz de adyacencia ponderada T que representa la triangulación. Cada entrada distinta de cero $G[i, j]$ de esta matriz de adyacencia es precisamente la longitud del borde del vértice i al vértice j .
- Módulo 2, el módulo que se ocupa de grafos dispersos comprimido. Este módulo contiene rutinas para analizar, extraer información o manipular gráficos. Entre estas rutinas, tenemos varios algoritmos diferentes para calcular rutas más cortas.

4.2.6. Modelo digital del terreno.

Tradicionalmente el relieve y la topografía del terreno se han representado a través del dibujo de las curvas de nivel. No obstante, las operaciones analíticas sobre el relieve que exigían numerosos cálculos eran sumamente laboriosas y difíciles de realizar, quedando muchas aplicaciones prácticas limitadas por la organización analógica y compleja del mapa topográfico. Estas necesidades dieron origen a MDT, que es "una estructura numérica de datos de la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua" [21].

Figura 4.6: Ajuste especial del problema de los caminos más cortos.



Fuente: Elaboración propia. Programa VERNE - Subprograma REDES

Los modelos vectoriales están basados en entidades definidas por sus coordenadas, básicamente puntos y líneas [44]. Dos serán los métodos de interpolación que utilizaremos en la aproximación de las superficies para la representación gráfica del MDT: "Polígonos de Voronoi" y la "Red de Triángulos Irregulares". Estos métodos se basan en el "Diagrama de Voronoi", o en su estructura dual, la "Triangulación de Delaunay" [5].

Las primitivas son de tres tipos: puntos, líneas y polígonos. En la presente investigación a la hora de definir las formas geométricas básicas, todas ellas se reducen en última instancia a puntos. Así, las líneas son un conjunto de puntos interconectados en un determinado orden, y los polígonos son líneas cerradas, también expresables por tanto como una serie de puntos. Todo elemento del espacio geográfico queda definido, pues, por una serie de puntos que determinan sus propiedades espaciales y una serie de valores asociados.

La capa de puntos que se utilizará en el *Programa VERNE-Módulo MOBILIS* representa un conjunto del dominio de una ciudad o zonas de una ciudad, cada una de ellas definida como un único punto y también se podrá emplear una capa de polígonos y no recoger una única coordenada (correspondiente, al centro de actividad), sino el contorno o los límites administrativos de esta. Dependiendo del caso, será más apropiado elegir una u otra alternativa. De igual modo, la capa de vías es una capa de líneas. Cada línea, como elemento teórico de ancho nulo, representa el eje de la vía.

Programa VERNE, Módulo MOBILIS.m

```

1 function Datos_Ciudad_Callback(hObject, eventdata, handles)
2 function Coordenadas_Ciudad_Callback(hObject, eventdata, handles)
3 Coordenadas;
4 function Importar_Vector_Callback(hObject, eventdata, handles)
5 VectorXY
6 function Coordenadas_Red_Callback(hObject, eventdata, handles)
7 DatosRed

```

```

1 global dat per xmin xmax ymin ymax

```

```

2 dat=get(handles.uitable1,'Data');
3 if ~isnumeric(dat);
4     DT=str2double(dat);
5 else
6     DT=dat;
7 end
8 [M NM]=size(DT);per=cell(NM,2);per(:,:)={' '};
9 xmin=Inf; xmax=-Inf; ymin=Inf; ymax=-Inf;
10 for I=1:NM
11     per(I,1)=cellstr(strcat(num2str(I)));
12     per(I,2)=cellstr(strcat('Isotropico'));
13     n=DT(1,I);mix=min(DT(2:n+1,I));miy=min(DT(n+2:2*n+1,I));
14     mx=max(DT(2:n+1,I));may=max(DT(n+2:2*n+1,I));
15     if mix<=xmin,xmin=mix;end
16     if miy<=ymin,ymin=miy;end
17     if mx>=xmax,xmax=mx;end
18     if may>=ymax,ymax=may;end
19 end
20 r1=xmax-xmin;r2=ymax-ymin;i=0.05;
21 if r1<=r2
22     r=r1;
23 else
24     r=r2;
25 end
26 xmin=xmin-i*r;xmax=xmax+i*r;ymin=ymin-i*r;ymax=ymax+i*r;
27 close(Coordenadas);

```

Programa VERNE, Módulo MOBILIS.m, Fichero *Coordenadas.m*

```

1 % Importa datos de ciudad (dominios/subdominios) en formato de texto
2 function Importar_ClickedCallback(hObject, eventdata, handles)
3 global XY NM dat mt XYO CBH CBF KXY p e t
4 [name,address] = uigetfile('*.txt;', 'Importar coordenadas');
5 if name==0
6     return
7 end
8 DATOS=load(strcat(address,name));
9 [M NM]=size(DATOS);PL=2*ones(1,NM);
10 XY=[PL;DATOS];[dat,mt]=numeric(XY);
11 set(handles.uitable1,'columnname',mt);
12 set(handles.uitable1,'Data',dat);
13 XYO=XY;CBH=[];CBF=[];KXY=[];p=[];t=[];e=[];
14 function [dat,mt]=numeric(XY)
15 [M NM]=size(XY);mt=cell(1,NM);mt(:,:)={' '};
16 dat=[];
17 for I=1:NM
18     mt(I)=cellstr(strcat('REGION-',num2str(I)));
19     if I==1
20         dat=[cellstr(strcat(num2str(XY(2:M,I))))];
21     else
22         dat=[dat, cellstr(strcat(num2str(XY(2:M,I))))];
23     end
24 end

```

Programa VERNE, Módulo MOBILIS.m, Fichero *VectorXY.m*

```

1 % Importa datos de ciudad (dominios/subdominios) en formato de hoja excel

```

```

2 function Importar_ClickedCallback(hObject, eventdata, handles)
3 global XY NM dat mt XYO CBH CBF KXY p e t
4 [name,address] = uigetfile('*.xlsx;', 'Importar','File Selector', 'on' );
5 [a,b]=size(name);
6 for i=1:b
7     if isequal(name(i),0)
8         return
9     end
10 end
11 name=(strcat(name));
12     if isstr(name)
13         b=1;
14     end
15 for i=1:b
16     if isstr(name)
17         NA=strcat(name);
18     else
19         NA=strcat(name(i));
20     end
21     zC=char(strcat(address,NA));
22     CC=xlsread(zC);
23     [aC,bC]=size(CC);
24     AC=[aC;CC(:,1);CC(:,2)];
25     Rango=strcat(char(64+i),'1');
26     X=xlswrite('data.xlsx',AC,1,Rango);
27 end
28 DATOS=xlsread('data.xlsx');
29 delete('data.xlsx')
30 [M NM]=size(DATOS);PL=2*ones(1,NM);
31 XY=[PL;DATOS];[dat,mt]=numeric(XY);
32 set(handles.uitable1,'columnname',mt);
33 set(handles.uitable1,'Data',dat);
34 XYO=XY;CBH=[];CBF=[];KXY=[];p=[];t=[];e=[];

```

Programa VERNE, Módulo MOBILIS.m, Fichero *DatosRed.m*

```

1 function Importar_ClickedCallback(hObject, eventdata, handles)
2 % Importa datos de coordenadas de la red vial de la base de datos
3 global xyl NMRed datRed mtRed XYV
4 [name,address] = uigetfile('*.xlsx;', 'Importar','File Selector', 'on' );
5 [a,b]=size(name);
6 for i=1:b
7     if isequal(name(i),0)
8         return
9     end
10 end
11 name=(strcat(name));
12     if isstr(name)
13         b=1;
14     end
15 for i=1:b
16     if isstr(name)
17         NA=strcat(name);
18     else
19         NA=strcat(name(i));
20     end
21     zC=char(strcat(address,NA));
22     CC=xlsread(zC);

```

```

23     [aC,bC]=size(CC);
24     AC=[aC;CC(:,1);CC(:,2)];
25     Rango=strcat(char(64+i),'1');
26     X=xlswrite('data.xlsx',AC,1,Rango);
27 end
28 DATOS=xlsread('data.xlsx');
29 delete('data.xlsx')
30 [M NMRed]=size(DATOS);PL=2*ones(1,NMRed);
31 XYV=[PL;DATOS];[datRed,mtRed]=numeric(XYV);
32 set(handles.TablaRed,'columnname',mtRed);
33 set(handles.TablaRed,'Data',datRed);
34 xyl=DATOS;

```

4.2.6.1. Modelo de almacenamiento.

El Programa VERNE-Módulo MOBILIS utilizará modelos para representaciones vectoriales para los modelo topológicos como el modelo arco-nodo, o los detallados para el caso particular de las redes. Existen dos enfoques principales para los *índices espaciales*: continuos y discretos [35]. Los continuos utilizan las coordenadas mismas de las entidades, simplificando la forma de estas; mientras que en los discretos la simplificación se aplica al espacio, discretizando este. En el caso continuo, se sustituye toda la complejidad del polígono por puntos. En el caso discreto, se reduce el polígono a unas cuantas celdas de una malla. Realizar comprobaciones sobre estas estructuras resulta mucho más sencillo, y por ello se emplean para realizar aproximaciones.¹

Programa VERNE, Módulo MOBILIS.m

```

1 function Ver_Vias_Callback(hObject, eventdata, handles)
2 global xyl n
3 set(handles.axes1,'NextPlot','add');
4 [a,b]=size(xyl);
5 for i=1:b
6     c=xyl(1,i);
7     x=0;
8     y=0;
9     for j=1:c
10         x(j)=xyl(j+1,i);
11         y(j)=xyl(c+j+1,i);
12     end
13     plot(x,y,'LineWidth',2,'Color',rand(1,3));
14     text(x(1),y(1),strcat('RUTA-',int2str(i)),'color','k','FontSize',8,...
15         'FontWeight','bold','HorizontalAlignment','Left',...
16         'VerticalAlignment','Top');
17 end

```

```

1 function Ver_Regiones_ClickedCallback(hObject, eventdata, handles)
2 global XY NM per
3 set(handles.axes1,'NextPlot','replace');
4 if isempty(NM) | NM<0
5     errordlg('Ingrese las coordenadas del dominio','ERROR')
6     return

```

¹Este proceso, conocido como filtrado y refinamiento.

```

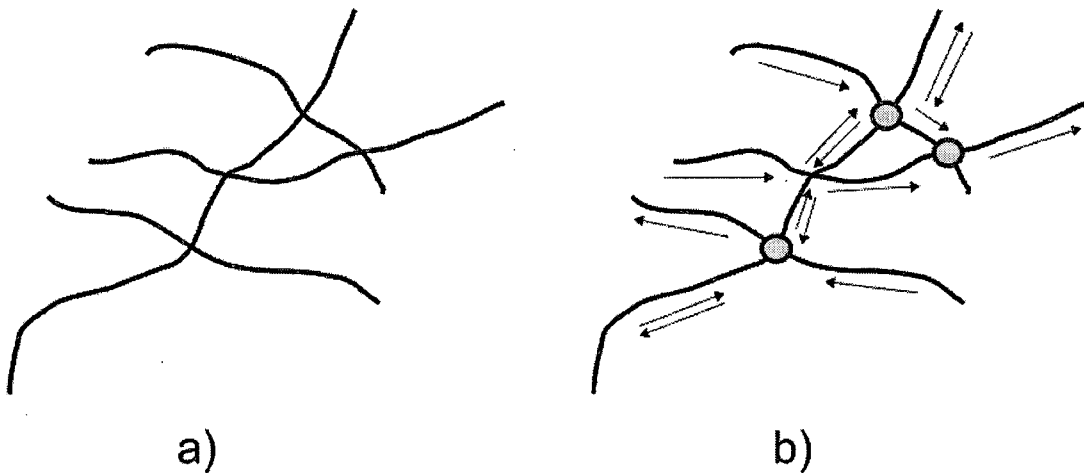
7 else
8     set(handles.TablaFriccion,'Data',per);
9 end
10 cla;hold on;
11 for I=1:NM
12     cl=cL(I,:);
13     NC=XY(2,I);
14     X=XY(3:NC+2,I);
15     Y=XY(NC+3:2*NC+2,I);
16     mapshow(X,Y,'DisplayType','polygon','FaceColor',cl,'LineStyle','none');
17 end
18 col='k';graf1(col);graf2();
19 colorbar('off');
20 ejes();

```

4.2.7. Topología.

Es un elemento particular del modelo de representación vectorial. En términos matemáticos la topología estudia las características de los objetos geométricos que no varían al aplicar una transformación topológica. Si tomamos un mapa y lo distorsionamos, los ángulos, las superficies y las distancias se ven afectadas. Sin embargo, otras propiedades tales como la adyacencia entre elementos o las relaciones entre estos se conservan. Se dice que una capa de información tiene topología si en ella se almacenan de algún modo las relaciones entre los distintos elementos que la componen [35].

Figura 4.7: Capa de vías de comunicación sin topología (a) o con ella (b).



Adaptado de: Olaya, V., 2011

Programa VERNE, Módulo MOBILIS.m

```

1 function Puntos_Atractores_Callback(hObject, eventdata, handles)
2 global PAtractores xi yi
3 set(handles.axes1,'NextPlot','Add')
4 xy = [];
5 n = 0;
6 but = 1;
7 while but == 1

```

```

8      [xi,yi,but] = ginput(1);
9      plot(handles.axes1,xi,yi,'ko');
10     n = n+1;
11     xy(:,n) = [xi;yi];
12 end
13 PAtractores=xy';
14 % -----
15 function Nube_Puntos_Callback(hObject, eventdata, handles)
16 global PAtractores
17 figure('Color', 'white')
18 x=PAtractores(:,1);
19 y=PAtractores(:,2);
20 Z=PAtractores;

```

4.2.8. TIN.

Un TIN [40] es una red formada por un conjunto de triángulos interconectados, cada uno de los cuales representa a una zona de características homogéneas en lo que a la variable estudiada respecta. Cada triángulo tienen unas propiedades constantes, como corresponde al modelo vectorial. En particular, se considera habitualmente que todos los puntos dentro de un mismo triángulo constituyen un plano, con una pendiente y una orientación fija. La topología del modelo permite llevar a cabo análisis diversos sobre un TIN, ya que para cada triángulo se tiene conocimiento de cuáles son los adyacentes a este, y es en el análisis de dichos adyacentes en el que se basan gran parte de los algoritmos.

El número de triángulos varía según las características propias de la zona. En lugares con gran variación (áreas más abruptas), se utiliza un gran número de triángulos. Cuando, los valores no varían de forma notable (zonas de relieve más llano), pueden emplearse menos triángulos.

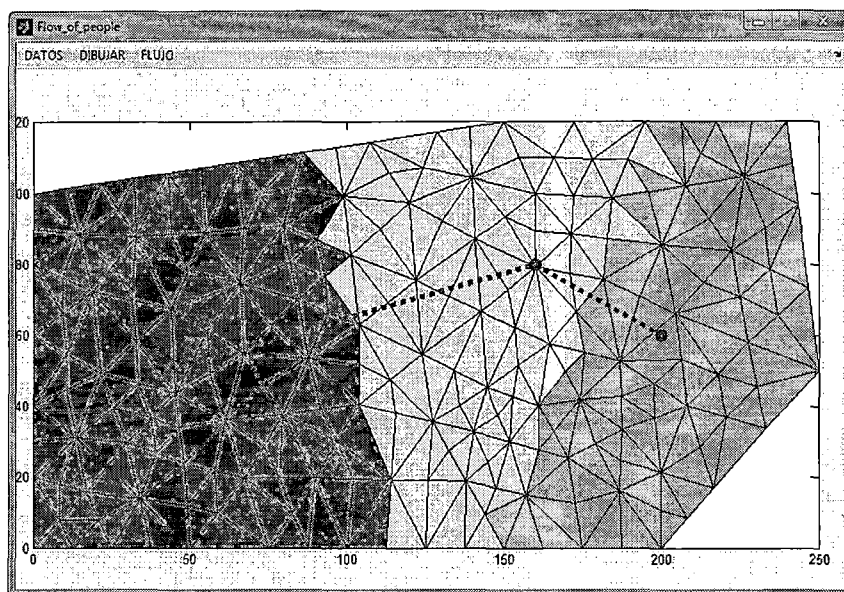
Programa VERNE, Módulo MOBILIS.m

```

1 function GMalla_ClickedCallback(hObject, eventdata, handles)
2 global XY sf ns dl p e t pp tt PAtractores
3 if isempty(XY)
4     error('Ingresar las coordenadas del dominio','ERROR');
5     return;
6 end
7 dsgsg();
8 hold on
9 dl=decsg(XY,sf,ns);
10     [p,e,t]=initmesh(dl);
11 set(handles.axes1,'NextPlot','replace');
12 pdemesh(p,e,t);
13 set(handles.axes1,'NextPlot','add');
14 col='r';graf1(col);
15 ejes();
16 pp=p'; % PUNTOS Y TRIÁNGULOS
17 tt=t';
18 set(handles.axes1,'NextPlot','Add') % PUNTOS ATRACTORES
19 plot(handles.axes1,PAtractores(:,1)', PAtractores(:,2)', 'ko');

```

Figura 4.8: Discretización del Programa VERNE en dominio y sub dominios con FEM.



Fuente: Elaboración propia.

4.2.9. Métodos de interpolación de superficies.

La representación de una superficie con un MDT suele necesitar una fase de interpolación espacial, que es un procedimiento que permite calcular el valor de una variable en una posición del espacio (punto no muestral, donde se estima un valor de la variable), a partir de los valores conocidos de esa variable en otras posiciones del espacio (puntos muestrales iniciales, con valores conocidos) y que definirá la estructura de representación del MDT. Desde el punto de vista de la superficie los métodos utilizados para su interpolación se pueden clasificar en: los que asumen que una *superficie es discreta* y los que asumen una *superficie continua* [11].

Programa VERNE, Módulo MOBILIS.m, Módulo VERNE-PAT

```

1 function mnuDividir_Callback(hObject, eventdata, handles)
2 global dl p e t pp tt Paradero
3 % p: puntos-coordenadas, e: propiedades de región, t: nudo de triángulos
4 [p,e,t]=initmesh(dl); % División
5 set(handles.axes1,'NextPlot','Replace') % Configurar Gráfico
6 pdemesh(p,e,t); % Dibujar Mesh - Divisiones
7 pp=p'; % Puntos
8 tt=t'; % Triángulos
9 set(handles.axes1,'NextPlot','Add') % Configurar Gráfico
10 plot(handles.axes1, Paradero(:,1), Paradero(:,2),'bo:','LineWidth',4);
11 end

```

```

1 function mnuFlujo_Callback(hObject, eventdata, handles)
2 global Paradero
3 [CorCentro D] = CoordenadaCentro(); % CorCentro
4 Dmenor=DistMenor(D); % Dmenor
5 Colorear(Dmenor)

```

```

6 plot(handles.axes1, Paradero(:,1), Paradero(:,2), 'bo:', 'LineWidth', 4);
7 end

```

```

1 function [CorCentrol D1] = CoordenadaCentro()
2 % Función para obtener centro de c/triángulo y las distancias a c/paradero
3 global tt pp Paradero
4 [m,n]=size(tt);
5 CorCentrol=[0,0];
6 for j=1:m % Coordenada de nudos
7     p1=pp(tt(j,1) ,:); p2=pp(tt(j,2) ,:); p3=pp(tt(j,3) ,:);
8     cental=(p1+p2+p3)/3; % Coordenada central
9     CorCentrol=[CorCentrol; cental]; % Concatena
10 end
11 CorCentrol=CorCentrol(2:m+1,:); % Coordenada centro de cada triángulo
12 % DISTANCIAS
13 [m1,n1]=size(Paradero); % Cantidad de paraderos
14 D1=zeros(m,n1); % Distancias a cada paradero
15 for j=1:m1
16     pa=Paradero(j,:); % Paradero actual
17     for i=1:m
18         pca=CorCentrol(i,:); % Punto central de cada elemento
19         diferencia=pa-pca;
20         D1(i,j)=norm(diferencia);
21     end
22 end
23 end

```

```

1 function Dmenor1=DistMenor(D)
2 % Función que encuentra la menor distancias de cada triángulo a un paradero
3 % D: distancias de todos los triángulos a todos los paraderos
4 [m,n]=size(D);
5 Dmenor1=zeros(m,1);
6 for j=1:m
7     d_i=D(j,:); % Obtener distancias del elementos j a los paraderos
8     ordebar=sort(d_i);
9     menor=ordebar(1); % Encuentra paradero a menor distancia del triángulo j
10    for i=1:n
11        a=d_i(i);
12        if a==menor
13            Dmenor1(j,1)=i;
14        end
15    end
16 end
17 end

```

4.2.10. Resultados del cálculo de rutas óptimas.

En esta propuesta metodológica utilizaremos como variables natural el relieve o pendiente, que es la única indispensable, como demuestran algunos autores en sus trabajos la orografía que indican que es el factor más importante para el cálculo de las rutas óptimas de un territorio basando su análisis prácticamente en esta variable [6] [20]. Para la variable del relieve es necesario la construcción de un MDE. Este se realiza a partir de las curvas de nivel, transformando éstas en una

mallas donde cada una contendrá la información de la irregularidad del terreno (altura).

En el Programa VERNE-Módulo MOBILIS se utiliza TIN como capa vectorial que representa la topografía mediante una serie de caras de triángulos conectadas por una triangulación de Delaunay de puntos de observación (cotas) irregularmente distribuidos [?]. De esta manera, la pendiente será un factor esencial a la hora de examinar las posibilidades de desplazamiento sobre un terreno. Existirán 2 criterios de clasificación:

1. **Isotrópico** donde se mantiene un valor continuo independientemente de su dirección, por tanto se considera que el esfuerzo aplicado en el ascenso de una pendiente es de forma constante.
2. **Anisotrópico**, relacionando la energía consumida con el grado de pendiente, donde se considera que el gasto energético varía según el grado de pendiente, por tanto de forma irregular y no constante.

4.2.10.1. Fricción, accesibilidad y distancia.

Una vez obtenidos los mapas de costos para cada uno de los factores utilizados (relieve, usos de suelo) se compone con ellos el mapa general de fricción. Para ello se multiplican las variables, obteniendo un nuevo coeficiente que es el total de fricción del terreno a estudio. De este modo, se obtiene un mapa de rugosidades, en el que se representa la mayor o menor dificultad para el desplazamiento. En este caso, la rugosidad la podemos considerar como un sinónimo de la fricción. Asimismo, si conocemos para una zona dada el valor de esta fricción en cada punto será sencillo hallar cualquier índice derivado de ella, como líneas de isócronas a partir de un punto o distancia en tiempo entre dos determinados puntos.

La mayoría de aplicaciones poseen un comportamiento isotrópico o no direccional. Sin embargo, existen fenómenos como los basados en ecuaciones de difusión, que no pueden ser considerados procesos direccionalmente uniformes. En estos casos, no es posible la utilización de las técnicas y herramientas que no consideran el aspecto direccional del problema. Un módulo de cálculo de costo anisotrópico puede ser usado para modelar los efectos de fricciones anisotrópicas asociados al desplazamiento a través de una superficie. En los estudios de costo no solamente influye el costo generado por el movimiento, debemos tener también en cuenta las fuerzas y fricciones que impiden o facilitan dicho desplazamiento. Se puede representar las fuerzas y las fricciones anisotrópicas a través de un vector, para modelar el **costo anisotrópico**, se requieren la magnitud y dirección de fuerzas y fricciones. Por ejemplo:

*Supongamos que se quiere calcular el costo consumido al andar a una velocidad normal. Si traducimos el costo a tiempo, la pendiente será un parámetro que influirá de manera directa en su consumo. Y aún más, podemos afirmar que la pendiente afectará de diferente manera dependiendo de la dirección. Ya que si subimos, la fricción producida será mayor que si nos movemos perpendicularmente a la pendiente; y en el caso de descender la pendiente actuará como una fuerza que reduce el costo. Por lo que podemos afirmar que existen fricciones anisotrópicas, es decir, elementos de fricción que producen efectos diferentes en direcciones diferentes. Observamos que hay una conexión directa entre la pendiente y la fuerza de fricción, denominada **fricción***

efectiva (stated friction). Esta función cumple lo siguiente: "La fricción efectiva toma el valor 1 en el punto de máxima pendiente". De manera que si nos movemos en la dirección opuesta a la máxima fricción, la fricción podría descender progresivamente hasta alcanzar el valor de 90° .

Figura 4.9: Fricción Isotrópica

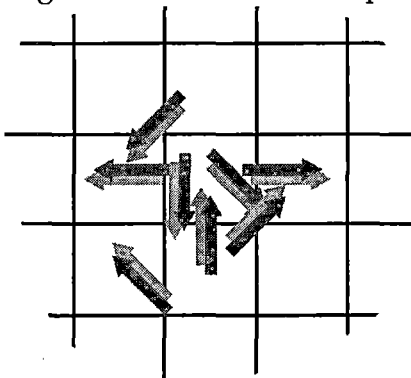
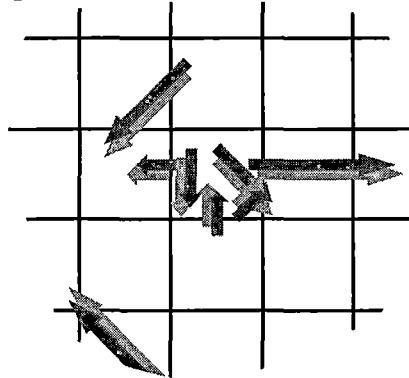


Figura 4.10: Fricción Anisotrópica



Plataforma VERNE, Programa MOBILIS.m, MduloFriccion.m

```

1 function Tipo_Region_Callback(hObject, eventdata, handles)
2 Regiones;
3 function dsqsg()
4 global per NM sf ns
5 for J=1:NM
6     eq=isequal(char(per(J,2)), 'Isotropico');
7     if J==1
8         fm=cellstr(strcat('P', num2str(J)));
9         ns=double(strcat('P', num2str(J)))';
10    else
11        if eq==1
12            fm=cellstr(strcat(fm, '+P', num2str(J)));
13        else
14            fm=cellstr(strcat(fm, '-P', num2str(J)));
15        end
16        ns=[ns, double(strcat('P', num2str(J)))'];
17    end
18 end
19 sf=char(fm);

```

```

1 function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
2 global KXY
3 KXY=get(handles.uitable1, 'Data');
4 if ~isnumeric(KXY);
5     KXY=str2double(KXY);
6 end
7 close(Friccion);

```

```

1 function uipushtool2_ClickedCallback(hObject, eventdata, handles)
2 global KXY

```

```

3 [name,address] = uigetfile('*.txt;', 'Propiedades');
4 if name==0
5     return
6 end
7 KXY=load(strcat(address,name));
8 set(handles.uitable1,'Data',KXY);

```

4.3. Métrica del espacio.

Desde un punto de vista matemático, se han definido diversos tipos de espacio. En primer lugar puede distinguirse entre espacios métricos y no métricos. Los primeros son aquellos en los que puede establecerse una medida de distancia a partir de la que pueden deducirse diversas propiedades métricas (área, perímetro, forma, etc.), pudiendo utilizarse diversas definiciones de distancia:

1. **Distancia Euclídea**, responde al concepto tradicional de distancia como hipotenusa de un triángulo rectángulo. Es la más utilizada para resolver problemas geoespaciales:

$$d_{i,j} = \sqrt{\sum_{k=1}^N (x_{k,i} - x_{k,j})^2}$$

2. **Distancia de Manhattan**, corresponde, siguiendo con el símil del triángulo rectángulo, a la suma de los catetos. Resulta útil en aplicaciones muy concretas como por ejemplo en estudios de ciudades: $d_{i,j} = \sum_{k=1}^N |x_{k,i} - x_{k,j}|$

3. **Distancia como distancia máxima**, corresponde a la longitud del cateto más largo.

$$d_{i,j} = \max_{k=1}^N (x_{k,i} - x_{k,j})$$

El espacio geográfico, es decir el que procede de una aproximación empírica al mundo real, es un espacio euclídeo de 3 dimensiones, aunque su representación suele ser una proyección bidimensional.

4.3.1. Distancia Manhattan (Métrica City block).

Definida por *Herman Minkowski* en el siglo XIX, esta distancia descrita ampliamente en [10], [5] permite calcular la geometría *Taxicab* siendo una forma en la que la función de distancia usual o métrica de geometría euclidiana se sustituye por un nuevo indicador en el que la distancia entre dos puntos es la suma de las diferencias absolutas de su coordenadas. La métrica también se conoce como distancia de la ciudad de bloques o *distancia Manhattan*.

La distancia d_1 entre dos vectores p, q en un espacio vectorial fijo real de n dimensiones, con sistema de coordenadas cartesianas, es la suma de las longitudes de las proyecciones del segmento de línea entre los puntos en los ejes de coordenadas. Se define [38]:

$$d_1(p, q) = \|p - q\|_1 = \sum_{i=1}^n |p_i - q_i| \quad (4.3.1)$$

Donde los vectores p, q están expresados como:

$$p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$$

$$q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$$

Considerando lo anterior, en un plano 2D, la distancia Manhattan entre (p_1, p_2) y (q_1, q_2) es:

$$D = |p_1 - q_1| + |p_2 - q_2| \quad (4.3.2)$$

4.3.1.1. Algoritmo de cálculo.

A continuación se describen los pasos que se deben seguir para calcular esta distancia:

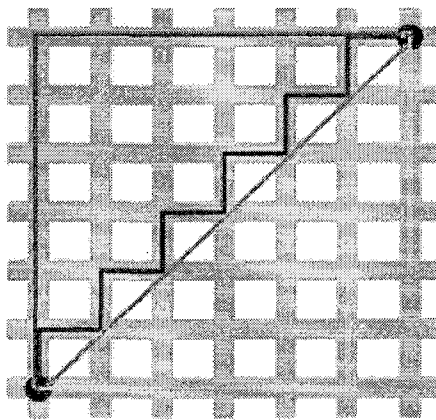
1. Se ingresan dos vectores con el mismo número de k componentes.
2. Se recorren los dos vectores simultáneamente, en su *esima* componente.
3. Se resta la *esima* componente del vector 2 a la *esima* componente del vector 1, obteniendo como resultado final el valor absoluto de la diferencia.
4. Se acarrea esta diferencia para sumarle a la diferencia de las demás componentes hasta que $i = k$.

Originalmente, se empleó la distancia Manhattan para resolver el problema relacionado con el cálculo de distancias en espacios metropolitanos, en el que cotidianamente existen obstáculos, a diferencia de la distancia Euclidiana, para obtener resultados más prácticos ya que considera los movimientos en una retícula.

Los GIS actuales disponen de enormes bases de datos con todo un conjunto de lugares previamente geo-localizados o geo-codificados. De este modo, el usuario puede preguntar al sistema dónde (coordenadas latitud y longitud) se encuentra una determinada dirección o población. A esta función de búsqueda en la base de datos de una dirección y devolución de coordenadas se le conoce con el nombre de *geo-coding*. A partir de la geo-localización y gracias a la geometría euclidiana (Euclides 300 a.C) se puede calcular la distancia entre un par de puntos (distancia euclidiana). La ecuación para el cálculo de la distancia entre dos puntos $P = (p_x, p_y)$ y $Q = (q_x, q_y)$ situados en un plano deducida a partir del Teorema de Pitágoras es:

$$d(P, Q) = \|P - Q\| = \sqrt{(p_x - q_x)^2 + (p_y - q_y)^2} \quad (4.3.3)$$

Figura 4.11: Comparativo: distancia Manhattan(azul) vs. distancia Euclidiana(verde).



4.4. Evaluación de resultados.

La mayoría de las ciudades en los países en desarrollo, muestra una clasificación funcional de los usos del suelo que varía de acuerdo con la distancia del centro de la ciudad (distrito central de negocios) o CBD. En el centro, donde los precios del suelo son mucho mayores, encontramos edificios principalmente para oficinas y algunas instalaciones de comercio (algunas ciudades aún tienen un núcleo CBD tradicional dentro del CBD moderno). La densidad de viviendas

es baja debido a los altos precios. Las áreas de ciudad interior que rodean el CBD muestran una mezcla de actividades de comercio y de vivienda. En las áreas urbanas exteriores, las áreas de viviendas, se mezclan con concentraciones alrededor de los subcentros. El desarrollo de vivienda adicional se concentra cerca de los límites exteriores de la ciudad.

4.4.1. Programación matemática del algoritmo "MiM" - MOBILIS para la creación de zonas de viaje en ciudades.

En este trabajo se propone un modelo de equilibrio de tráfico basado en el análisis continuo de las regiones donde se generan los viajes. El modelo se resuelve mediante algoritmo de solución basada en FEM para la discretización del dominio y la determinación de las zonas de viaje, de acuerdo a la dinámica de los puntos atractores basados en actividades y a la influencia de las superficies de fricción, con lo cual luego se procede a estimar el volumen de viajes y a través de la programación matemática obtener la solución del TAP.

Programa VERNE - Módulo MOBILIS.m, *MOBILIS: ProcesoyPostproceso*

```

1 function Zonas_Viaje_Callback(hObject, eventdata, handles)
2 global PAtractores %px
3 % px=ubicacion(PAtractores);
4 % px=get(handles.TablaAtractores,'Data')
5 [CorCentro D] = CoordinadaCentro();
6 Dmenor=DistMenor(D);
7 Apai = ColorearPAWER(Dmenor);
8 set(handles.axes1,'NextPlot','Add')
9 plot(handles.axes1,PAtractores(:,1)', PAtractores(:,2)','ko');
10 % muestra en la tabla - show in table
11 MuestraEnTabla(Apai,handles);
12
13 function checkDemanda_Callback(hObject, eventdata, handles)
14 global PAtractores
15 [CorCentro D] = CoordinadaCentro();
16 Dmenor=DistMenor(D);
17 Travel = CalcularTRAVEL(Dmenor);
18 MuestraDemanda(Travel,handles);
19 Demanda

```

```

1 function aa=ubicacion(zz)
2 global pp tt
3 [m1,n1]=size(zz); % cantidad de puntos atractores
4 [m,n]=size(pp);
5 CorCentrol=[0,0];
6 for j=1:m
7     % coordenada de nudos
8     p1=pp(tt(j,1),:);
9     p2=pp(tt(j,2),:);
10    p3=pp(tt(j,3),:);
11    % coordenada central
12    cental=(p1+p2+p3)/3;
13    % concatena
14    CorCentrol=[CorCentrol; cental];
15 end
16 CorCentrol=CorCentrol(2:m+1,:); % coordenada centro de cada triángulo

```

```

17 for j=1:m1
18     pa=zz(j,:); % paradero actual
19     for i=1:m
20         pca=CorCentrol(i,:);
21         diferencia=pa-pca;
22         da(i,j)=norm(diferencia);
23     end
24 end
25 for i=1:m1
26     w=da(:,i)
27     [s d]=min(w)
28     aa(i)=(tt(d,4))
29 end

```

```

1 function [CorCentrol D1] = CoordenadaCentro()
2 % Funcion para obtener la coordenada del centro de cada triángulo
3 % y las distancias de cada triángulo a cada punto atractor
4 % D1: distancias de todos los triángulos a todos los puntos atractores,
5 % #elementos(de triángulos) x # paraderos -- orden
6 global tt pp PAtractores KXY D1
7 %tt--> n1 n2 n3 r
8 %pp--> x y
9 %-----
10 [m,n]=size(tt);
11 CorCentrol=[0,0];
12 for j=1:m
13     % coordenada de nudos
14     p1=pp(tt(j,1),:);
15     p2=pp(tt(j,2),:);
16     p3=pp(tt(j,3),:);
17     % coordenada central
18     cental=(p1+p2+p3)/3;
19     % concatena
20     CorCentrol=[CorCentrol; cental];
21 end
22 CorCentrol=CorCentrol(2:m+1,:); % coordenada centro de cada triángulo
23 % DISTANCIAS
24 [m1,n1]=size(PAtractores); % cantidad de puntos atractores
25 D1=zeros(m,n1); %distancias a cada punto atractor
26 b=ubicacion(PAtractores);
27 for j=1:m1
28     pa=PAtractores(j,:); % paradero actual
29     kx=KXY(b(j),1);
30     for i=1:m
31         pca=CorCentrol(i,:); %punto central de cada elemento
32         diferencia=pa-pca;
33         D1(i,j)=norm(diferencia)*kx;
34     end
35 end

```

```

1 function Dmenor1=DistMenor(D)
2 % Función que encuentra la menor distancias de cada triángulo a un paradero
3 % D: distancias de todos los triángulos a todos los paraderos,
4 % #elementos(de triángulos) x # paraderos -- orden
5 % Dmenor1: es el número del punto atractor a la menor distancia para cada

```

```

6 % triángulo, ORDEN: #TRIÁNGULOS * 1
7 [m,n]=size(D);
8 Dmenor1=zeros(m,1);
9 for j=1:m
10     d_i=D(j,:); % obtener distancias del elementos j a los puntos atractores
11     ordebar=sort(d_i);
12     menor=ordebar(1);
13     % indicador=(menor==ordebar);
14     % encuentra el punto atractor a menor distancia para el triángulo j
15     for i=1:n
16         a=d_i(i);
17         if a==menor
18             Dmenor1(j,1)=i;
19         end
20     end
21 end

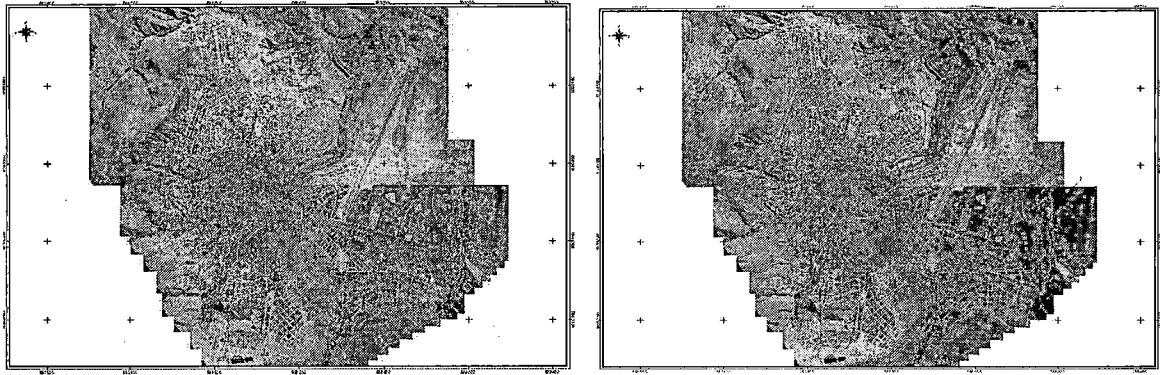
```

```

1 function MuestraDemanda(Travel,handles)
2 global Dem
3 [m n]=size(Travel);
4 Dem = cell(m,2);
5 for i = 1:m
6     Dem{i,1}= horzcat('V',num2str(i));
7     Dem{i,2}= Travel(i);
8 end
9
10 function Travel = CalcularTRAVEL(Dmenor)
11 global pp tt PAtractores
12 [m,n]=size(tt);
13 [k,n]=size(PAtractores);
14 Travel= zeros(k,1);
15 for i=1:k
16     As=0;
17     for j=1:m
18         if Dmenor(j,1)==i
19             p1=pp(tt(j,1) ,:);
20             p2=pp(tt(j,2) ,:);
21             p3=pp(tt(j,3) ,:);
22             cXY=[p1;p2;p3];
23             X=cXY(:,1);
24             Y=cXY(:,2);
25             Sdet=[p1 1;p2 1;p3 1];
26             Ai= abs(det(Sdet)/2);
27             As= As + Ai;
28         end
29     end
30     Travel(i)=As*1/1000;
31     pa = PAtractores(i,:);
32     text(pa(1),pa(2), horzcat('V',num2str(i)), 'color','green',...
33         'HorizontalAlig','right','VerticalAlig','top','fontsize', 12 );
34 end

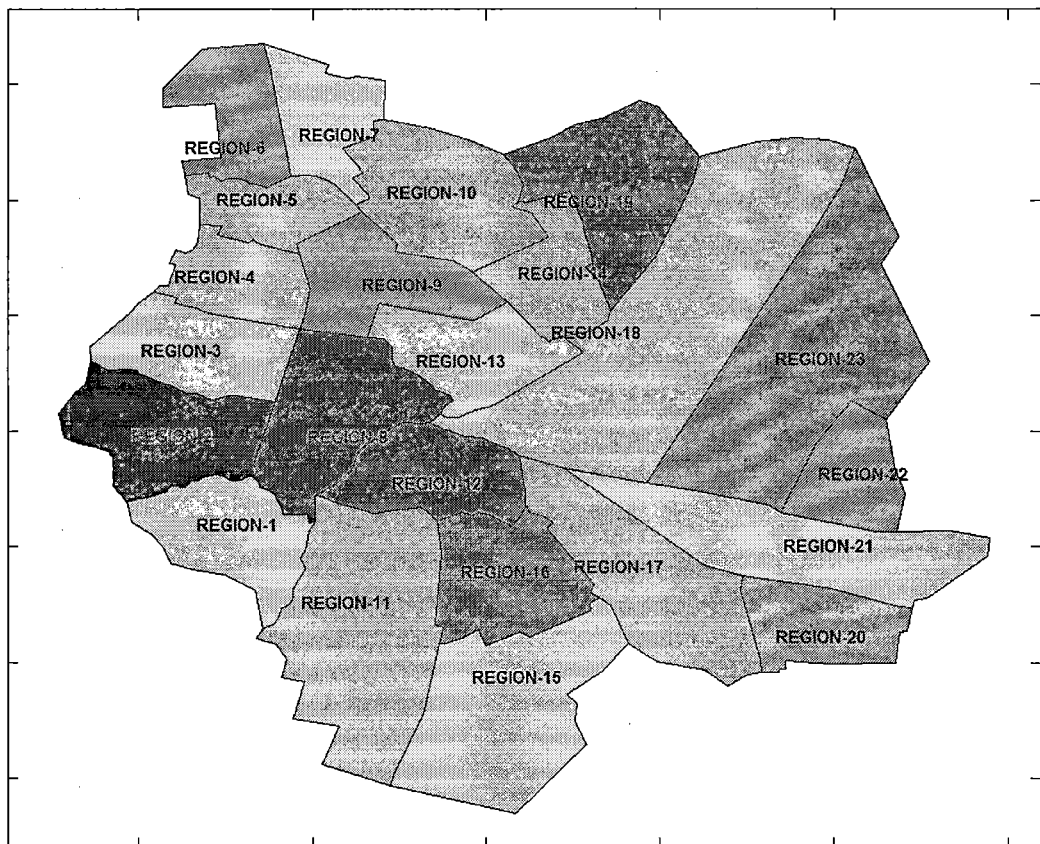
```

Figura 4.12: Mapa del dominio de Ayacucho al año 2014 con 23 subzonas de división con el algoritmo "MiM" - MOBILIS.



(a) Niveles de modelo región

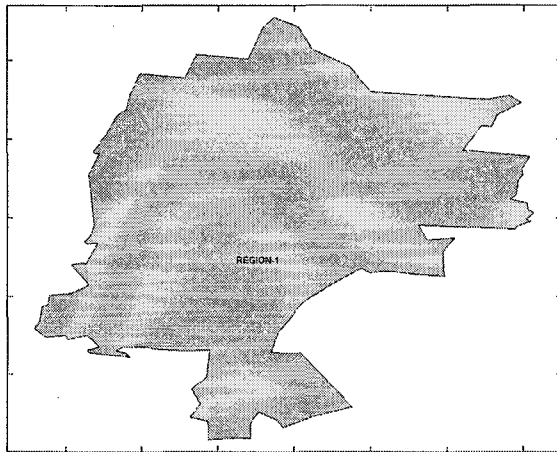
(b) Superposición suelo-redes



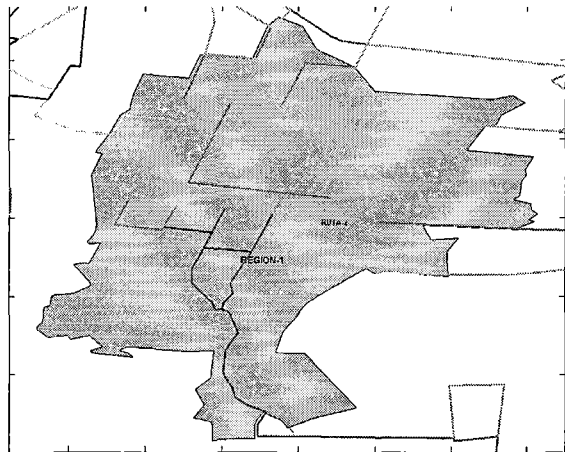
(c) Dominio y subdominios de la ciudad

Fuente: Elaboración propia

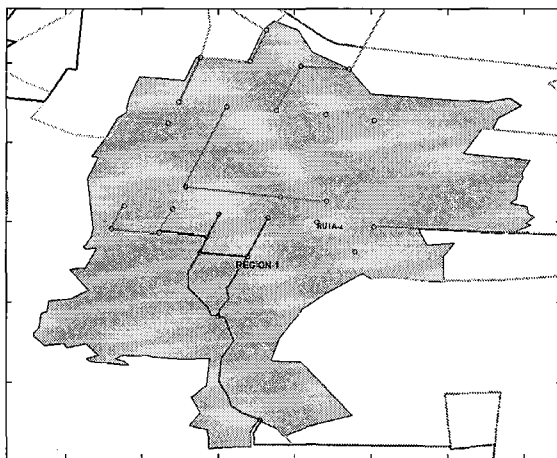
Figura 4.13: Caso de estudio: Resultados Ciudad de Ayacucho 1944.



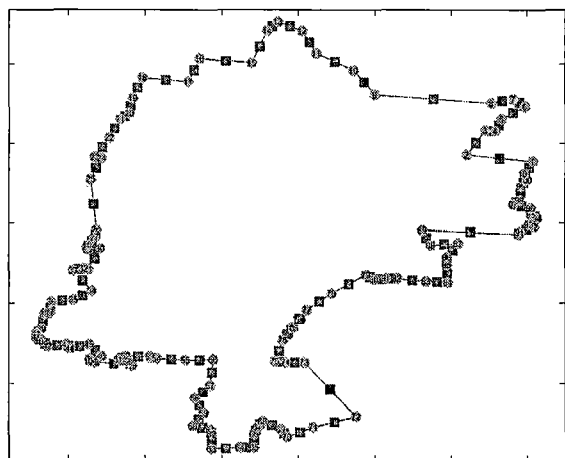
(a) Importación de dominio



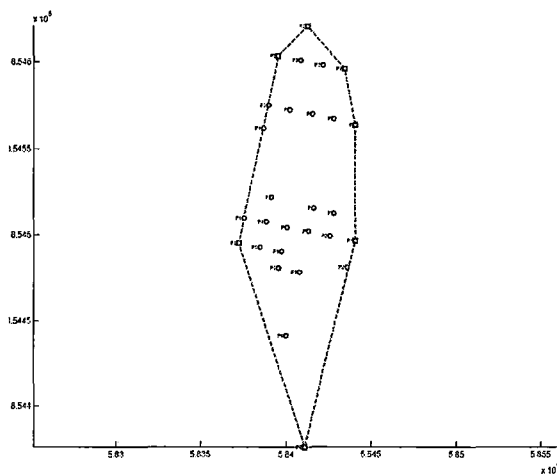
(b) Importación de redes



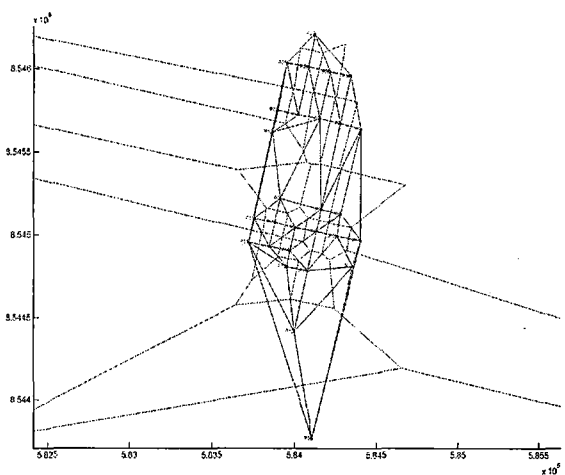
(c) Puntos atractores



(d) Contorno de la ciudad



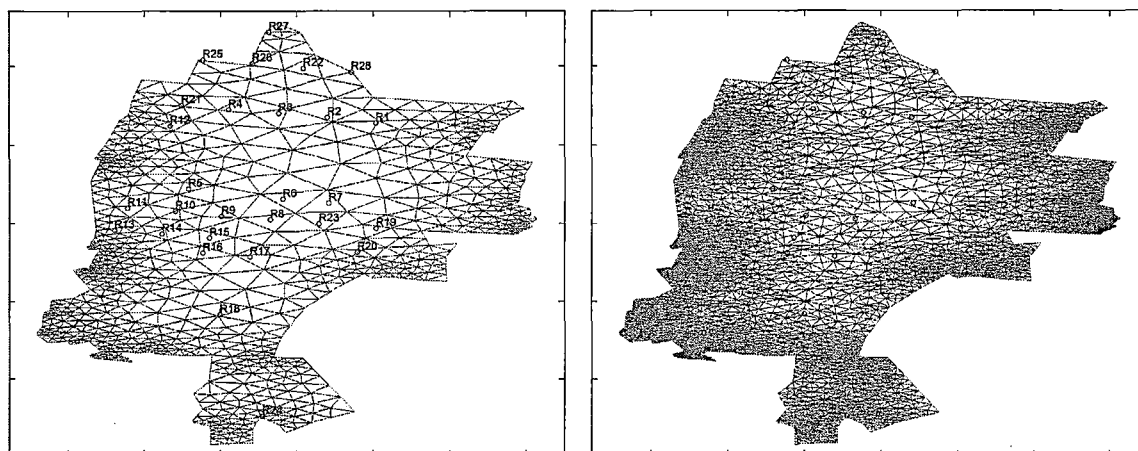
(e) Envolverte convexa



(f) T. Delaunay-D. Voronoi

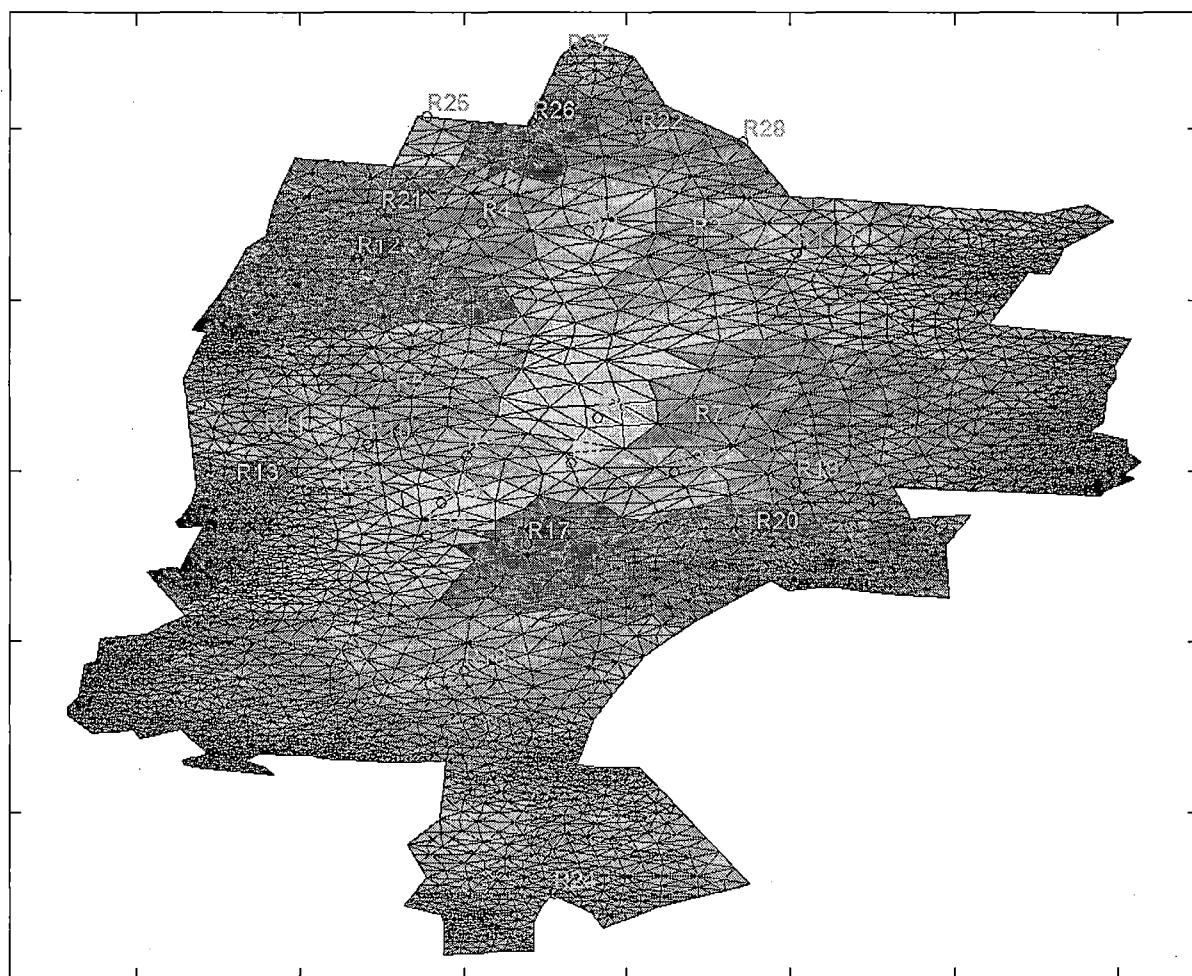
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.14: Resultados con MOBILIS: Ciudad de Ayacucho 1944.



(a) Discretización FEM

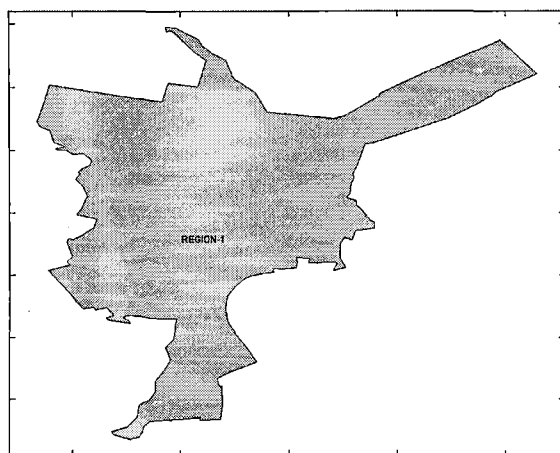
(b) Refinamiento FEM.



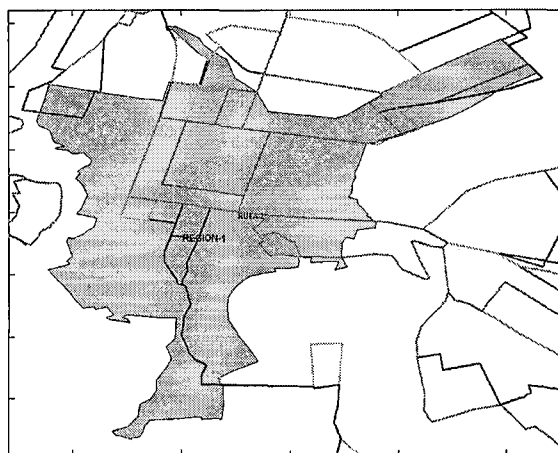
(c) Resultado de zonas de viaje.

Fuente: Elaboración propia

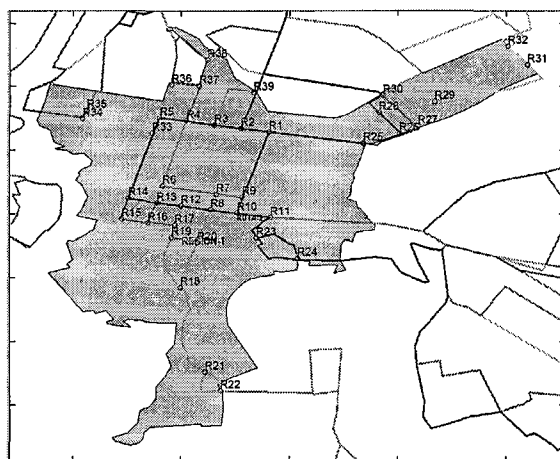
Figura 4.15: Caso de estudio: Resultados Ciudad de Ayacucho 1963.



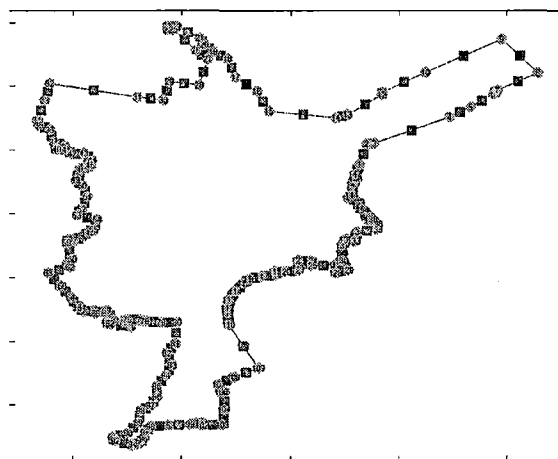
(a) Importación de dominio



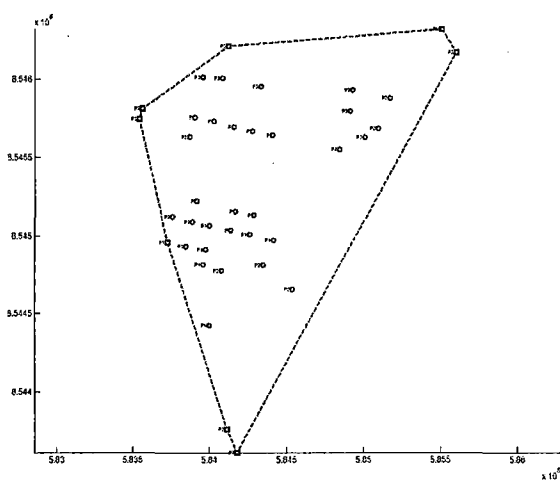
(b) Importación de redes



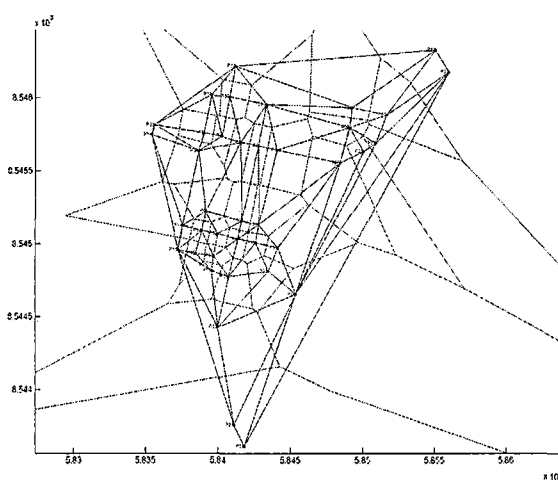
(c) Puntos atractores



(d) Contorno de la ciudad



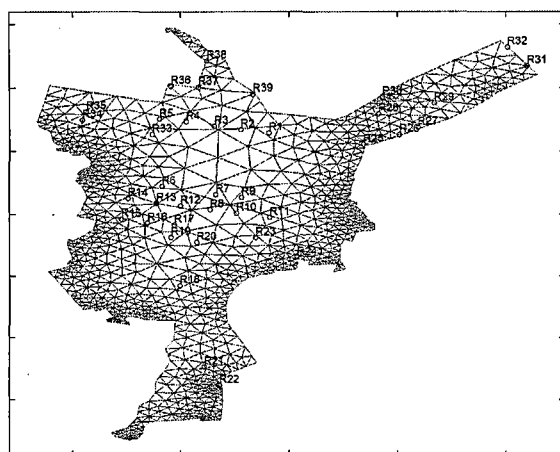
(e) Envolverte convexa



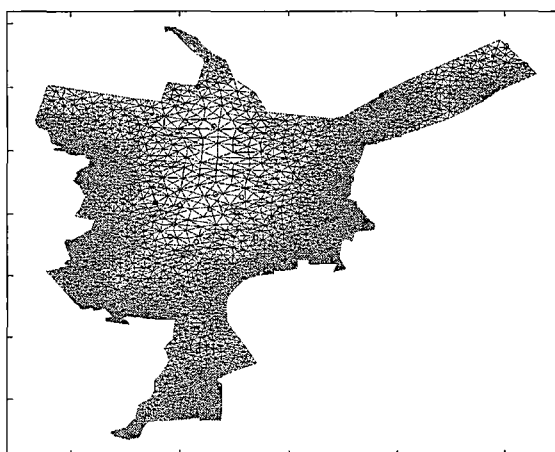
(f) T. Delaunay-D. Voronoi

Fuente: Elaboración propia

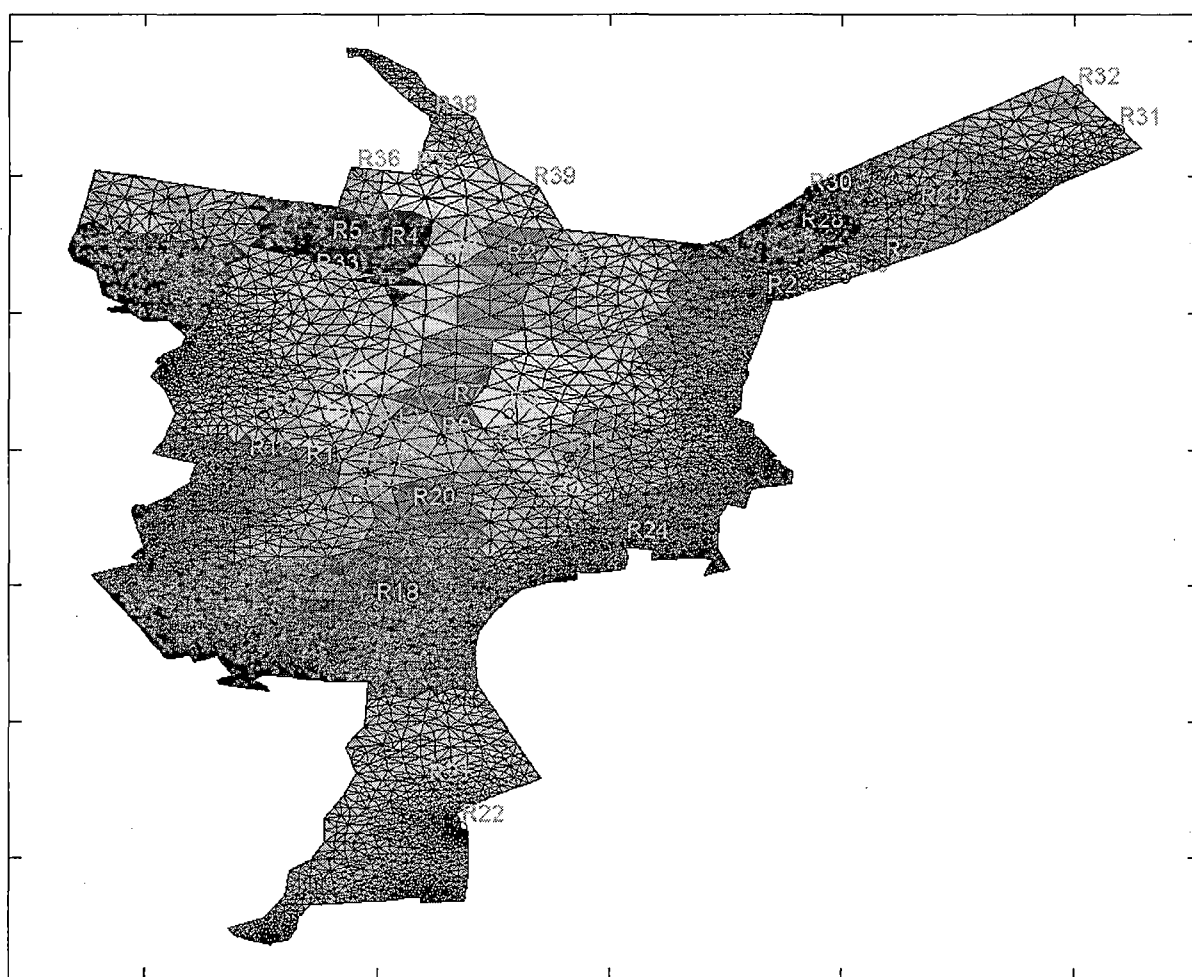
Figura 4.16: Resultados con MOBILIS: Ciudad de Ayacucho 1963.



(a) Discretización FEM



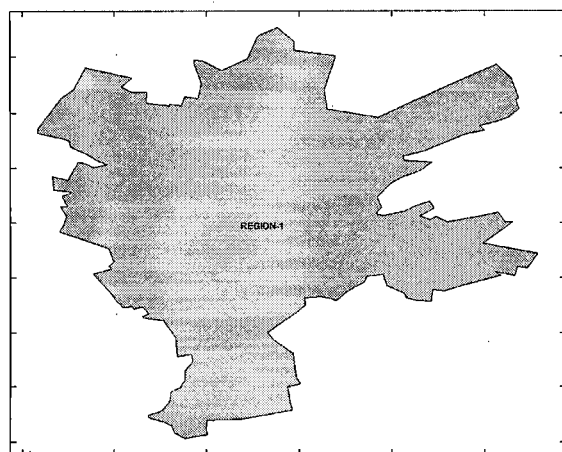
(b) Refinamiento FEM.



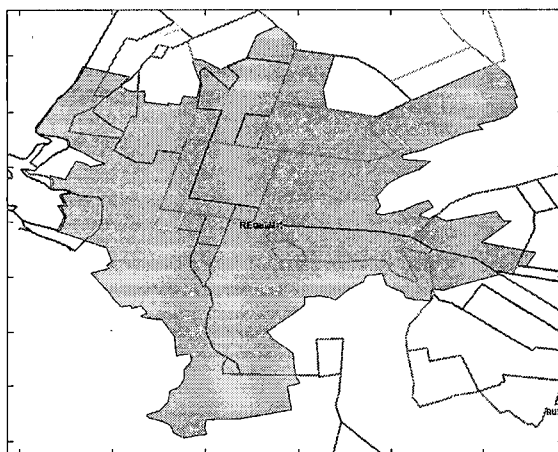
(c) Resultado de zonas de viaje.

Fuente: Elaboración propia

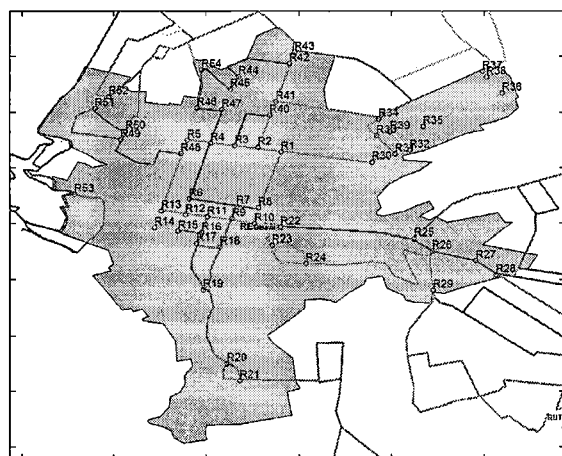
Figura 4.17: Caso de estudio: Resultados Ciudad de Ayacucho 1971.



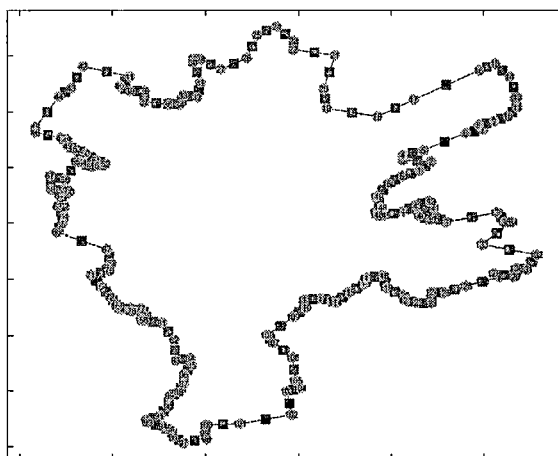
(a) Importación de dominio



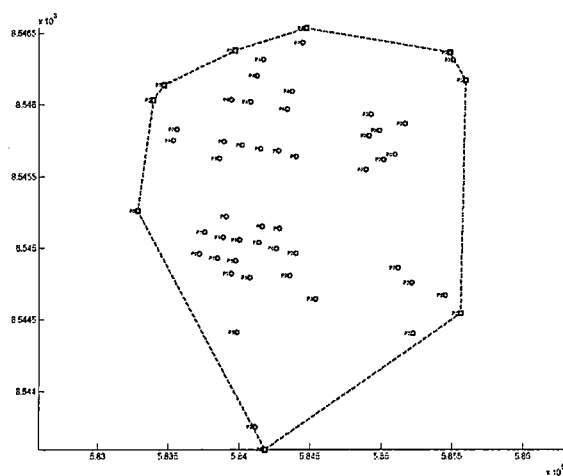
(b) Importación de redes



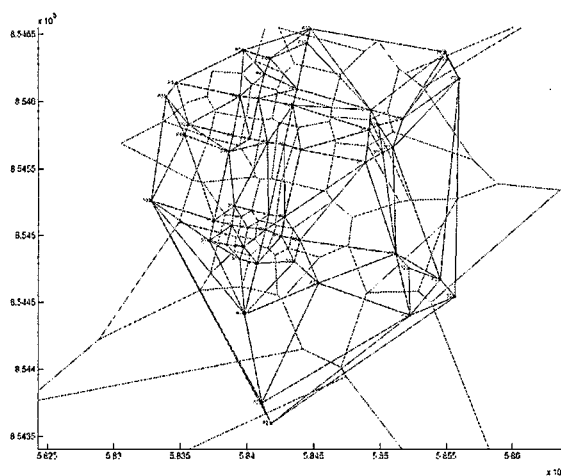
(c) Puntos atractores



(d) Contorno de la ciudad



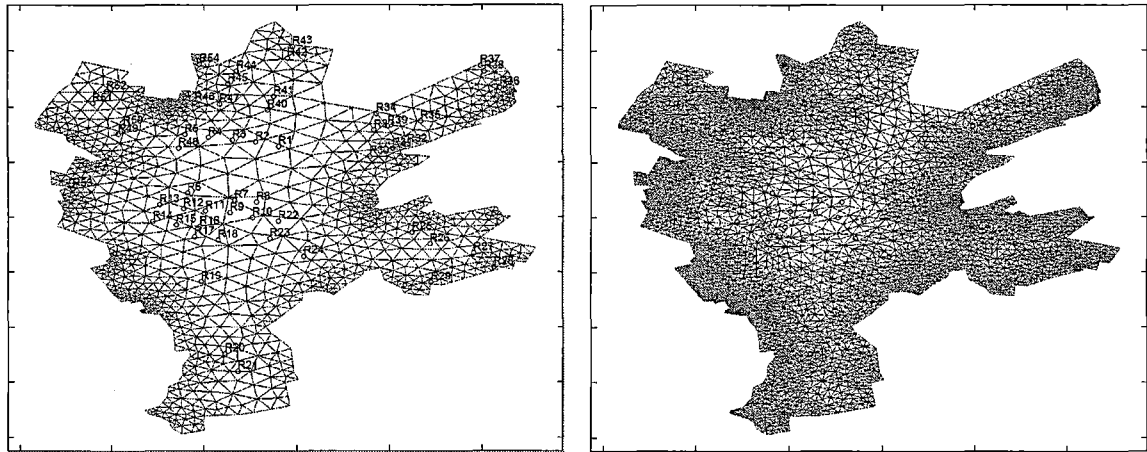
(e) Envolverte convexa



(f) T.Delaunay-D.Voronoi

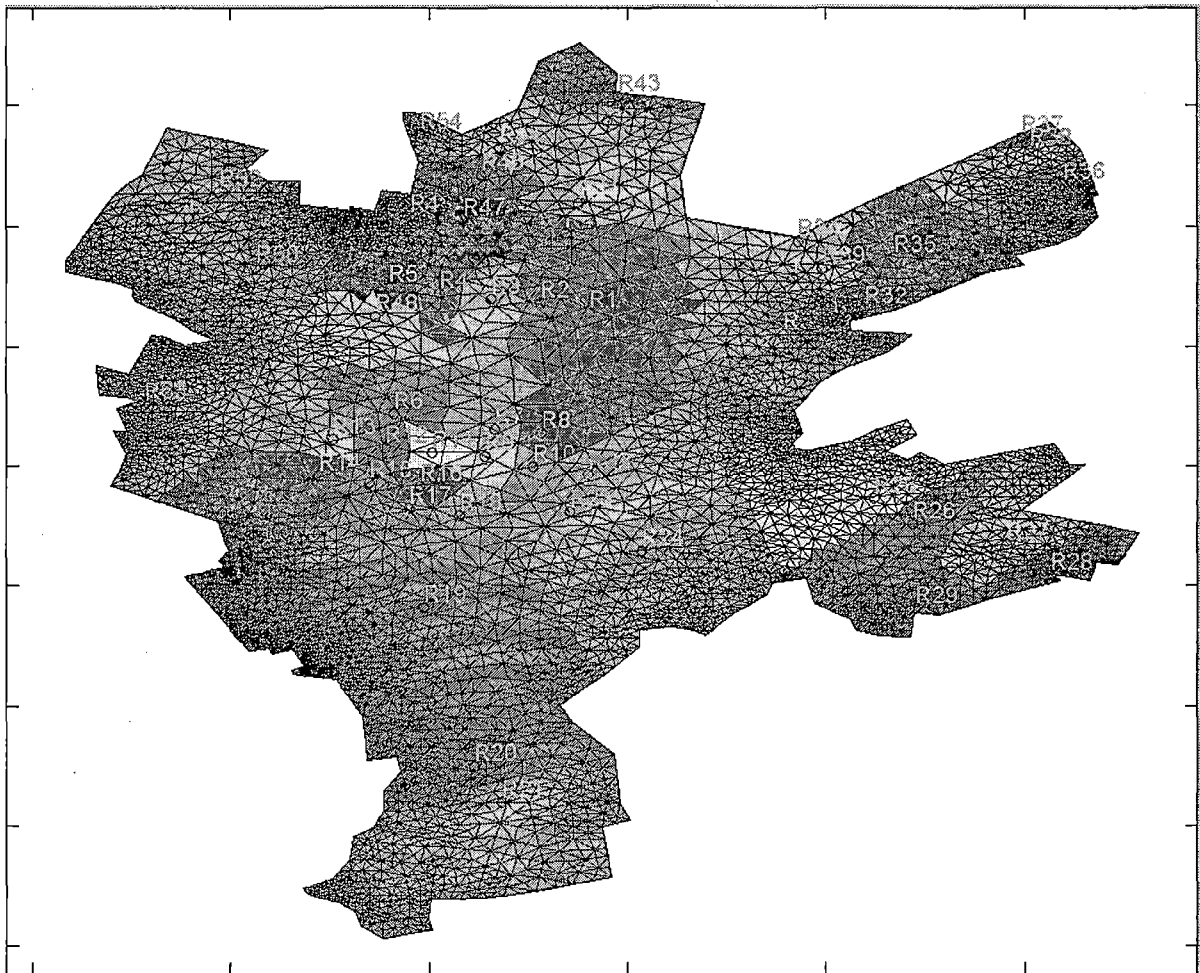
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.18: Resultados con MOBILIS: Ciudad de Ayacucho 1971.



(a) Discretización FEM

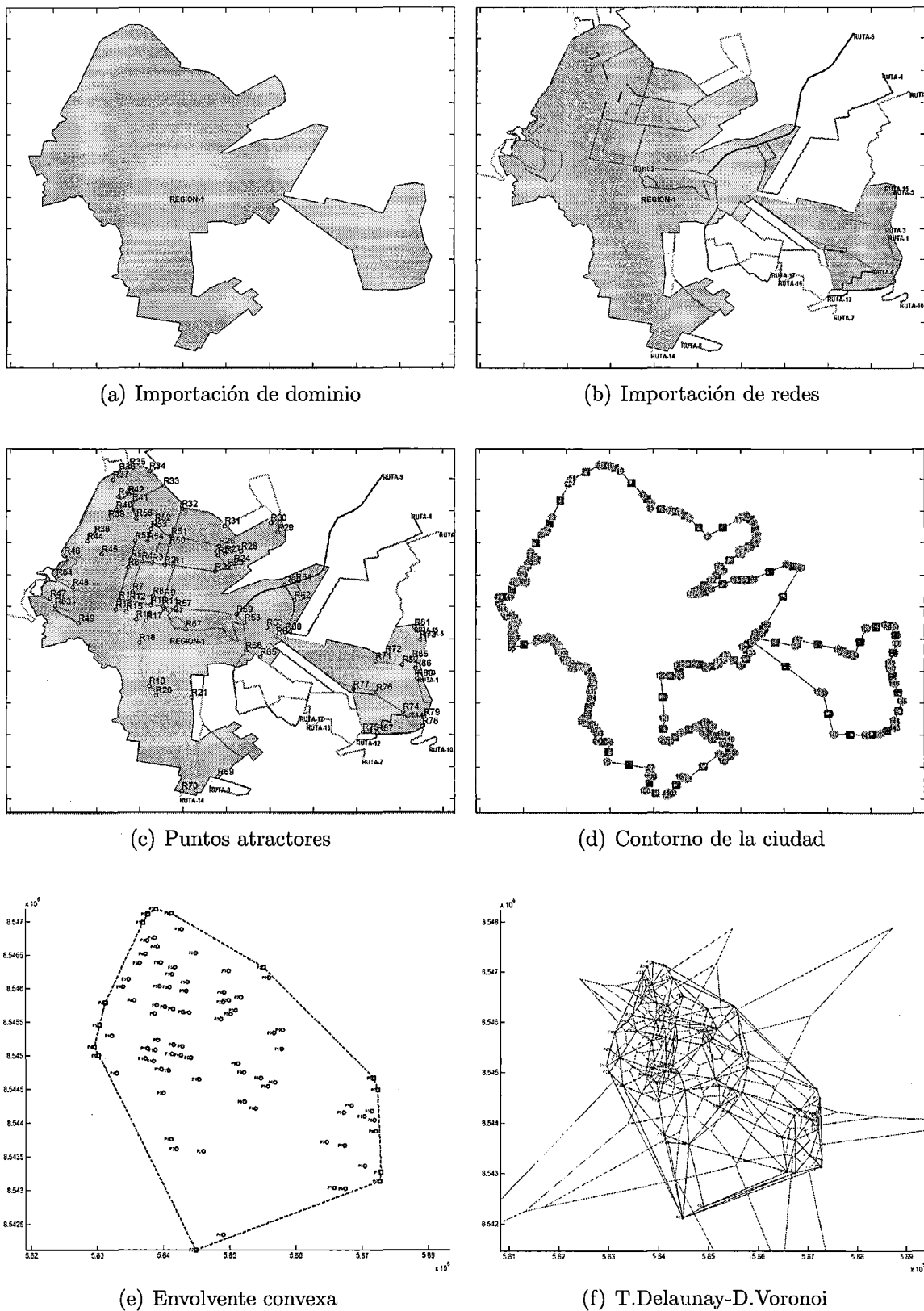
(b) Refinamiento FEM.



(c) Resultado de zonas de viaje.

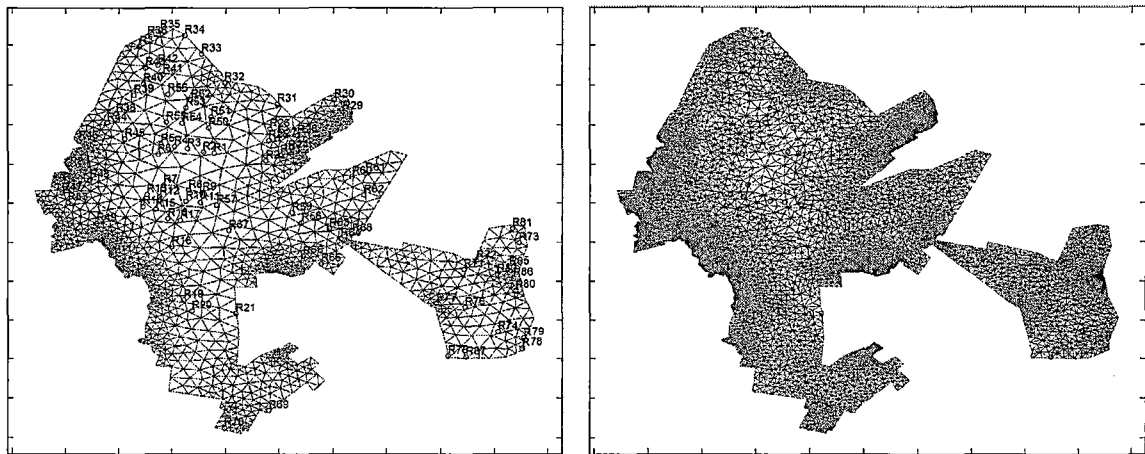
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.19: Caso de estudio: Resultados Ciudad de Ayacucho 1982.



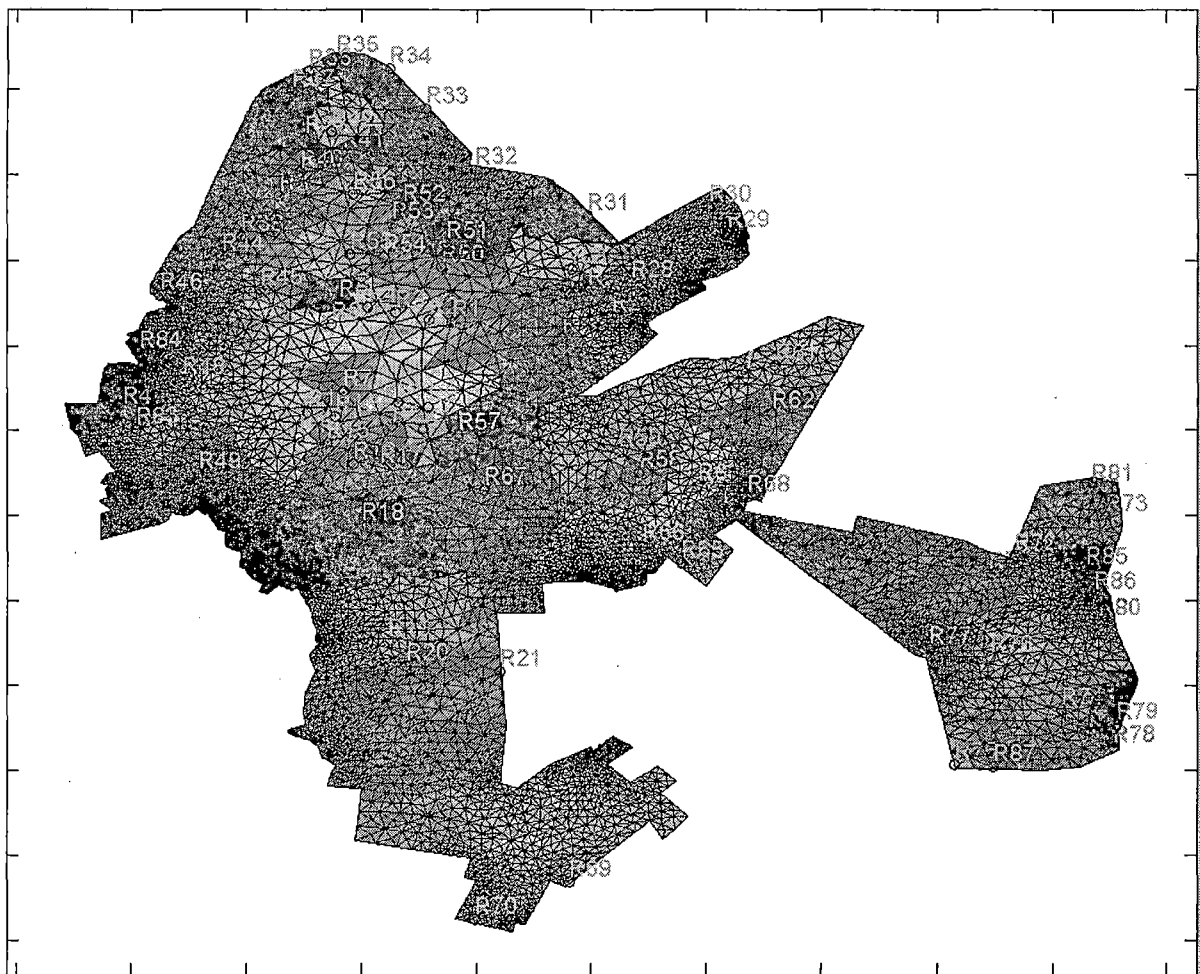
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.20: Resultados con MOBILIS: Ciudad de Ayacucho 1982.



(a) Discretización FEM

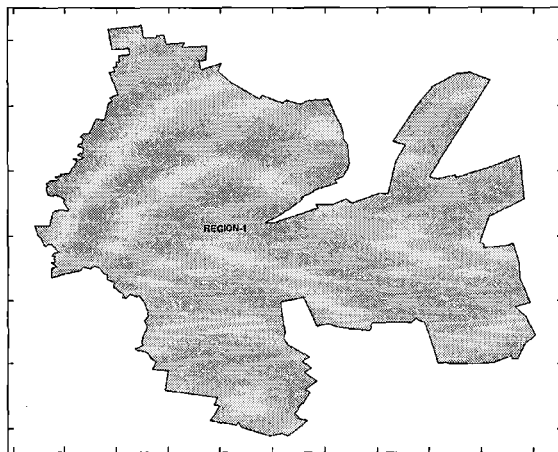
(b) Refinamiento FEM.



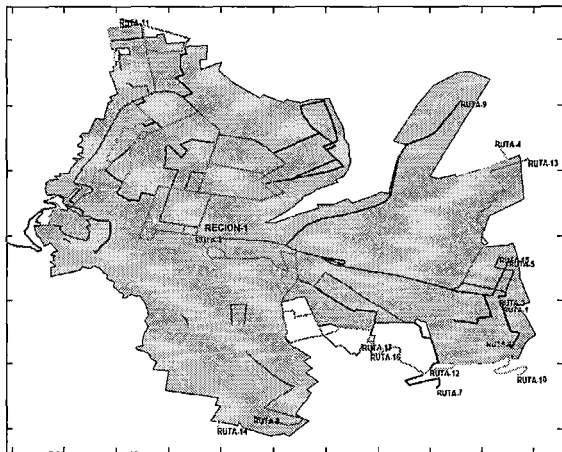
(c) Resultado de zonas de viaje.

Fuente: Elaboración propia

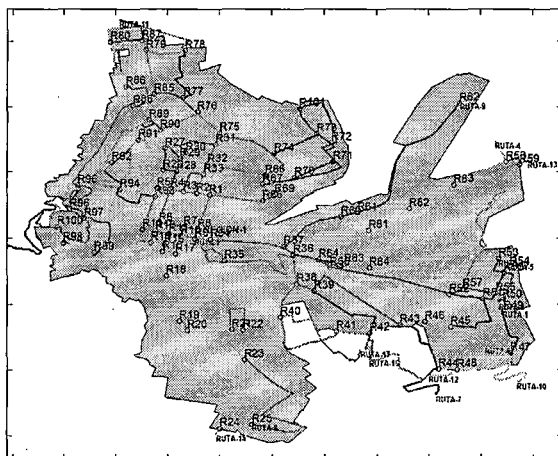
Figura 4.21: Caso de estudio: Resultados Ciudad de Ayacucho 1992.



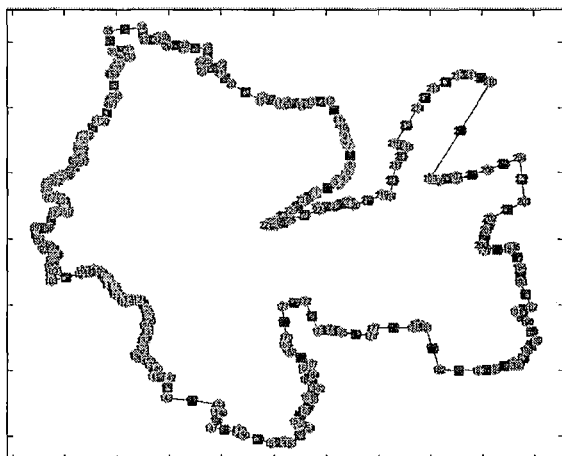
(a) Importación de dominio



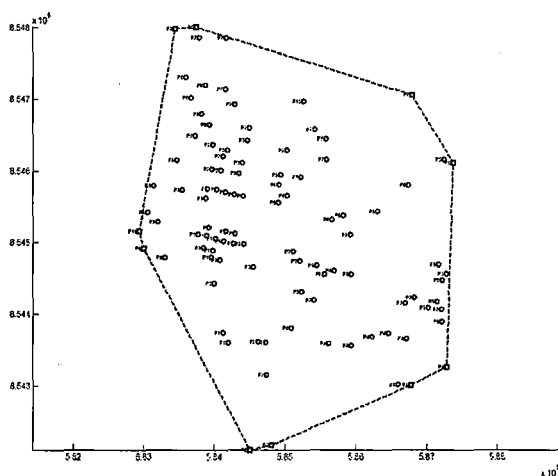
(b) Importación de redes



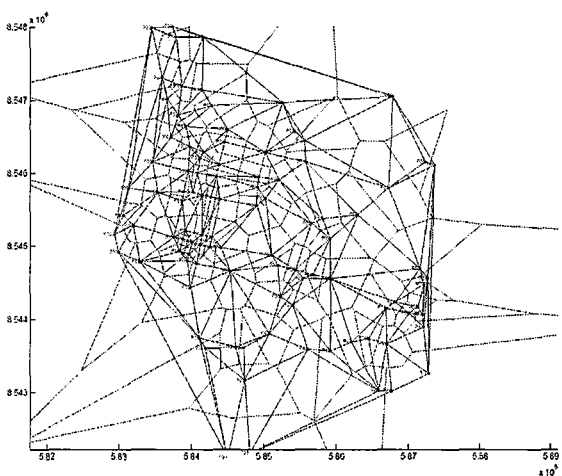
(c) Puntos atractores



(d) Contorno de la ciudad



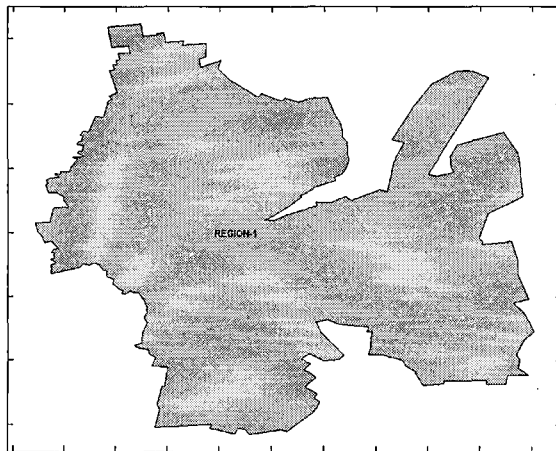
(e) Envolverte convexa



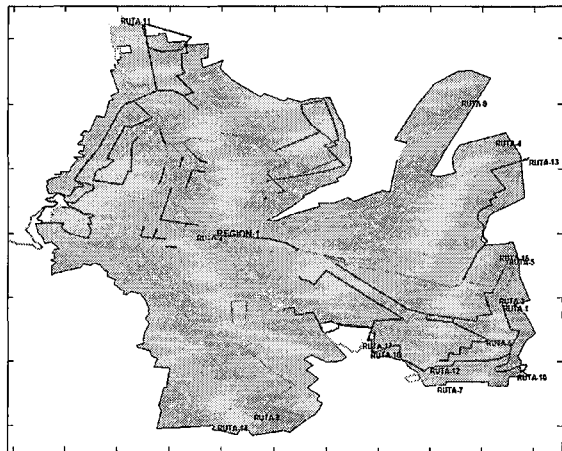
(f) T.Delaunay-D.Voronoi

Fuente: Elaboración propia

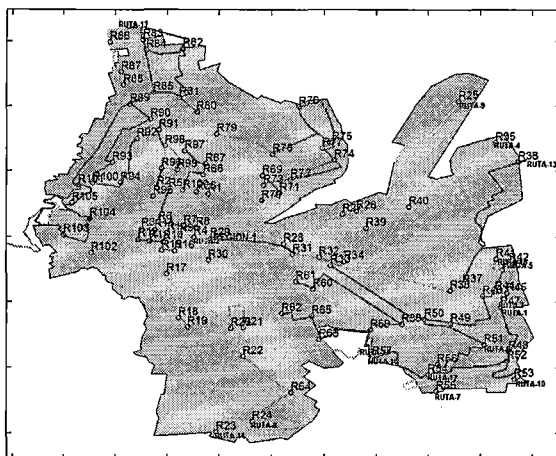
Figura 4.23: Caso de estudio: Resultados Ciudad de Ayacucho 1996.



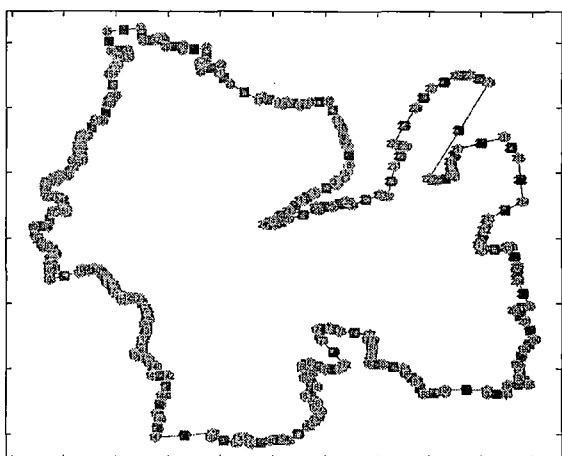
(a) Importación de dominio



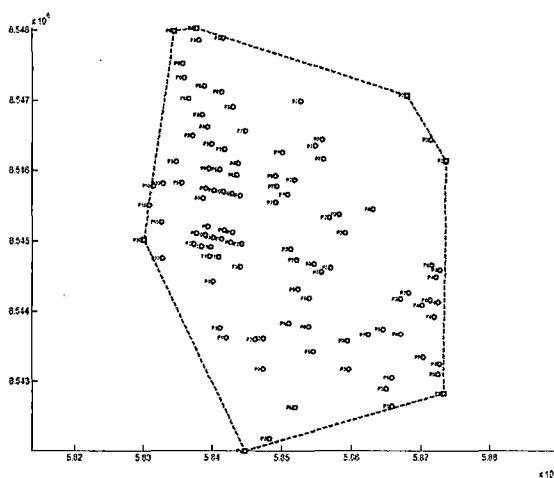
(b) Importación de redes



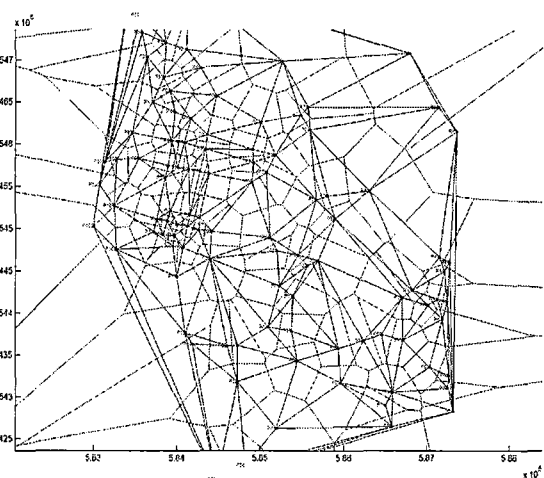
(c) Puntos atractores



(d) Contorno de la ciudad



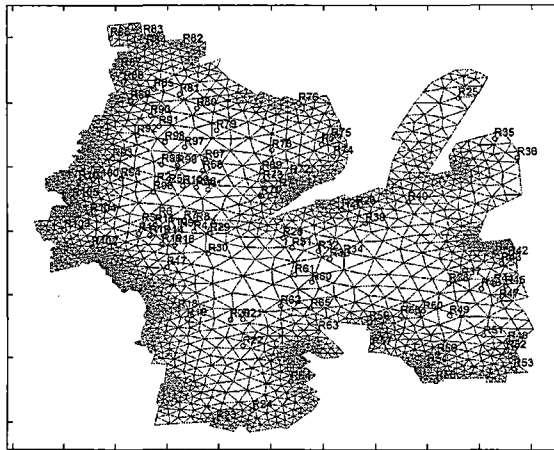
(e) Envolverte convexa



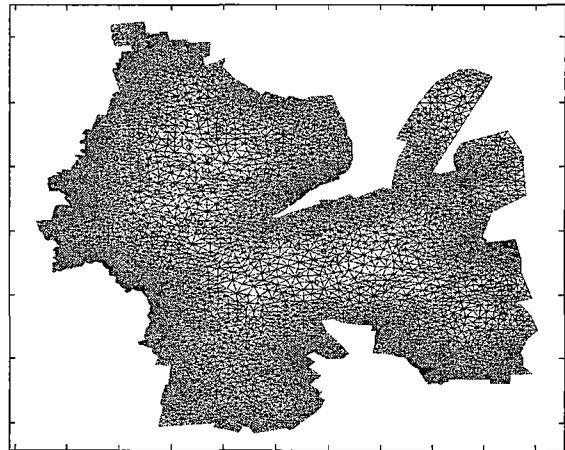
(f) T.Delaunay-D.Voronoi

Fuente: Elaboración propia

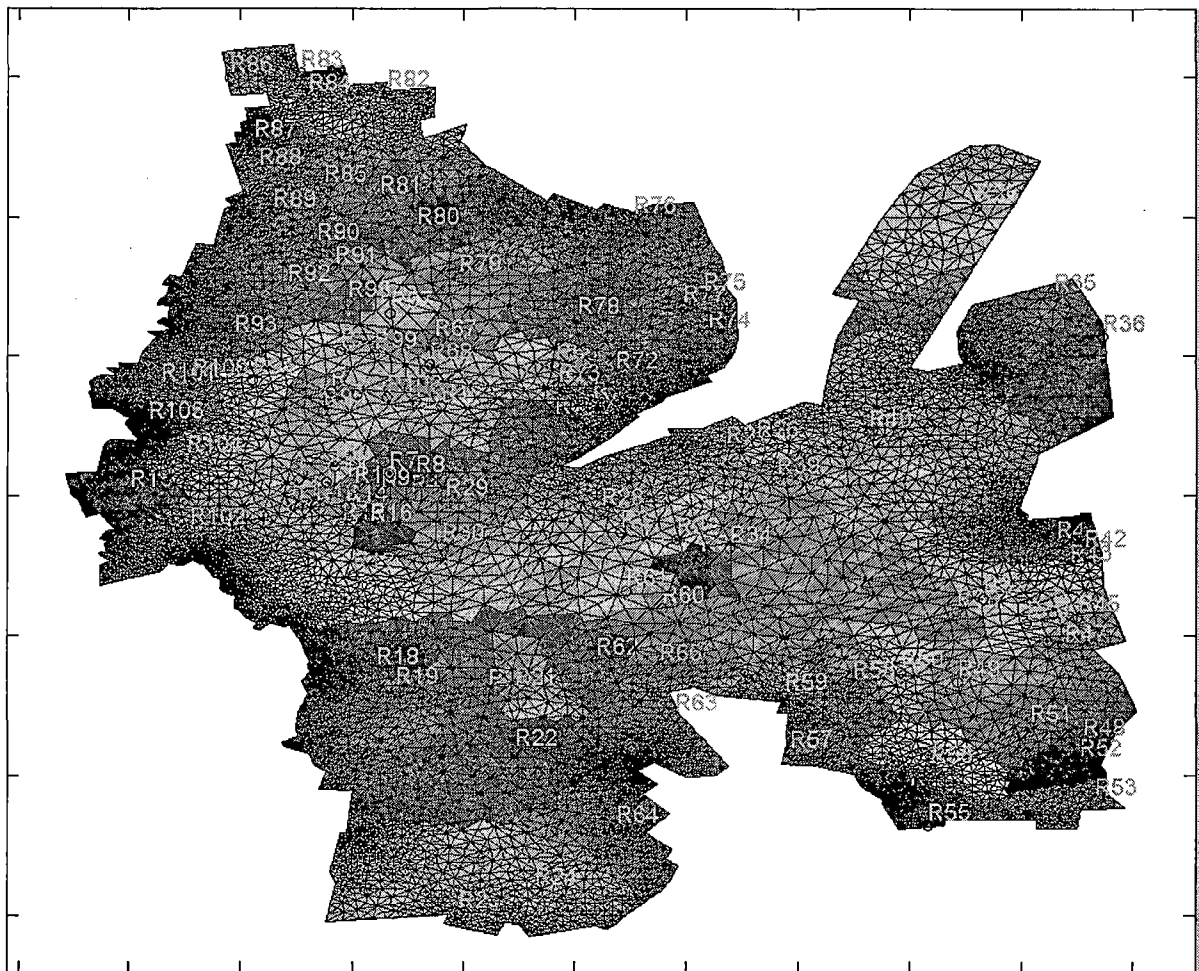
Figura 4.24: Resultados con MOBILIS: Ciudad de Ayacucho 1996.



(a) Discretización FEM



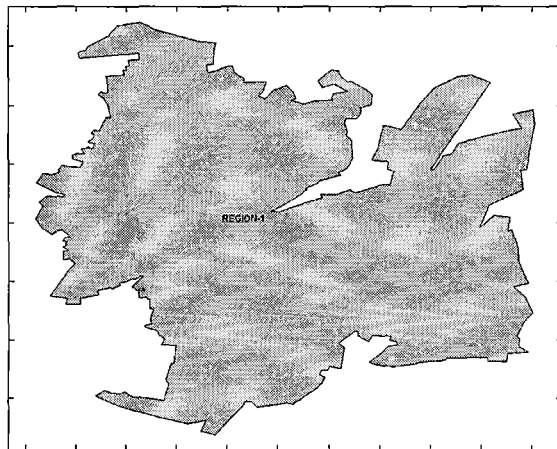
(b) Refinamiento FEM.



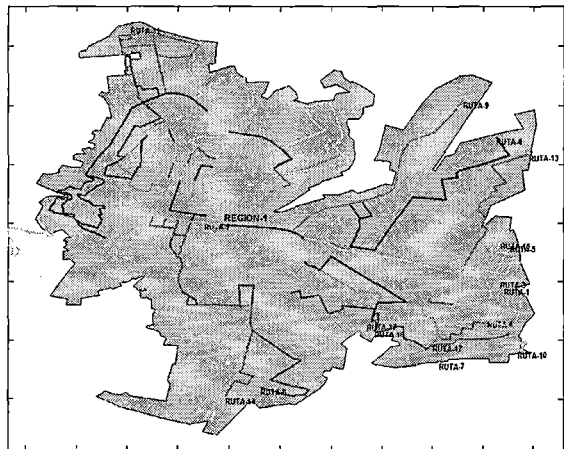
(c) Resultado de zonas de viaje.

Fuente: Elaboración propia

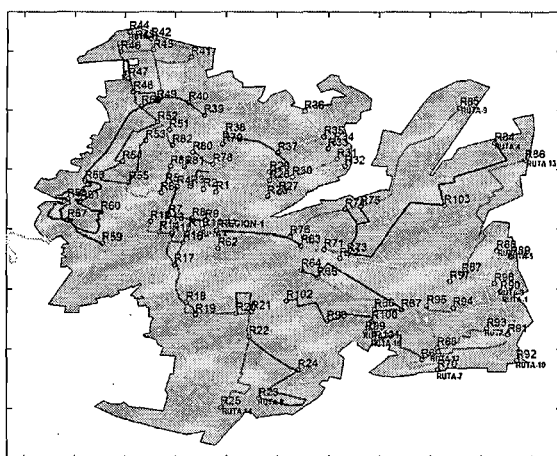
Figura 4.25: Caso de estudio: Resultados Ciudad de Ayacucho 2014.



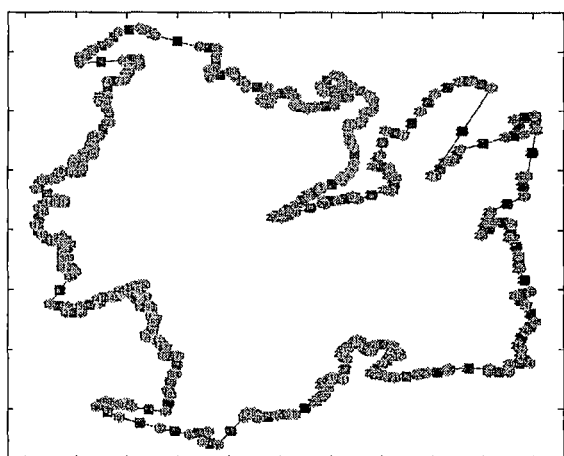
(a) Importación de dominio



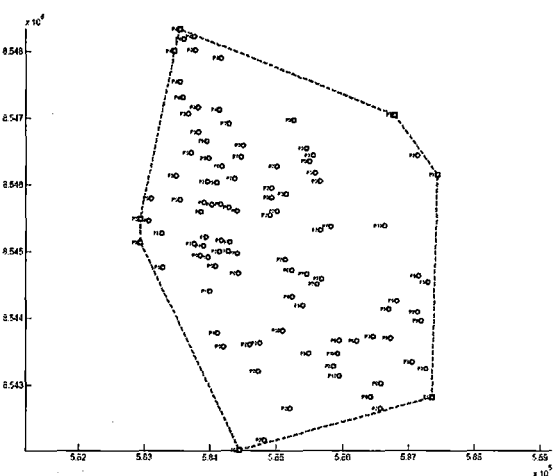
(b) Importación de redes



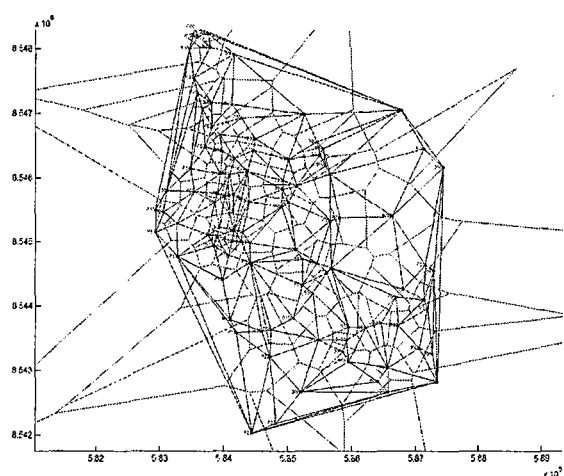
(c) Puntos atractores



(d) Contorno de la ciudad



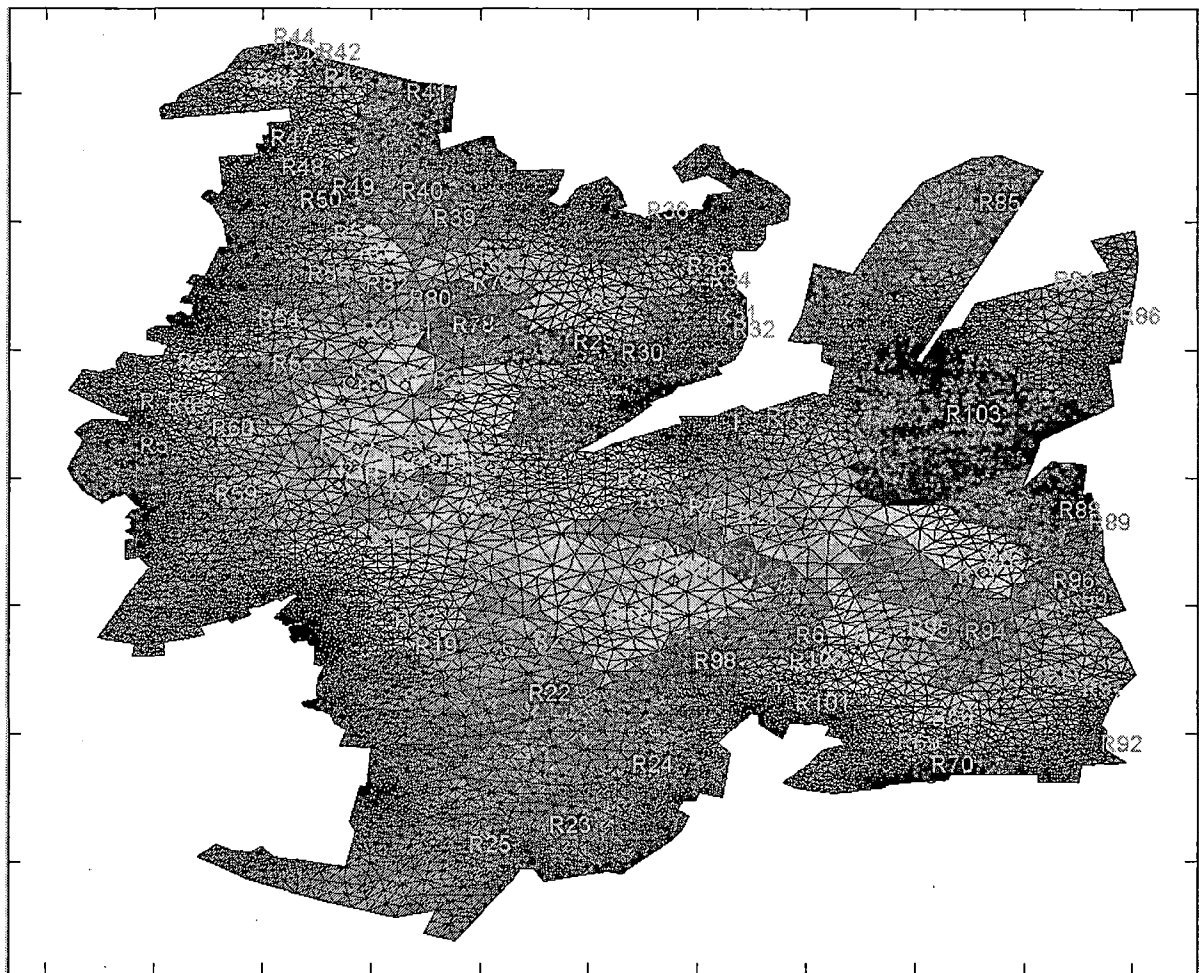
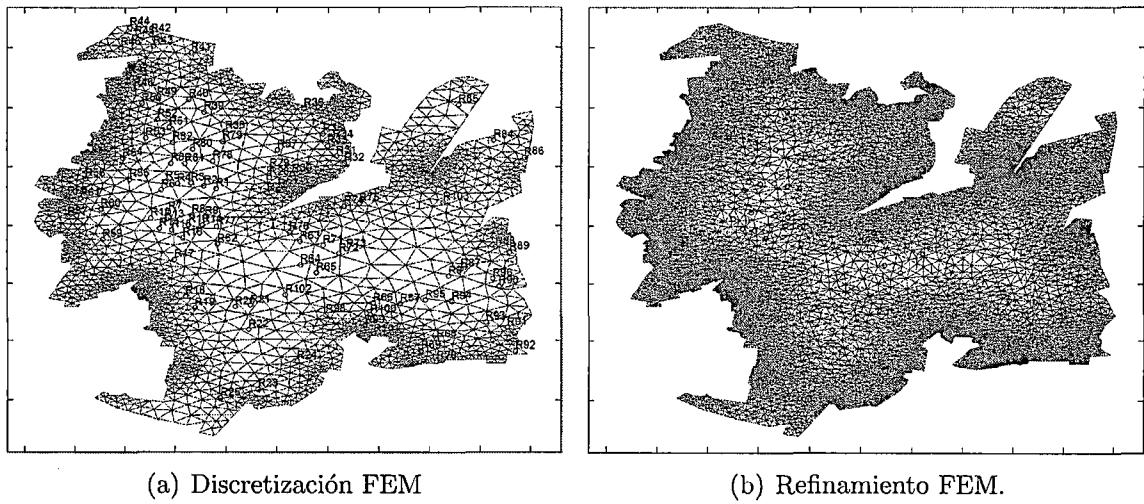
(e) Envolverte convexa



(f) T.Delaunay-D.Voronoi

Fuente: Elaboración propia

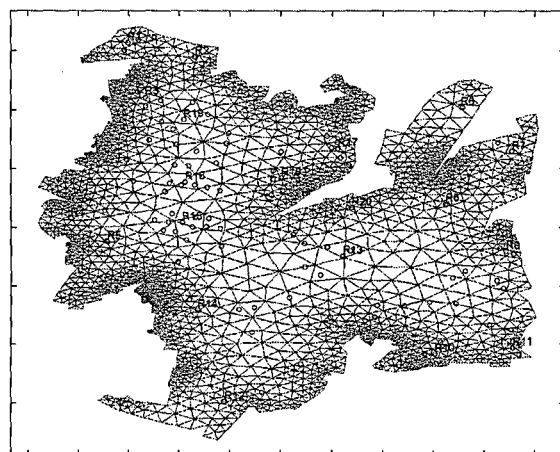
Figura 4.26: Resultados con MOBILIS: Ciudad de Ayacucho 2014.



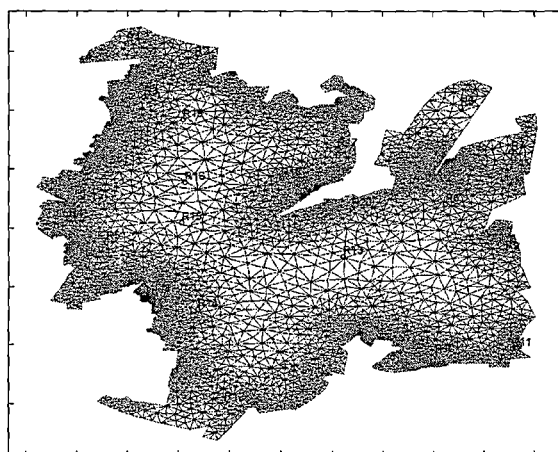
(c) Resultado de zonas de viaje.

Fuente: Elaboración propia

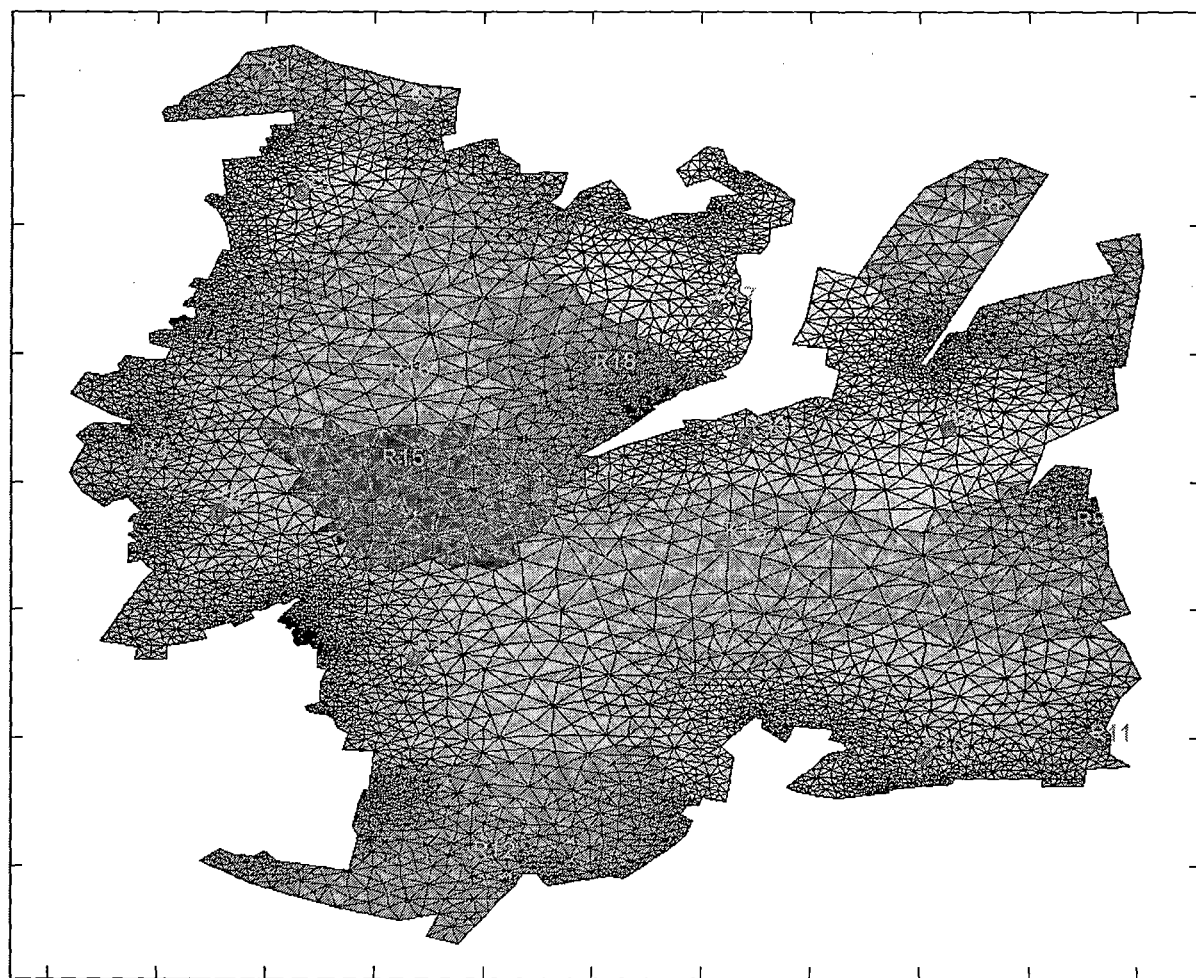
Figura 4.27: Resultados simplificados tipo CBD con MOBILIS: Ciudad de Ayacucho 2014.



(a) Discretización FEM



(b) Refinamiento FEM.



(c) Resultado de zonas de viaje.

Fuente: Elaboración propia

4.4.2. Prueba de hipótesis.

Para el análisis de resultados, ingresado los datos, se procesó en el *Programa VERNE*, se sacaron los resultados en el *Módulo MOBILIS* y se validó e hizo la prueba estadística con análisis espacial de datos en el *Módulo GEOESTADISTICA*. Los resultados muestran los principales hallazgos de la investigación aplicando técnicas de modelos matemáticos y cuyos reportes se muestran en tablas y gráficas; por lo que se cumple con presentar una potente interpretación teórica y aplicativa que demuestra que se corroboraron las hipótesis formuladas.

Programa VERNE, Módulo GEOESTADISTICA.m, Fichero Estabilidad de Teselación Delaunay.m

```

1 % PROGRAMA VERNE: Fichero Estabilidad de Teselación Delaunay
2 function mnuTeselacion_Callback(hObject, eventdata, handles)
3 % Proceso de triangulación
4 ax=COORfinal(i,1); ay=COORfinal(i,2); bx=COORfinal(j,1)
5 by=COORfinal(j,2); cx=COORfinal(z,1); cy=COORfinal(z,2)
6 suma=0
7 for cont=1:NP
8 if cont~=i && cont~=j && cont~=z
9 % Prueba para triángulos convexos
10 dx=COORfinal(cont,1)
11 dy=COORfinal(cont,2)
12 c1=-(ax^2+ay^2); c2=-(bx^2+by^2); c3=-(cx^2+cy^2)
13 A=[ ax ay 1
14     bx by 1
15     cx cy 1
16 ]
17 B=[c1 c2 c3]
18 VALOR=inv(A)*B
19 VALOR=[1 1 VALOR]'
20 EVA=[dx dy]
21 EVAV=[ EVA(1)^2 EVA(2)^2 EVA 1 ]
22 F=sum(VALOR.*EVAV)
23 ta=[i j z cont]
24 if F>0
25 suma=suma+1
26 else
27     break
28     end
29 end
30 end
31 if suma==NP-3
32     trian(tr,:)= [i j z]
33     xp=[ax bx cx ax ]
34     yp=[ay by cy ay ]
35     axes(handles.axes1)
36     plot(xp,yp,'Color','k','LineWidth',2)
37     tr=tr+1
38 end
39 end
40 end
41 end
42 end
43 close(proceso)
44 end

```

Programa VERNE, Módulo GEOESTADISTICA.m, Fichero Contornos.m

```

1 % PROGRAMA VERNE: Creación de contornos con métodos numéricos
2 function mnuContorno1_Callback(hObject, eventdata, handles)
3 global COORDENADAS
4 COOR=COORDENADAS;
5 X=COOR(:,1); Y=COOR(:,2); Z=COOR(:,3);
6 labels = num2str(Z,2);
7 plot(X,Y, 'LineStyle','o','Color','r','LineWidth',3), hold on
8 text(X+1,Y,labels), hold off
9 grid on
10 hold on
11 x = min(X):1:max(X); y = min(Y):1:max(Y);
12 [XI,YI] = meshgrid(x,y);
13 ZI = griddata(X,Y,Z,XI,YI,'v4');
14 contour(XI,YI,ZI)
15 %contour(XI,YI,ZI,10)
16 v = min(Z): 5 : max(Z);
17 [c,h] = contour(XI,YI,ZI,v)
18 clabel(c,h,'manual')
19
20 % -----
21 function mnuContorno2_Callback(hObject, eventdata, handles)
22 global COORDENADAS
23 COOR=COORDENADAS;
24 X=COOR(:,1); Y=COOR(:,2); Z=COOR(:,3);
25 labels = num2str(Z,2);
26 plot(X,Y, 'LineStyle','o','Color','r','LineWidth',3), hold on
27 text(X+1,Y,labels), hold off
28 grid on
29 hold on
30 x = min(X):1:max(X); y = min(Y):1:max(Y);
31 [XI,YI] = meshgrid(x,y);
32 ZI = griddata(X,Y,Z,XI,YI,'v4');
33 contour(XI,YI,ZI)
34 v = min(Z): 5 : max(Z);
35 contourf(XI,YI,ZI,v), colorbar, hold on
36 plot(X,Y,'ko')
37 text(X+1,Y,labels), hold off

```

Programa VERNE, Módulo GEOESTADISTICA.m, Fichero Superficies.m

```

1 % PROGRAMA VERNE: Creación de superficies con métodos numéricos
2 function mnuSuperficie1_Callback(hObject, eventdata, handles)
3 global COORDENADAS
4 COOR=COORDENADAS;
5 X=COOR(:,1); Y=COOR(:,2); Z=COOR(:,3);
6 labels = num2str(Z,2);
7 plot(X,Y, 'LineStyle','o','Color','r','LineWidth',3), hold on
8 text(X+1,Y,labels), hold off
9 grid on
10 hold on
11 x = min(X):1:max(X); y = min(Y):1:max(Y);
12 [XI,YI] = meshgrid(x,y);
13 ZI = griddata(X,Y,Z,XI,YI,'v4');
14 contour(XI,YI,ZI)
15 min(Z); max(Z);

```

```

16 v = min(Z): 5 : max(Z);
17 pcolor(XI,YI,ZI), shading flat, hold on
18 contour(XI,YI,ZI,v,'k'), hold off
19 surf(XI,YI,ZI), colormap('hot'), colorbar
20 surfc(XI,YI,ZI)
21 % -----
22 function mnuSuperficie2_Callback(hObject, eventdata, handles)
23 global COORDENADAS
24 COOR=COORDENADAS;
25 X=COOR(:,1); Y=COOR(:,2); Z=COOR(:,3);
26 labels = num2str(Z,2);
27 plot(X,Y, 'LineStyle','o','Color','r','LineWidth',3), hold on
28 text(X+1,Y,labels), hold off
29 grid on
30 hold on
31 min(Z); max(Z);
32 v = min(Z): 5 : max(Z);
33 [XI,YI] = meshgrid(min(X):0.25:max(X),min(Y):0.25:max(Y));
34 ZI = griddata(X,Y,Z,XI,YI,'v4');
35 surf(XI,YI,ZI), shading interp, light, axis off, hold on
36 contour3(XI,YI,ZI,v,'k'), hold off

```

Programa VERNE, Módulo GEOESTADISTICA.m, Fichero Interpolacion.m

```

1 function mnuIlineal_Callback(hObject, eventdata, handles)
2 % PROGRAMA VERNE: Interpolación lineal y spline
3 global COORDENADAS
4 COOR=COORDENADAS;
5 X=COOR(:,1); Y=COOR(:,2); Z=COOR(:,3);
6 [XI,YI] = meshgrid(min(X):0.25:max(X),min(Y):0.25:max(Y));
7 ZI = griddata(X,Y,Z,XI,YI,'linear');
8 v = -40 : 10 : 20;
9 contourf(XI,YI,ZI,v), colorbar, hold on
10 plot(X,Y,'o'), hold off
11 plot(XI,ZI,'k'), hold on
12 plot(X,Z,'ro')
13 text(X+1,Z,labels)
14 title('Linear Interpolation'), hold off
15 % -----
16 function mnuISpline_Callback(hObject, eventdata, handles)
17 global COORDENADAS
18 COOR=COORDENADAS;
19 X=COOR(:,1); Y=COOR(:,2); Z=COOR(:,3);
20 labels = num2str(Z,2);
21 plot(X,Y,'ko'), hold on
22 text(X+1,Y,labels), hold off
23 [XI,YI] = meshgrid(min(X):0.25:max(X),min(Y):0.25:max(Y));
24 ZI = griddata(X,Y,Z,XI,YI,'v4');
25 v = -40 : 10 : 40;
26 contourf(XI,YI,ZI,v)
27 caxis([-40 40])
28 colorbar
29 plot(X,Y,'ko')
30 text(X+1,Y,labels)

```

Programa VERNE, Módulo GEOESTADISTICA.m, Fichero EStadísticas.m

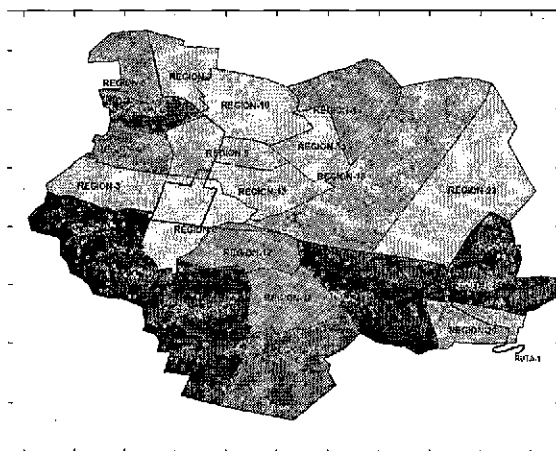
```

1 function mnuHistograma_Callback(hObject, eventdata, handles)
2 global COORDENADAS
3 COORDENADAS=get(handles.uitable1,'data')
4 COOR=COORDENADAS;
5 x=COOR(:,1); y=COOR(:,2); z=COOR(:,3);
6 min(z); max(z);
7 hist(z)
8 skewness(z)
9 kurtosis(z)
10 % -----
11 function mnuVariograma_Callback(hObject, eventdata, handles)
12 global COORDENADAS
13 COORDENADAS=get(handles.uitable1,'data')
14 COOR=COORDENADAS;
15 x=COOR(:,1); y=COOR(:,2); z=COOR(:,3);
16 [X1,X2] = meshgrid(x);
17 [Y1,Y2] = meshgrid(y);
18 [Z1,Z2] = meshgrid(z);
19 D = sqrt((X1 - X2).^2 + (Y1 - Y2).^2);
20 G = 0.5*(Z1 - Z2).^2;
21 indx = 1:length(z);
22 [C,R] = meshgrid(indx);
23 I = R > C;
24 % Variogram cloud
25 plot(D(I),G(I),'.')
26 xlabel('Distancia de seguimiento (distancia de separación de pares)')
27 ylabel('Variograma (diferencia media de cuadrados de pares de observaciones)')
28 % -----
29 function mnuKriging_Callback(hObject, eventdata, handles)
30 % .....

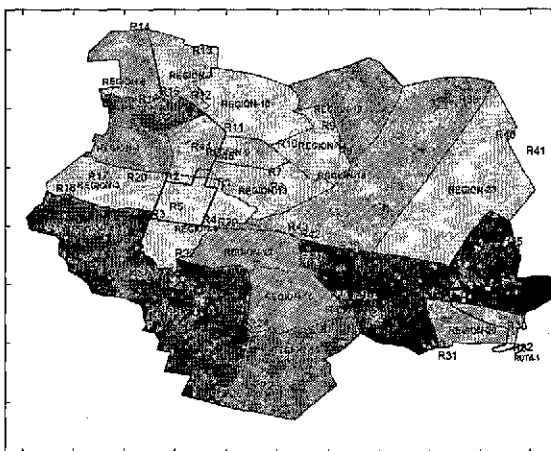
```

Para validar la hipótesis, se tuvo en cuenta la interacción entre los usos del suelo y el transporte debe darse de la siguiente manera: los patrones de localización de las actividades inducen unos patrones de viajes para realizar dichas actividades y la elección de localización de las actividades (configuración de los usos del suelo) es afectada por cómo los consumidores perciben las facilidades de transporte en cada locación (accesibilidad)

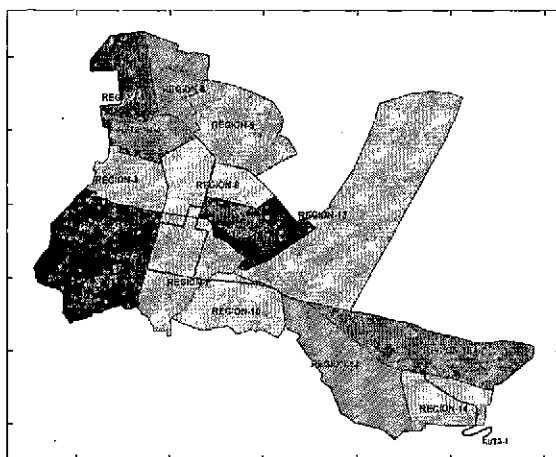
Figura 4.28: Validación de la hipótesis de creación de zonas de viaje con superficies de fricción, considerando atractores de viaje basados en actividades del Programa con VERNE - MOBILIS, para el dominio de la ciudad de Ayacucho, según el recorrido "Ruta 10" para el año 2014 .



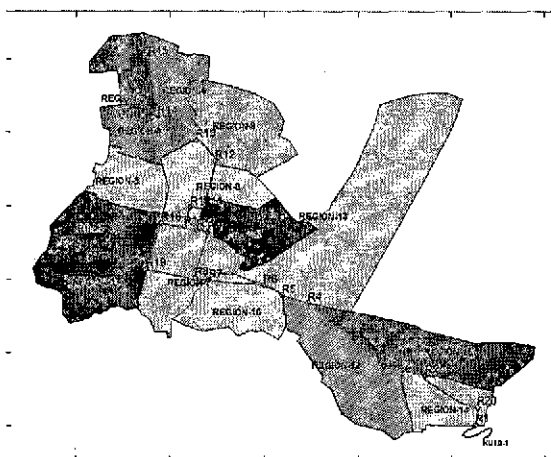
(a) Division de la ciudad en 23 sectores



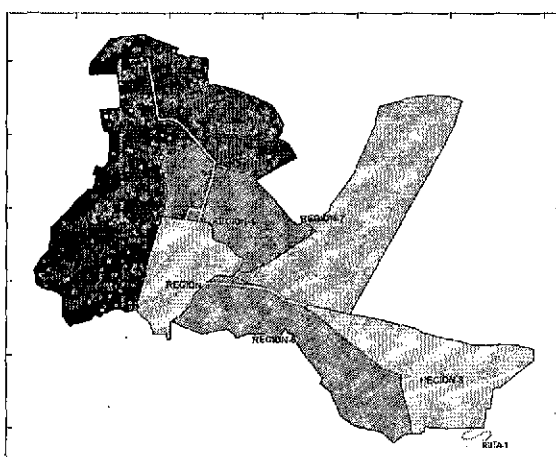
(b) Dominio general y red de la Ruta10



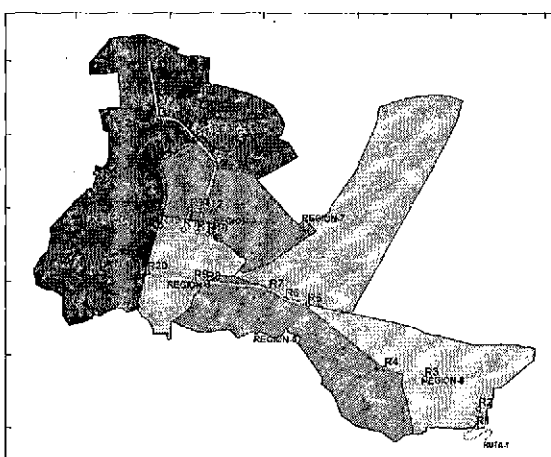
(c) Sectores del recorrido de la Ruta10.



(d) Atractores en el recorrido de la Ruta10



(e) Integración de sectores de influencia



(f) Diagrama de red y subdominios de Ruta10

Fuente: Elaboración propia

DISCUSIÓN.

5.1. Validez y confiabilidad de los resultados.

5.1.1. Sobre la implementación computacional.

A la hora de planificar la implementación computacional de la modelación de continua del TAP dentro del *Programa VERNE* y elegir los datos que emplearemos y el modelo de representación ideal, lo importante fue entender que no existe un modelo de datos idóneo de forma global, sino que esta idoneidad depende de muchos factores, como:

- **Tipo de variable.** Considerando la variabilidad y comportamiento espacial, las variables asociadas a los viajes basados en actividades son más adecuadas para el modelo vectorial; pues, las variables requieren una intensidad de muestreo distinta según la localización (variables que resulta interesante estudiar con más detalle en unos puntos que en otros) por lo que es más lógico recogerlas de forma vectorial, pues el modelo raster implica una intensidad de muestreo constante a lo largo del área estudiada.
- **Tipo de análisis.** Teniendo en cuenta el uso que daremos a la capa temática se condiciona en gran medida el modelo de datos idóneo. En el caso de la capa de fricciones, su análisis se lleva mejor según el modelo vectorial; pues, el objetivo de las superficies de fricción es interactuar en conjunto con otras variables, ya que, entre otras cosas, no interfieren tanto con otros elementos a la hora de calcular las zonas de viaje con todas esas variables.
- **Contexto de trabajo.** Como se requiere trabajar con dominios de regiones, esto nos condiciona al empleo de datos vectoriales, ya que resulta mucho más sencillo combinarlos con las invariantes territoriales de las redes urbanas de transportes, las cuales siempre se presentan como datos vectoriales.

5.1.2. Fuentes y tipos de errores.

La utilización de datos espaciales en la presente investigación, ha pasado por una serie de etapas a lo largo de los cuales puede haber incorporado errores. Estudiando esas etapas por separado, encontramos:

- **Errores de concepto y modelo.** Al recoger la información espacial utilizamos el modelo de representación vectorial, el cual siempre tiene alguna deficiencia. La realidad y las tareas realizadas con información espacial no se adaptan por completo al modelo de representación, y conlleva la introducción de algún error.

- **Errores en las fuentes primarias.** El dato vectorial del que disponemos proviene originariamente de una fuente primaria, la cual puede contener errores. Si esta fuente contiene errores, estos aparecerán también en los datos que se deriven.
- **Errores en los procesos de creación de superficies de fricción.** Los procesos que realizamos para crear la superficies de fricción pueden incorporar errores en el resultado. Por ejemplo, en el proceso de digitalización en base a mapas escaneados pueden aparecer errores y también en valores de los atributos.
- **Errores en los procesos de análisis.** Los datos espaciales puede derivar de un proceso de análisis, y pueden aparecer errores debidos principalmente a dos razones: o bien la capa original objeto de análisis contiene de por sí errores, o bien el proceso no es por completo correcto. Ninguno de esos algoritmos es completamente preciso, y los valores calculados presentaran discrepancias de distinta magnitud con el valor real, en función de diversos factores.

La calidad de los datos utilizados en los casos de estudios abordados en la investigación depende de muchos factores. Las características que dotan de dicha calidad a los dato son variadas, pues los datos lindantes con la determinación de viajes en una ciudad es en sí complejo, y cada una de estas características es susceptible de incorporar errores y por tanto de implicar una pérdida de calidad por ello. Las siguientes son algunos de los componentes de la calidad de datos:

- **Exactitud posicional.** Todo dato espacial tiene asociada una referencia geográfica. La precisión con la que se toma esta condiciona la calidad del dato. Esta precisión puede considerarse únicamente en los ejes x e y , o también z (elevación). Esta última, no obstante, puede considerarse como un atributo.
- **Exactitud en los atributos.** Si la componente espacial puede tener errores, estos también pueden aparecer en la componente temática. Los valores asociados a una coordenada u objeto espacial pueden haber sido medidos con más o menos exactitud, o presentar valores incorrectos por muy diversas causas.
- **Consistencia lógica y topológica.** Los datos no son elementos independientes, sino que existen relaciones entre ellos. Un dato de calidad debe recoger fielmente estas relaciones, siendo la topología la encargada de reflejar este tipo de información. Además de la coherencia de las relaciones, existe una coherencia implícita en todo atributo o valor recogido, de forma que resulte lógico.
- **Compleción.** Los datos no recogen todo lo que existe en una zona de estudio (dominios y subdominios). Algunos elementos pueden no haberse recogido por cuestiones de escala (menores de un tamaño mínimo), pero también pueden incluirse o excluirse en función de otros criterios.
- **Calidad temporal.** El tiempo es importante en muchos sentidos, pues afecta directamente a su calidad. La realidad que representa los datos es una realidad que varía con el paso del tiempo, y por tanto este paso del tiempo puede degradar la calidad del dato.
- **Procedencia.** Un dato puede provenir de una fuente más o menos fiable, o haber sido generado a través de uno o varios procesos, en cada uno de los cuales se puede haber introducido algún tipo de error.

En los casos de estudios abordados para las ciudades de baja densidad, en la presente investigación se tienen que los errores posicionales son más comunes para la representación vectorial utilizada, siendo una fuentes de error la digitalización.

Entre los errores que se dieron se tienen falsos nodos (intersecciones de una línea consigo misma que no existen en realidad), puntos situados fuera del objeto, coincidencia imperfecta entre polígonos o mala referenciación (en el proceso de registro). El problema principal en trabajar con líneas y polígonos, estriba en que aquello que se introduce es un conjunto infinito de puntos, y el proceso solo puede recoger un número finito de ellos y después unirlos mediante segmentos rectilíneos. La superficies de fricción que se tratan como una capa vectorial también puede adolecer de errores, que derivan a su vez tanto del proceso de introducción de los mismos como de los procesos de medición mediante los que se ha obtenido el valor concreto.

Para la detección de errores en los distintos módulos del *Programa VERNE* toda representación del dato espacial se asocia a una exploración visual que sea clara y adecuada, para revelar de la forma más notoria posible las posibles deficiencias de este; de tal forma que el mapeo no es solo de importancia para la generación de resultados al final de un flujo de trabajo, sino desde su mismo inicio. El análisis visual de los datos de partida, así como otros procesos de análisis, pueden beneficiarse de una representación correcta. En el terreno de los atributos, la detección de errores puede llevarse a cabo empleando las técnicas estadísticas habituales. La detección de valores improbables (*outliers*) es uno de los procesos básicos. Estos *outliers* son observaciones dentro de un conjunto de datos que no parecen guardar consistencia con el resto del conjunto y cuya detección puede llevarse a cabo de modo analítico o bien de modo visual, representando gráficamente los valores de los atributos. Los errores posicionales o los atributos no categóricos son variables de tipo cuantitativo. El *Error Medio Cuadrático* es la forma más habitual de medir esos errores. Otras medidas utilizadas son el *Error Medio*, el *Error Medio Absoluto* o el *Error Máximo*.

La accesibilidad se refiere a un cálculo basado en dos componentes como serán la Fricción, que representa la facilidad para recorrer un terreno y la distancia, espacio que se recorre entre dos determinados lugares. Por ejemplo en un terreno totalmente llano, sin obstáculo ni impedimento ninguno, la accesibilidad será igual a la distancia, pero sabemos que existen en el medio diferentes factores que condicionan el desplazamiento, y muchas veces zonas más lejanas son más accesible que otras más cercanas. Por ello, es importante calcular la accesibilidad a un determinado punto, para conocer la dificultad del desplazamiento por un terreno.

5.1.3. Debilidades de los modelos de predicción de desplazamiento urbano.

Aunque la calidad y la sofisticación de los modelos de demanda de viajes en uso hoy en día es muy variable, no son capaces de poner en práctica los conceptos incorporados en el marco de decisiones de viaje y de la teoría de viajes por actividades. En particular, la mayoría son débiles en las siguientes categorías (JHK y Associates, 1992) [?]:

1. *Agregación*. La elección de destino se modela como un fenómeno global, con modelos de atracción viaje de regresión lineal y modelos de distribución de viaje

gravedad.

2. *Decisiones a largo plazo.* Son generalmente modelos agregados, como los modelos de empleo y de la población que están ganando un mayor uso en la actualidad.
3. *Integración.* Los modelos de generación de viajes, distribución, elección del modo y asignación, se aplican por separado, con supuestos y resultados inconsistentes.
4. *Demanda de viajes por actividades.* Aunque suelen distinguir las categorías de propósitos de viaje, estos no representan la posibilidad de llevar a cabo actividades sin viajes.
5. *Tiempo y las limitaciones de espacio.* Los modelos en uso representan las decisiones relacionadas con los viajes individuales, de un solo sentido; ignorando la interdependencia.
6. *Variables explicativas.* Los modelos incorporan la influencia de tiempo de viaje y costo; sin embargo, con frecuencia desestiman las características del ciclo del hogar.

5.2. Contrastación de hipótesis

5.2.1. Consideraciones.

Para toda el área en estudio *el número de producciones deberá ser obligatoriamente igual al de atracciones*, aunque no necesariamente para cada una de las zonas en particular. Esto se debe a que por definición los viajes *BH* siempre son producidos por la zona que contiene al hogar y atraídos por la zona del otro extremo, en cualquier sentido que se realice el viaje. Los viajes *NBH* son producidos por la zona origen y atraídos por la zona destino.

5.2.2. Modelo "Mobilis"

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 los atractores dinámicos de viajes, considerando las fricciones o impedancia ¹ intrínsecas en cada zonas y la distancia por la separación espacial entre el centroide de cada EF y el atractor, medida en distancia, tiempo o costo.

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".

¹El 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.

El factor fricción depende de las superficies de fricción que pueden superponerse al territorio de redes, que se basan en datos del MDT y MDE 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 finito y punto atractor de actividades) se puede medir en varias unidades de impedancia, siendo la de tiempo la más utilizada. La fricción total en una zona es la suma de las impedancias de los tramos del camino mínimo ² más las impedancias terminales. Las impedancias terminales corresponden a los tiempos y/o costos de espera, caminata, recorrido buscando estacionamiento, etc.

5.2.3. Calibración.

El objetivo de la calibración es hacer que el Modelo "MiM"-*MOBILIS* reproduzca la generación de zonas de viaje basados en actividades en un año base, para una ciudad de baja densidad, donde se tenga superficies de fricción que generen la impedancia. La generación de zonas de viaje basados en actividades en función de la fricción zonal en las que se dividió la ciudad, consiste en una gráfica con atributos funcionales (tabla) en que se obtienen un contorno (*boundary*), para cada disposición espacial de atractores.

En algunos casos, para simplificar el proceso se utiliza la fricción media ponderada de todos los viajes. El modelo calibrado deberá reproducir adecuadamente el volumen de viajes obtenido del Modelo "MiM"-*MOBILIS* continuo a ser asignado a la red urbana discreta, donde se tratará y solucionará como un TAP. Para mostrar como se procede para la calibración del Modelo "MiM"-*MOBILIS* se utilizará un ejemplo en una ciudad de baja densidad como es la Ciudad de Ayacucho, donde se utilizará el territorio considerando la isotropía y la anisotropía de las zonas.

Para contrastar con el modelos clásicos de 4 etapas, no es necesario contar con los datos de producción y atracción por zona (que provienen de la etapa de generación) y con la matriz de $O - D$ (que consiste en una matriz con cantidad de viajes por unidad de tiempo entre zonas). A continuación se aplica el Modelo "MiM"-*MOBILIS* con un conjunto de factores de fricción circunscritos a los subdominios de una ciudad. Sin necesidad de obtener la matriz de producción y atracción que se utiliza en formulaciones discretas; considerando la formulación de los modelos continuos se discretiza el dominio de una ciudad y sus subdominios en elementos finitos con una triangulación Delaunay para determinar zonas de viaje en base a las actividades que se desarrollan en la ciudad y a las fricciones presentes en el territorio, de tal forma que se tenga viajes calculados que ingresan como "input" al modelo de redes según las invariantes territoriales que se solucionan según los algoritmos de TAP. Estos viajes calculados se distribuyen en la red de tal forma que se tengan los flujos.

Factores de ajuste socioeconómicos.- Además de los factores de fricción, relacionados con la separación espacial, existen otros factores que influyen en la obtención de zonas de viaje. El efecto de esos factores se tienen en cuenta en el Modelo "MiM"-*MOBILIS* a través de los factores de ajuste como los derivados de aspectos socioeconómicos. El Modelo "MiM"-*MOBILIS* solamente tiene en cuenta la producciones y atracciones por motivo y la separación espacial y no contiene en su

²Los caminos mínimos dentro de una red se determinan mediante el submodelo de asignación TAP.

formulación ninguna variable que caracterice el nivel socioeconómico de las personas que realizan los viajes. Esto puede producir algunas distorsiones en la distribución.

Costos relacionados con la cantidad de nodos.- Muchos modelos muestran las escalas de capacidad de transporte con el número de nodos n o con su λ densidad. Supongamos que se utiliza un protocolo que proporciona una capacidad de transporte del orden de $F(\lambda)$ en alguna región en la que la densidad de los nodos es λ . Un costo típico en un entorno de x es la densidad de nodos requeridos allí para llevar un flujo determinado. Suponiendo que un flujo $\phi(x)$ se asigna a través de un entorno de x es:

$$c(x, \phi(x)) = F^{-1}(\phi(x)) \quad (5.2.1)$$

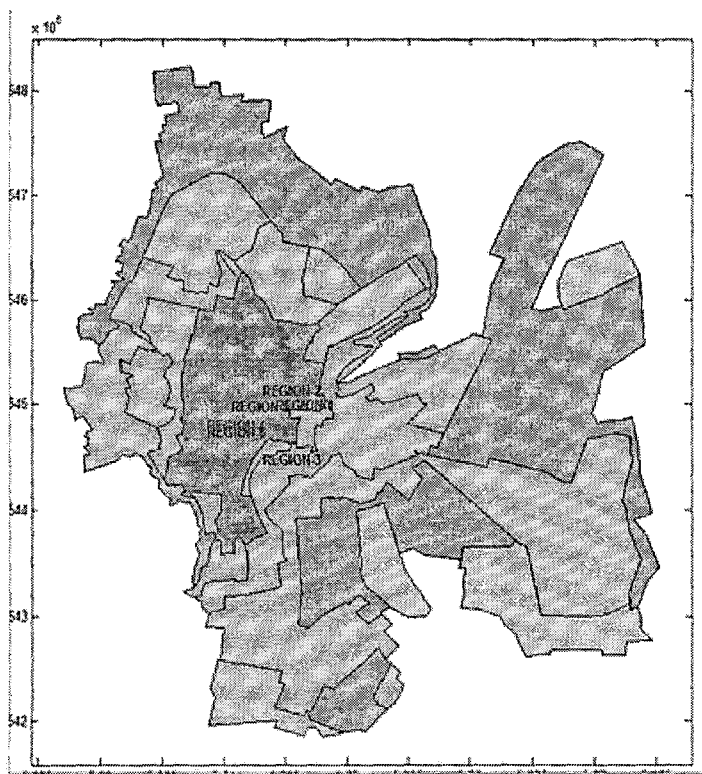
Sistema de transporte.- El tipo, disponibilidad y calidad de las facilidades de transporte disponibles en el área determina la variable denominada accesibilidad. A mayor accesibilidad mayor cantidad de viajes realizados. La accesibilidad se define de la siguiente manera:

$$ACC_i = \sum (A_j \times F_{ij}) \quad (5.2.2)$$

Siendo:

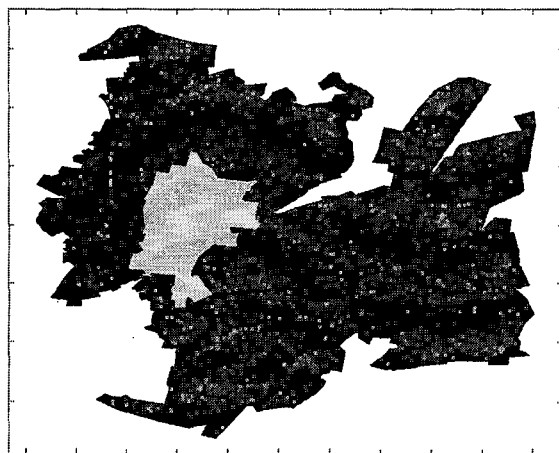
ACC_i = accesibilidad de la zona i . A_j = viajes atraídos por la zona j . Se adoptan las atracciones como ponderación de la importancia relativa de cada zona. F_{ij} = factor de impedancia entre la zona i y la zona j , a mayor factor mayor accesibilidad. n = número de zonas.

Figura 5.1: Evolución de dominio de la Ciudad de Ayacucho con VERNE - MOBILIS.

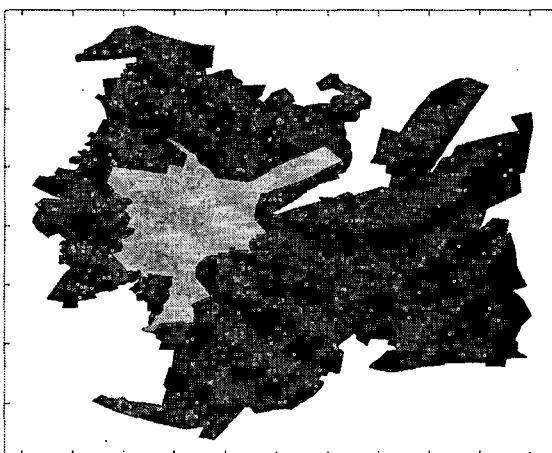


Fuente: Elaboración propia

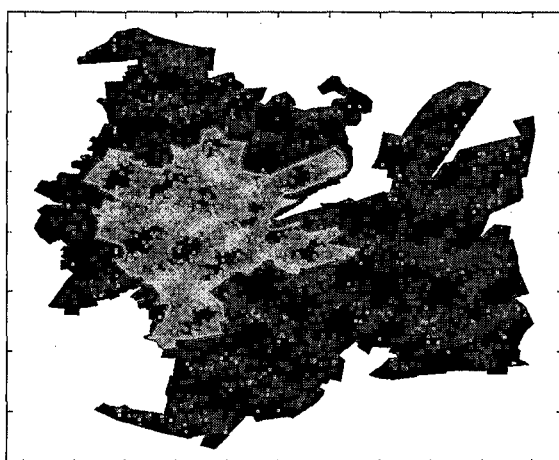
Figura 5.2: Diseño de experimento para la calibración de MOBILIS, según atractores de viaje, factores de ajuste, costos de la cantidad de nodos, impedancia, generación de zonas de viaje con EF obtenidos con teselación de tipo Delaunay.



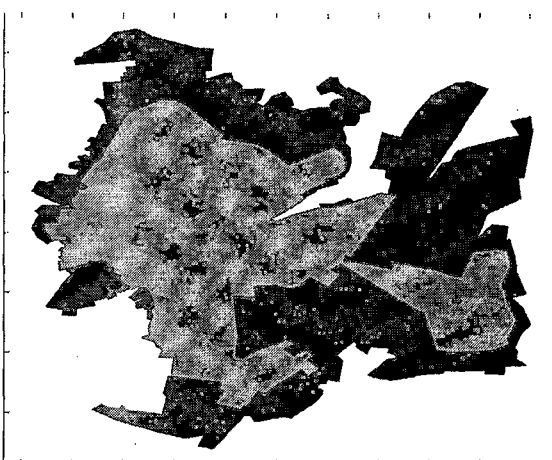
(a) Evolución con y sin fricción 1944-2014



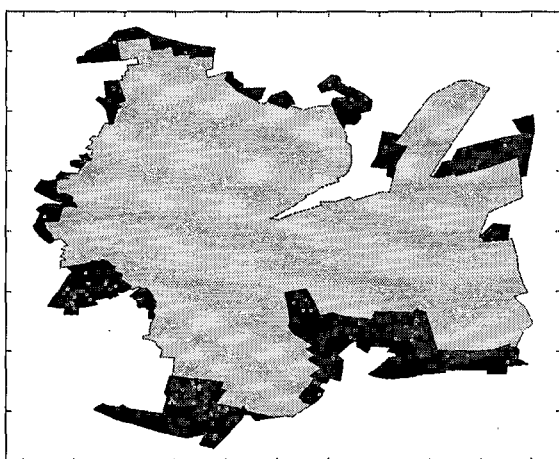
(b) Evolución con y sin fricción 1963-2014



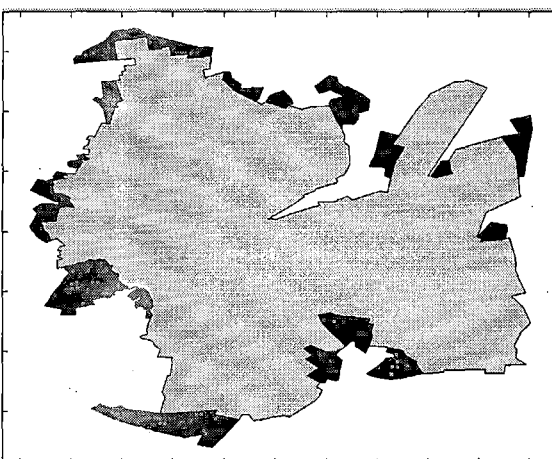
(c) Evolución con y sin fricción 1971-2014



(d) Evolución con y sin fricción 1982-2014



(e) Evolución con y sin fricción 1992-2014



(f) Evolución con y sin fricción 1996-2014

Fuente: Elaboración propia

5.2.4. Análisis espacial de datos.

Trabajar con datos espaciales tiene una serie de implicaciones que han de considerarse con detenimiento antes de llevar a cabo cualquier análisis. Conocer en profundidad el dato espacial es, por tanto, imprescindible, no solo en lo relativo a su forma, su manejo y su almacenamiento; sino también en lo referente a su análisis y cómo ha de tratarse e interpretarse la información que contiene. Entendemos por dato espacial todo aquel que tiene asociada una referencia geográfica, de tal modo que podemos localizar exactamente dónde sucede dentro de un mapa. Dentro de esta definición se incluyen datos de campos (superficies) o datos asociados a objetos como puntos, líneas o polígonos.

En el modelo raster se tiene un conjunto de valores (la componente temática), los cuales guardan una estructura dada, la cual por sí misma establece su disposición en el espacio (la componente espacial). En el vectorial, por su parte, la componente espacial se recoge explícitamente según una serie de puntos, la cual puede ser más o menos compleja en función de la complejidad de la entidad a representar o el detalle con que se recoja. A este conjunto de puntos se le relaciona después con una serie de valores, que son los que definen las propiedades de la entidad.

La topología es en este caso un elemento que contribuye a la calidad de los datos, pues mantiene la coherencia espacial de estos y evita la aparición de elementos tales como polígonos de muy pequeño tamaño, frecuentes en la digitalización de entidades debido a las pequeñas imprecisiones que se presentan en el proceso, y que causan la presencia de falsos traslapes entre polígonos.

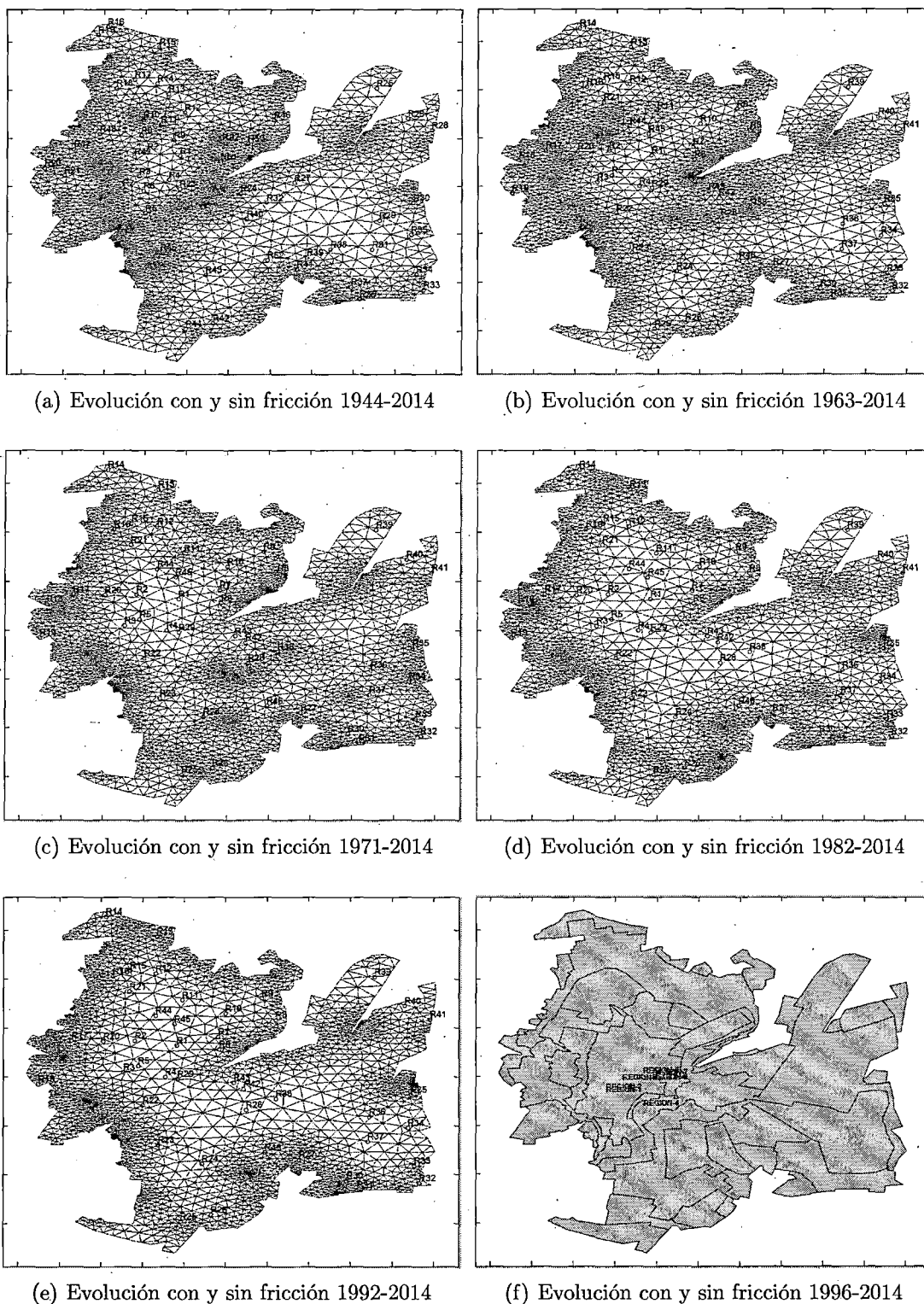
5.2.5. Efectos de borde.

Las zonas que estudiamos dentro de todo análisis espacial tienen unos límites establecidos. Estos límites vienen definidos de forma artificial. El efecto de borde no es independiente de otros elementos como la escala, ya que la escala de análisis tiene un influencia directa. Si dentro del dominio de la ciudad las viviendas están dispuestas de forma regular, se puede decir que en cualquier punto dentro de esa masa existe una densidad constante. Si situamos un atractor en cualquier punto de dicha masa, ya sea cerca o lejos del borde, las viviendas están dispuestas con una misma densidad. Para el cálculo de la densidad se estableció un área de análisis puesto que no es una variable que pueda computarse puntualmente.

Analizando el número de elementos finitos, cuyos centroides están situados a una distancia menor que un umbral dado, en los puntos cerca del borde, la presencia de dicho borde distorsiona los valores calculados. Por lo tanto, el modelo elaborado e implementado en *VERNE* tiene en expresiones corregidas que modifican los valores obtenidos en función de la distancia al borde.

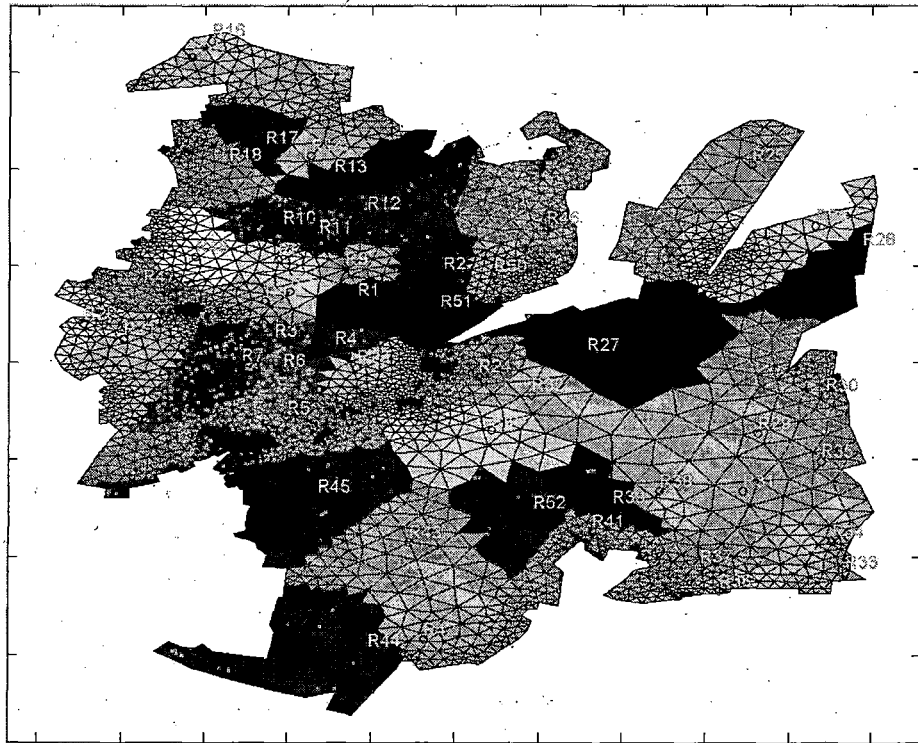
El efecto de borde no se manifiesta únicamente para puntos cercanos a dicho borde, sino para todos aquellos relacionados o conectados con él, con independencia de su distancia a este. En las zonas de borde una parte de dicha área para no caer fuera del dominio de la ciudad, se vincula con un área aledaña, según el atractor, con lo que la distancia de recorrido para viajes será mínima (con lo que se demuestra la necesidad de conexión entre subdominios en la zona limítrofe).

Figura 5.3: Resultados de la discretización de las superficie con elementos finitos del Programa con VERNE - MOBILIS, para el dominio de la ciudad de Ayacucho en los años 1963, 1971, 1982, 1992, 1996 superpuestos al dominio de la ciudad el año 2014 con 46 atractores de viaje.

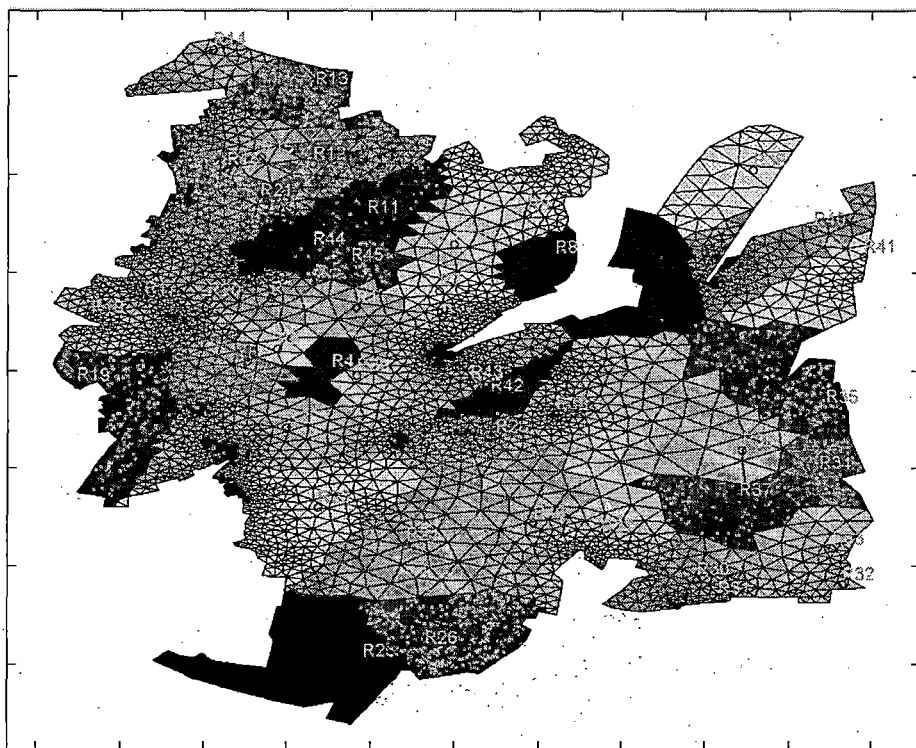


Fuente: Elaboración propia

Figura 5.4: Resultados de zona de viaje considerando modelo isotrópico (sin impedancia) para dominio y subdominios de la Ciudad de Ayacucho con 46 atractores de viaje.



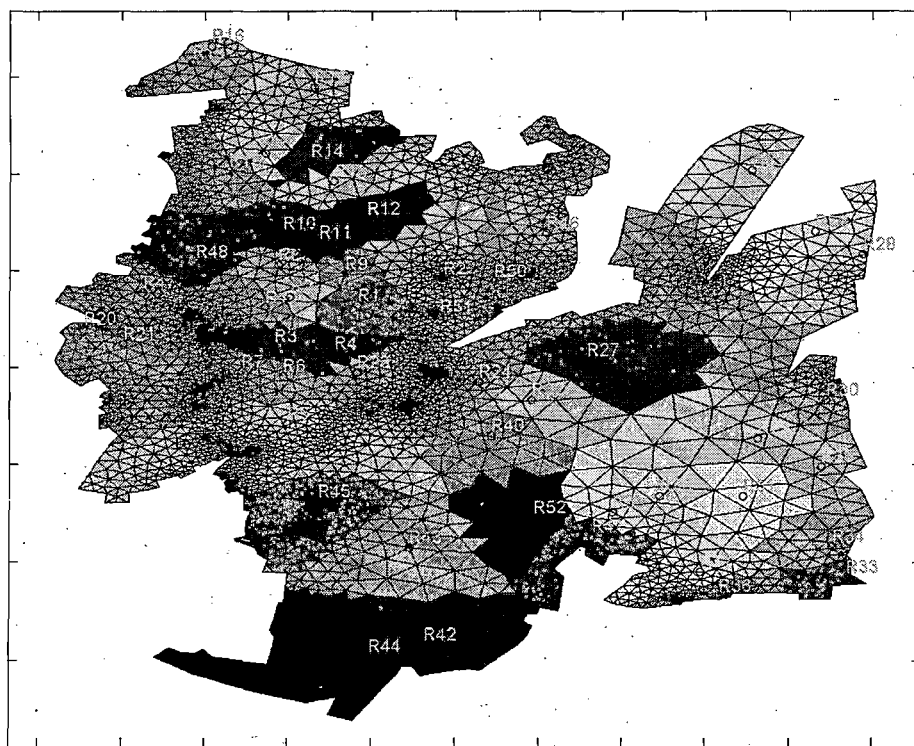
(a) Zona de viaje sin superficie de fricción 1963-2014



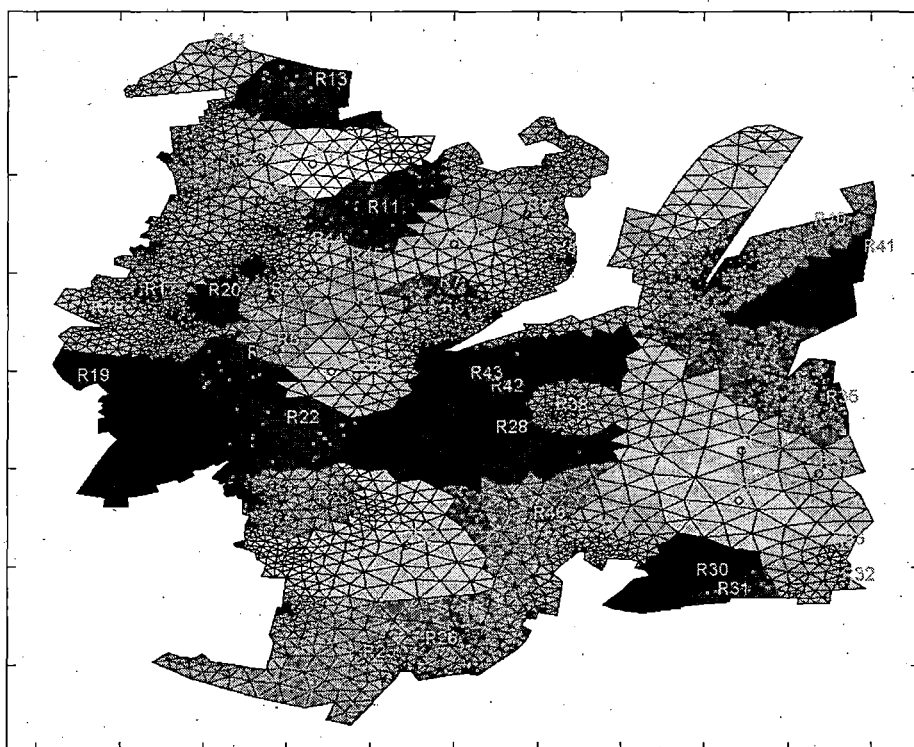
(b) Zona de viaje sin superficie de fricción 1971-2014

Fuente: Elaboración propia

Figura 5.5: Resultados de zona de viaje considerando modelo anisotrópico (con impedancia) para dominio y subdominios de la Ciudad de Ayacucho con 46 atractores de viaje.



(a) Zona de viaje con superficie de fricción 1963-2014



(b) Zona de viaje con superficie de fricción 1971-2014

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES.

5.3. Conclusiones.

1. Existe una dinámica entre territorio, transporte y movilidad; las necesidades de movilidad de las personas están determinadas por variables asociadas a la demanda de transporte, que se obtienen a partir de las relaciones entre aspectos socioeconómicos de la población y su interrelación con las actividades urbanas, materializadas por los usos del suelo.
2. En la investigación, se aborda un enfoque vinculado al análisis cuantitativo de la red para dominios no convexos de ciudades de baja densidad. Se propone una construcción del territorio diferente del enfoque tradicional basado en la dialéctica del centro y la periferia, y se plantea un enfoque alternativo sobre la evolución de la presencia de las 3 invariantes: la malla, el nodo y la red.
3. Se logró el desarrollo de un software portable y escalable, permitiendo la integración de modelo de uso de suelo y transporte, sobre la totalidad del espectro de tamaños de red. Se realizó la puesta a punto de un programa VERNE en sus distintos módulos. El modelo "MiM" elaborado es competitivo en tiempo de preparación y ejecución y en precisión de los resultados y puede utilizarse como alternativo a los procedimientos habituales de simulación del tráfico basados y para estudiar evolutivamente la integración de transporte y usos de suelo en ciudades.
4. El Programa VERNE, se presenta como una aplicación informática, que utilizará como plataforma de preproceso, solución y posproceso el GUI de MATLAB. Es una aplicación integrada de modelamiento y solución computacional de problemas de integración dinámica entre territorio, transporte y movilidad, desarrollada como parte de esta investigación. Está orientado para el análisis de: modelos macroscópicos.
5. La ciudad de baja densidad crece dejando vacíos intermedios y áreas inconclusas y deja tramos sin llenar en las zonas urbanizadas, calles sin terminar donde predomina la edificación de baja altura. La vía no concentra a tantas personas ni tantos usos, por eso su solución está orientada a la conexión de las grandes distancias que produce este modelo urbano. El énfasis es la conexión y no el recorrido en sí mismo. Derivado del caso de estudio que trata de ciudades medias de baja densidad analizadas con un dominio y subdominios continuos, se puede apreciar que en la medida en que se crea un nuevo territorio de atracción en la periferia con la extensión de unos ejes urbanos, la ciudad consolidada disminuye su fuerza

de atracción y experimenta un éxodo de ciertas actividades que encuentran una mejor localización en las zonas suburbanas.

6. Se determinó considerar como variables que determinan el patrón geográfico de la movilidad de las personas en las ciudades a: los viajes generados por cada zona origen; los viajes atraídos por cada zona destino; y las resistencias dadas para la movilidad entre cada par de zonas (impedancias o funciones de des utilidad), empleando diversas formas funcionales que relacionan tales variables. La distribución de viajes es el proceso mediante el cual se determinan las zonas de origen de los viajes relacionados con un destino, y los destinos de los viajes generados en un origen. Los patrones de uso del suelo que evolucionan de ciertas estrategias de planificación de transporte muestran variables significativas relacionadas al ingreso, aumento de la población, crecimiento económico, dinámicas sectoriales, y también esquemas de planificación de uso del suelo. Se presenta una aplicación del modelo de equilibrio de tráfico continuo para el análisis de invariantes territoriales en ciudades de baja densidad que tiene como objetivo resolver problemas críticos que se enfrentan en los trabajos de modelado de la red urbana.

Se ha utilizado un conjunto de capas de información digital con tablas de datos alfanuméricas asociadas a cada una de ellas y referidas a la misma porción del territorio, donde un lugar concreto tiene la misma localización (las mismas coordenadas) en todos los mapas incluidos en el sistema de información. De este modo, resultó posible realizar análisis de sus características espaciales y temáticas para obtener un mejor conocimiento de las variables intervinientes.

Sistema de análisis espacial. Un sistema de análisis espacial o territorial incluye, junto a los componentes tradicionales de consulta de bases de datos, la posibilidad de analizar datos, basándose en su localización. De hecho, esta capacidad para comparar elementos distintos o diferentes variables que se superponen en el territorio es sin duda el elemento distintivo. Por eso, este tipo concreto de análisis se realiza mediante el proceso de superposición (overlay), que llamamos así porque tiene el mismo carácter que la tradicional superposición de mapas transparentes.

Sistema de análisis por FEM. En el programa se incluyó la discretización por elementos finitos que permitieron desarrollar un conjunto de rutinas matemáticas, tanto para realizar cálculos no espaciales, como análisis de datos espaciales, que permiten descubrir patrones de comportamiento en esos datos y validar las hipótesis de trabajo.

Sistema de proceso de gráficos. Lo más novedoso del programa es aquél que permite la indexación de los cálculos correspondientes al modelo matemático, con las bases de datos que conformen los dominios y subdominios de la ciudad. Las más usuales son gráficos de zonas de viaje. El tratamiento de gráficos permite acceder una zonificación de viajes considerando la superficie isotrópica y anisotrópica.

El desarrollo de una base de datos espacial conlleva una simplificación de la realidad para adaptarla a un modelo de datos. Existen dos modelos de datos básicos, el modelo vectorial y el modelo raster.

- **Modelo vectorial.**- se considera que la realidad está dividida en una serie de objetos discretos (puntos, líneas, polígonos) a los que se puede asignar diversas propiedades, cualitativas o cuantitativas. Estos objetos se codifican por su posición en el espacio (puntos y líneas) o por las parcelas que limitan sus límites (polígonos). Los cambios de escala van a suponer en muchos casos que los objetos cambien de un tipo a otro.
- **Modelo raster o de retícula** se centra en las propiedades del espacio más que en la precisión de la localización. Divide el espacio en celdas regulares o píxeles, asignándole a cada una un valor para cada una de las variables consideradas. Los cambios de escala van a reflejarse en el tamaño de las celdillas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Abellanas M. Envolvente convexa, triangulación de Delaunay y diagrama de Voronoi: tres estructuras geométricas en una, con muchas aplicaciones. 2014;<http://www.dma.fi.upm.es/mabellanas>.
- [2] Aurenhammer F. Voronoi Diagrams - A Survey of a Fundamental Geometric Data Structure. ACM Computing Surveys, vol 23, n 3, pp 345-405. 1991;.
- [3] Banos A, Thévenin T. Geographical Information and Urban Transport Systems. Geographical Information Systems Series, ISTE Ltd., Edit. Wiley.; 2011.
- [4] Barthelemy M, Louf R. Modeling the polycentric transition of cities. Institut de Physique Theorique, CEA, CNRS-URA 2306, F-91191, Gif-sur-Yvette, France. 2013;.
- [5] Berg M, Cheong M, Van Kreveld M. Computational Geometry: Algorithms and Applications. Springer-Verlag, pp. 145-201.; 2008.
- [6] Bermúdez J. Rutinas para el cálculo acumulado de visibilidades y rutas óptimas: algunas reflexiones sobre prospección, SIG. Gestión y análisis espacial en arqueología, Arqueología Espacial 24-25, Prospección, Teruel. 2004;.
- [7] Bettencourt L. The Origins of Scaling in Cities. Santa Fe Institute, Paper 12-09-014, USA. 2012;.
- [8] Bosque Sendra J. Sistemas de información geográfica. Ediciones Rialp, 2da. edición corregida, 451 p., Madrid.; 1997.
- [9] Castells M. La cuestión urbana. Editorial Siglo XXI, ISBN 9788432301391.; 2004.
- [10] Cassidy PA D and Quinn. How the Irish invented Slang: The Secret Language of the Crossroads. Counter Punch Press, pp. 90-92.; 2007.
- [11] Cliff A, Ord J. Spatial Autocorrelation. Edit. Pion, Londres; 1973.
- [12] Codd EF. A relational model of data for large shared data banks. Communications of the ACM, 13(6):377-387. 1970;.
- [13] Couclelis H. People manipulate objects (but cultivate fields): beyond the raster-vector debate in GIS. Springer-Verlag. In Frank A. U., I. Campari, and U. Formen-tini, editors. Theories and Methods of Spatio-Temporal Reasoning in Geographic Space, vol. 639, Lecture Notes in Computer Science, pages 65-77; 1992.

- [14] Daganzo C. Requiem for second-order fluid approximation to traffic flow. *Transportation Research, Part B*, 29B , 277-286. 1994;.
- [15] De La Torre M. La urbanización de grandes ejes metropolitanos: Un proyecto de ordenación para la ciudad de baja densidad Guadalajara, México. Tesis Doctoral, Departamento de Urbanismo y Ordenación del Territorio, Escuela técnica superior de arquitectura de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya .; 2006. <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6962/01MEte01de16.pdf>.
- [16] Diaz B, Bell S. *Spatial Data Processing using Tesseral Methods*. Natural Environment Research Council, Reading, UK.; 1986.
- [17] Dinh H, Turk G, Slabaugh G. Reconstructing surfaces using anisotropic basis functions. *Actas International Conference on Computer Vision, ICCV*, Vancouver, Canada, pp. 606-613.; 2001.
- [18] Ericson J, Goldstein R. Work space: a new approach to the analysis of energy expenditure within site catchments. *Catchment Analysis: Essays on Prehistoric Resource Space*, Anthropology UCLA, Los Angeles, pp. 21-30.; 1980.
- [19] Escobar García DA. Instrumentos y metodología de planes de movilidad y transporte en las ciudades medias Colombianas. Edit. UPC, Barcelona.; 2008.
- [20] Fairén S. Se hace camino al andar? Influencia de las variables medioambientales y culturales en el cálculo de caminos óptimos mediante SIG. 2004;.
- [21] Felicísimo AM. Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. Edit. Pentalfa, pag.5.; 1994.
- [22] P G. Automatic Mesh Generation. Application to Finite Element Methods. Ed. John Wiley & Sons-Masson; 1991.
- [23] Graham R. An Efficient Algorithm for Determining the Convex Hull of a Finite Point Set. 1972;.
- [24] GTZ. Planificación del uso del suelo y transporte urbano. Proyecto Sectorial Servicio de Asesoría en Política de Transporte. Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo. División 44 de medio ambiente e infraestructura.; 2013.
- [25] Herce M, Magrinya F. La Ingeniería en la Evolución de la Urbanística. Departamento de Infraestructuras de Transporte y Territorio, UPC, Barcelona, pp. 07-18.; 2002.
- [26] Ho-Le K. Finite Element Mesh Generation Methods : A Review and Classification. 1988;.
- [27] Jarvis R. On the Identification of the Convex Hull of of a Finite Set of Points in the Plane. 1973;.
- [28] Kikuchi N. Adaptive Grid-Design Methods for Finite Element Analysis. 1986;.
- [29] Lohner R. Automatic Unstructured Grid Generators. *Finite Elements in Analysis and Design*, vol 25, pp 111-134. 1997;.

- [30] Llobera M. Understanding movement: a pilot model towards the sociology of movement; 2000.
- [31] Martínez F. Towards a microeconomic framework for travel behaviour and land use interactions. In perpetual motion: Travel behaviour research Opportunities and application changes H S Mahmassani, Elsevier; 261-276. 2002;.
- [32] McFadden D, Domencich SR. Urban travel demand: A behavioral analysis. New York, American Elsevier. 1975;.
- [33] Miller CL, Laflamme RA. The theory and application of the digital terrain model. Thesis (M.S.), Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Civil and Sanitary Engineering.;.
- [34] Munizaga G. Tipos y Elementos de la Forma Urbana. Editorial Universidad Católica de Chile, Pag. 56 y 57.; 1993.
- [35] Olaya V. Sistemas de Información Geográfica. Creative Commons Atribucion.; 2011. http://wiki.osgeo.org/wiki/Libro_SIG.
- [36] Olaya V. Sistemas de Información Geográfica (Capítulo 23. Geomorfología y Análisis del Terreno) Edición 1, Revisión 26; España, 2007. http://svn.osgeo.org/osgeo/book/es/libro_sig/.
- [37] Ortúzar JdD. Modelos de Demanda de Transporte. Alfaomega Ediciones, Universidad Católica, Chile.; 2000.
- [38] Orueta G. Prácticas de Análisis Espacial. Reporte Técnico, Universidad de Barcelona, Oikos-Tau, pp. 384-385.; 1995.
- [39] Owen S. A Survey of Unstructured Mesh Generation Technology. 1998;.
- [40] Peucker TK, Fowler RJ, Little RJ, Mark DM. The triangulated irregular network. In Proceedings, American Society of Photogrammetry: Digital Terrain Models (DTM) Symposium, St. Louis, Missouri, May 9-11, pages 516-540.; 1978.
- [41] Preparata F, Shamos M. Geometría Computacional. Monografía de Ciencias de la Computación, Springer-Verlag.; 1985.
- [42] Rodríguez Villalobos A. Estudio del efecto de la asimetría en problemas de rutas de vehículos.. Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Valencia. ISBN: 978-84-8363-847-7.; 2012.
- [43] Rueda S. La ciudad compacta y diversa frente a la conurbación difusa. 2000;.
- [44] Sarriá F. Sistemas de Información Geográfica. Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.; 2012. <http://www.um.es/geograf/sigmur/>.
- [45] Sasaki T, Iida Y, Yang H. User-Equilibrium Traffic Assignment by Continuum Approximation of Network Flow. Proceedings of the 11th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Yokohama, Elsevier, 233-252. Japón, 1990;.

- [46] Seguí JM, Martínez MR. Los sistemas inteligentes de transporte y sus efectos en la movilidad urbana e interurbana. 2004;.
- [47] Shephard M. Approaches to the Automatic Generation and Control of Finite Element Meshes. 1998;.
- [48] Stover VG, Koepke FJ. Transportation and Land Development. Prentice Hall, Institute of Transportation Engineers, Washington DC.; 1998.
- [49] Thacker W. A Brief Review of Techniques for Generating Irregular Computational Grids. 1980;.
- [50] Thompson J. Structured and Unstructured Grid Generation. 1992;.
- [51] Trauth M. MATLAB Recipes for Earth Sciences. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, University of Potsdam, Department of Geosciences.; 2006.
- [52] Verástegui Rayo D. Estimación de matrices origen-destino y calibración de parámetros en el problema de asignación de tráfico en redes congestionadas.. Tesis de Doctorado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Ciudad Real de la Universidad de Castilla La Mancha.; 2006. <http://www.uclm.es/profesorado/dverastegui/DOCUMENTOS/TESIS/WEBCAP0.pdf>.
- [53] Wegener M. Advanced Modelling in Integrated Land-Use and Transport Systems. AMOLT, M.Sc. Transportation Systems TU Munchen.; 2009.
- [54] Wegener M, Furst F. Land-Use Transport Interaction: State of the Art. Berichte aus dem Institut fur Raumplanung, Universitat Dortmund.; 1999.
- [55] ;. .



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA
Oficina de Gestión de la Investigación

RECOMENDACIONES GENERALES PARA LA REDACCIÓN DEL INFORME FINAL 2015

1. **Carátula:** Considerar la información correspondiente, incluyendo "Informe Final" y fecha actualizada. No olvidar que la modificación del título necesita autorización previa del Coordinador de la Unidad de Investigación e Innovación, aprobada por el Consejo de Facultad.
2. **Agradecimiento:** Es opcional y se trata de reconocer a personas y/o instituciones que han hecho posible la investigación, incluyendo el apoyo financiero o logístico.
3. **Resumen:** Debe escribirse en español y en inglés, debiendo contener 250 palabras como máximo, expresando el propósito del trabajo, procedimiento, resultados, impacto y aporte científico. Concluye con las palabras clave.
4. **Introducción:** Describir la importancia del tema abordado, el fundamento científico y el contenido del propio informe final.
5. **Revisión de literatura:** Comenzar con antecedentes y desarrollar los temas considerados específicamente en torno al título del Informe. No deberá exceder de 15 páginas.
6. **Materiales y Métodos:** Describir la metodología utilizada.
7. **Resultados:** Presentar los resultados ya sea en tablas, figuras, fotografías, flujogramas y otras formas, debiendo colocar en cada caso la numeración correlativa y el título correspondiente.
8. **Discusión:** Desarrollar la discusión en base a la revisión de la literatura presentada y tomando en cuenta información actualizada de artículos, libros, capítulos de libro, resúmenes de congresos, etc.
9. **Conclusiones:** Deben reflejar la síntesis de los resultados y el logro de los objetivos.
10. **Referencias bibliográficas:** Redactar esta sección tomando en cuenta las recomendaciones del Estilo Harvard (para las áreas de ciencias y letras en general) y el Estilo Vancouver (para el área de ciencias de la salud).
11. El artículo científico no lleva Revisión de literatura ni conclusiones, máximo 15 páginas.

NOTA: Presentar 03 ejemplares impresos y una copia en formato digital (CD) del Informe Final 2015 a la Coordinación de su Unidad de Investigación e Innovación.

Ayacucho, 10 de diciembre de 2015

OFICINA DE GESTION DE LA INVESTIGACION

COMPLEJIDAD ESTRUCTURAL EN LA MÉTRICA DE CIUDADES PARA EL ANÁLISIS DEL EQUILIBRIO TERRITORIAL DE REGIONES

Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga - Ayacucho, Perú

MSc. Ing. Cristian Castro Pérez

Resumen: 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, configuración de red y el efecto de las superficies de fricción. Se estudia el impacto del territorio, discretización, configuración, puntos atractores, demanda, en las zonas de viaje, volumen de viaje, flujo de tráfico, mediante la realización de experimentos computacionales de los modelos de programación matemática, 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 los subdominios, la discretización, localización de actividades; y se subraya la importancia de la obtención de las zonas de viaje de acuerdo a la distancia afectada por las superficies de fricción que permitirá el análisis de la vulnerabilidad en las redes de sistemas de transporte.

Área: Transportes

Palabras Clave: transporte urbano, modelo basado en actividades, transporte y uso de suelo.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Antecedentes.

La mayoría de las ciudades de baja densidad comenzaron siendo una plaza o un mercado. Con el tiempo, sin embargo, acabarían desarrollando centros de trabajo, comercio o juego. De hecho, ninguna ciudad existente hoy posee un único centro. Actualmente, se tienen diversas investigaciones que tratan de los mecanismos que gobiernan la transición de una ciudad con un solo centro a una policéntrica, que se debe a la aglomeración de las actividades económicas, el tamaño de la población y la congestión circulatoria; de tal forma que se tienen modelos matemáticos que describe la manera en que una ciudad y los suburbios de su periferia desarrollan varios centros. *"Existe una tensión entre cuán atractivo resulta el centro y cuánto cuesta llegar hasta él"* (Berthelemy, 2013). En un principio todo el mundo va allí; pero, a medida que la población aumenta, cada vez resulta más difícil acceder a él. Al final, comienzan a surgir otros subcentros en la periferia, ya que su aparición facilita las actividades laborales y comerciales de los residentes. Las ciudades con un sistema de transporte eficiente permanecen centralizadas durante más tiempo; pero, una vez que se supera cierto umbral, se convierten inevitablemente en policéntricas.

Los modelos continuos tienen algunas ventajas en redes densas (Sasaki, 1990) ya que requiere menor cantidad de información, no necesita la construcción detallada del grafo de la red, utiliza menos recursos computacionales y puede brindar una visión rápida del impacto que se produce ante un cambio en la red. Existen estudios, basados en este enfoque, tanto para resolver problemas de asignación y combinados de distribución-asignación (Wong y Sun, 2000), (Ho y Wong, 2006). Se tiene dos enfoques para los problemas de equilibrio de tráfico (Wong, 2011): enfoque de modelado discreto (Patriksson, 1994), (Gendreau y Marcotte, 2002), (Lee, 2003); enfoque de modelado continuo para configuración idealizada de la ciudad (Lam y Newell, 1967); (Zitron, 1967); (D'Este, 1987); (Wong, 1994) o una configuración general de ciudad (Beckmann, 1952), (Wardrop, 1971), (Williams y Ortuzar, 1976), (Puu, 1977), (Buckley, 1979), (Dafermos, 1980), (Sasaki et al., 1990), (Yang et al., 1994), (Wong, 1998).

Ha habido mucho interés para enlazar los modelos en un sistema integrado (Timmermans, 2003), (Miller, 2002). Varios investigadores han desarrollado diseños conceptuales de sistemas de modelos integrados y otros han tratado de poner en práctica sistemas de modelos conjuntos mediante el acoplamiento de los modelos a través de los procesos de intercambio de datos (Salvini, 2005). Prácticamente todos los intentos de integrar el uso de la tierra y la modelización del transporte se han centrado en intentar vincular el uso de modelos de microsimulación de tierras con modelos de viaje basados en actividad (Waddell, 2007) y hay otros intentos de vincular los modelos basados en actividad con modelos de asignación de tráfico dinámicos y simuladores (Lin, 2008), (Kitamura, 1998).

En 2006 la IATBR, presentó el documento de modelado integrado, en el cual indica: *"sin un marco conceptual coherente y consistente (que tiene implícito en su interior un debido respeto por la fidelidad de comportamiento y el contexto), los avances en el desarrollo de un modelo de sistema que integra una variedad de procesos socio-económicos, una multiplicidad de actores, y un continuo de escalas espacio-temporales tiene pocas posibilidades de ser ad hoc a la naturaleza y difícil de defender, ya sea en la investigación o contextos de aplicación"* (Miller, 2006).

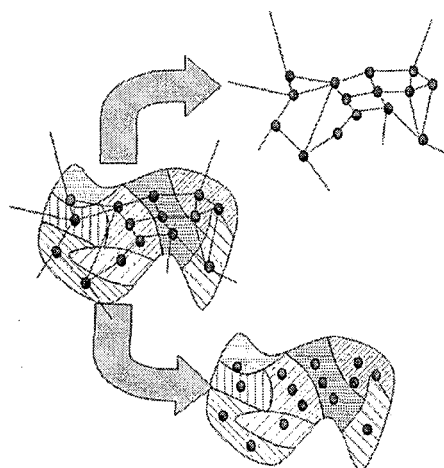


GRÁFICO 1. ALTERNATIVAS DEL MODELADO DE CIUDADES Y REDES DE TRANSPORTES (FUENTE: ROMERO, BENÍTEZ)

1.2. Consideraciones generales.

"Si se sabe dónde trabaja la gente, pueden reconocerse los centros de actividad", (Berthelemy, 2013), pues a medida que aumentan los habitantes, también lo hace la cantidad de centros; sin embargo, ese aumento no es lineal (si la población se multiplica por 10, el número de centros aumenta en un factor 5). Levinson señala que un mejor conocimiento de los patrones que rigen la evolución de las áreas metropolitanas podría resultar útil, si tenemos en cuenta que para 2050 se espera que dos tercios de la humanidad vivan en entornos urbanos. *"Si los urbanistas piensan que una ciudad adquirirá cierta forma pero después resulta que no tiende a comportarse así, estaremos desperdiciando recursos"*. Es en este contexto donde adquiere una especial relevancia la planificación del transporte urbano, la que tiene como objetivo predecir y controlar la evolución del equilibrio O-D.

El énfasis puesto en infraestructuras como símbolo de progreso, desequilibró los elementos necesarios para producir una estructura de ciudad (De La Torre, 2006). La "red", asociada a una visión de la ciudad como un sistema estable de actividades, ha sido una constante en el planeamiento y dimensionado de las vías, considerando a las actividades como la variable que predeterminaba la forma y nivel de servicio que debería alcanzar la red para mantener la eficacia del sistema (GTZ, 2013).

2. DESARROLLO

2.1. Modelos de redes urbanas.

El sistema de transporte es una interacción entre los usuarios y sus necesidades de desplazarse de un lugar a otro; esta interacción hace que dicho sistema atienda la demanda de servicio. La obtención de los flujos vehiculares en la red de transporte generalmente se realiza utilizando el proceso conocido como "*proceso de 4 etapas*". En este proceso se siguen, dos enfoques:

- a) **Enfoque discreto.**- el más desarrollado y ampliamente utilizado, la ciudad se divide en zonas de características semejantes y se asume que toda la actividad de las mismas se concentra en "centroides" que son los que generan y atraen los viajes hacia y desde otras zonas y las calles e intersecciones se representan como arcos y nodos de un grafo dirigido. En este caso, cada arco tiene una función asociada que representa el costo (Sheffi, 1985), (Patriksson, 1994), (Gendreau y Marcotte, 2002), (Lee, 2003)

La ciudad se divide en zonas de características semejantes y se asume que toda la actividad de las mismas se concentra en centroides que generan y atraen los viajes y las calles e intersecciones se representan como arcos y nodos de un grafo dirigido.

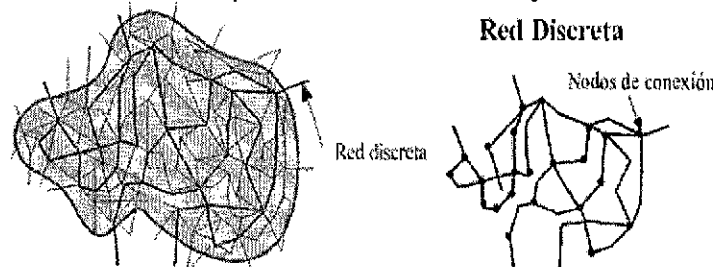


GRÁFICO 2. MODELADO DEL ENFOQUE DISCRETO

- b) **Enfoque continuo.**- la red densa es aproximada a un continuo donde los conductores son libres de elegir sus rutas en un espacio bidimensional, y se acepta que la variación en áreas cercanas es pequeña comparada con el sistema completo y las características del sistema de transporte como flujo y costo pueden ser representadas con funciones continuas (Sheffi, 1985). Puede ser con una configuración idealizada o general de la ciudad (Wong, 1998)

La red densa es aproximada a un continuo donde los conductores son libres de elegir sus rutas en un espacio bidimensional, y se acepta que la variación en áreas cercanas es pequeña comparada con el sistema completo y las características del sistema de transporte como flujo y costo pueden ser representadas con funciones matemáticas continuas.

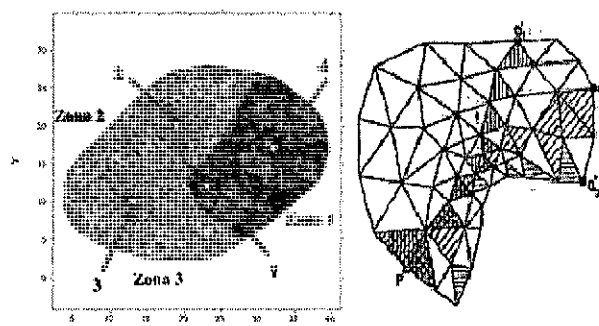


GRÁFICO 3. MODELADO DEL ENFOQUE CONTINUO

2.2. 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 de estudio se concentran en este punto.
- **Vías.**- es la representación simplificada del sistema vial.
- **Límites.**- es el borde que encierra al área de estudio.

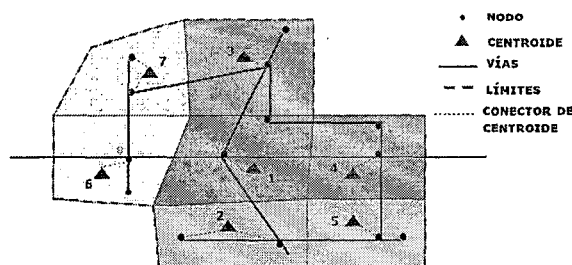


GRÁFICO 4. MODELO DE ZONIFICACIÓN DE CIUDADES

2.3. Generación de viajes.

Históricamente, las matrices O-D han sido estimadas en base a metodologías diferentes (Verastegui, 2006):

- a) Estimación directa.- mediante un proceso de encuestas domiciliarias o viarias (directas sobre una muestra de vehículos o por ficha proporcionada a conductores, o indirecto por captación de números de matrículas).
- b) Estimación por modelos de demanda.- mediante un modelo de distribución (modelo de gravedad). Aplica modelos sintéticos, de demanda de viajes, al sistema de transporte actual para obtener estimaciones de los flujos O - D.
- c) Estimación mediante conteos de tráfico.- mediante conteos de tráfico a fin de actualizar una matriz O-D preexistente. Esta alternativa es la más profusamente utilizada en los últimos 35 años y ha dado lugar a varias contribuciones (Low, 1972).

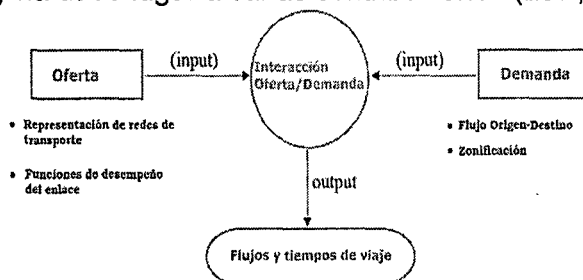


GRÁFICO 5. DEFINICIÓN CONCEPTUAL DE PAT

El atributo **propósito** de viaje está compuesto por dos elementos: base y motivo. Como **base** se entiende el lugar en que comienza o termina un viaje distinguiendo entre basados en el hogar y no basados en el hogar.

Como **motivo** se consideran los siguientes: trabajo, compras, estudio y otros motivos. De acuerdo a la práctica habitual los propósitos de viaje considerados son los siguientes:

- Basados en Hogar-Trabajo (BHT).
- Basados en Hogar-Estudio (BHE).

- Basados en Hogar-Compras (BHC).
- Basados en Hogar-Otros motivos (BHO)
- No Basados en el Hogar (NBH)

El atributo horario en que se realiza el viaje, se consideran viajes en hora pico y viajes diarios. Este último caso es el más común, ya que a partir de los viajes diarios y mediante factores horarios se pueden calcular los volúmenes en cualquier hora del día. La generación de viajes puede dividirse en dos pasos: 1) determinación del número de viajes originados en cada zona (**producciones**) y 2) determinación del número de viajes destinado a cada zona (**atracciones**).

3. METODOLOGÍA.

3.1. Procedimiento para determinar el transporte en ciudades medias.

En el actual esquema de funcionamiento de las aglomeraciones urbanas en ciudades medias, se presentan disfuncionalidades en la movilidad urbana, lo cual se traduce en congestión, contaminación, inseguridad, elevados costos operacionales, etc. Se busca comprobar si las metodologías de modelación del tráfico urbano, usadas por los diferentes estudios sobre el tema se pueden aplicar en diferentes ciudades medias, con la adecuada integración de parámetros intrínsecos definidores de forma de ciudad, vinculados a las superficies de fricción, realizando paralelismos entre los diferentes modelos aplicados y estudiando sus resultados.

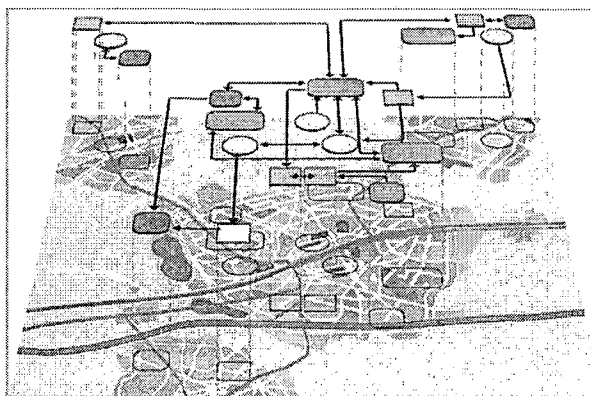


GRÁFICO 6. RELACIONES FUNCIONALES EN CIUDADES MEDIAS

Se muestra una red y sitios turísticos de una ciudad; los nodos cuadrados denotan lugares turísticos y los nodos redondos denotan estaciones de transporte; las líneas continuas indican las líneas de transporte, y las líneas de puntos se conectan cada estación hasta el sitio turístico más cercano en la distancia de transporte.

3.2. Interacción de transporte y uso de suelo en las regiones.

En la actualidad se está dando una generalización del modelo de ciudad difusa, en los países en vías de desarrollo donde las ciudades de tamaño medio, han alcanzado su desarrollo actual (Segui, 2004).

Este nuevo y generalizado modelo urbano acentúa la relocalización de la población, el comercio y los servicios hacia la periferia próxima, en tanto que relega la actividad industrial al espacio exterior de la urbe y en la que el centro tradicional queda reducido a una función simbólica. Una ciudad *"tiene de todo y mucho pero disperso, separado funcionalmente"* (Rueda, 2000) y, por tanto, presenta ciertos retos en términos de accesibilidad sólo superables por una movilidad motorizada, capaz de abarcar progresivamente mayores distancias (Verastegui, 2006).

3.3. Relación del transporte con territorio

Existen fundamentalmente 2 variables para estudiar los procesos de evolución en una ciudad, una está relacionada con las formas de crecimiento urbano, la otra en la definición de las etapas de crecimiento y desarrollo de la ciudad a lo largo de vida.

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, ligado a las urbanizaciones de vivienda unifamiliar y con un consumo muy grande de territorio), **agregación** (la ciudad crece por la aparición de fragmentos o barrios relativamente homogéneos entre sí, que se van agregando de a pocos) y **superposición** (la urbe se densifica por medio de grandes infraestructuras combinadas y superpuestas, con edificios).



GRÁFICO 7. MODELO INTEGRADO DE USO DEL SUELO Y TRANSPORTE EN REGIONES

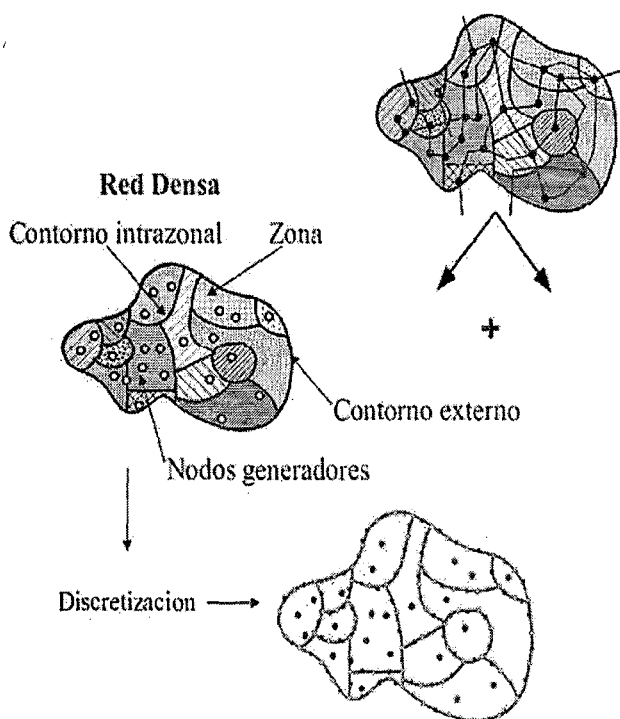


GRÁFICO 8. PROCEDIMIENTO DE DISCRETIZACIÓN PARA EL MODELADO EN CIUDADES

3.4. Geometría computacional.

Problemas estáticos:

- ✓ **Envolvente convexa.**- Dado un conjunto de puntos en el espacio, encontrar el poliedro convexo más pequeño que los contienen.
- ✓ **Diagramas de Voronoi.**- Dado un conjunto de puntos en el espacio (nodos), calcular una partición en regiones consistentes en todos los puntos más próximos a cada nodo
- ✓ **Triangulaciones.**- Partición del plano en triángulos, de manera que dos triángulos cualesquiera son disjuntos, o que comparten un borde o vértice.
- ✓ **Caminos más cortos.**- Dado un conjunto de obstáculos en un espacio, y dos puntos, encontrar el camino más corto entre puntos que no se intersectan con obstáculos.

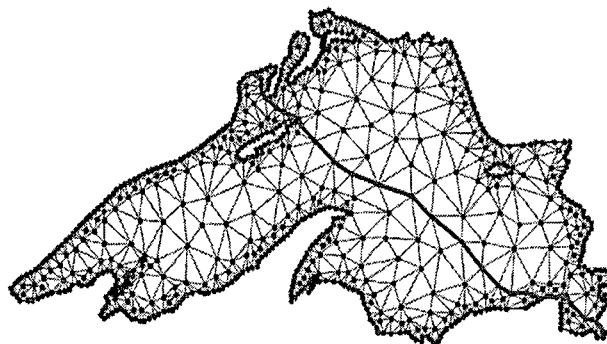
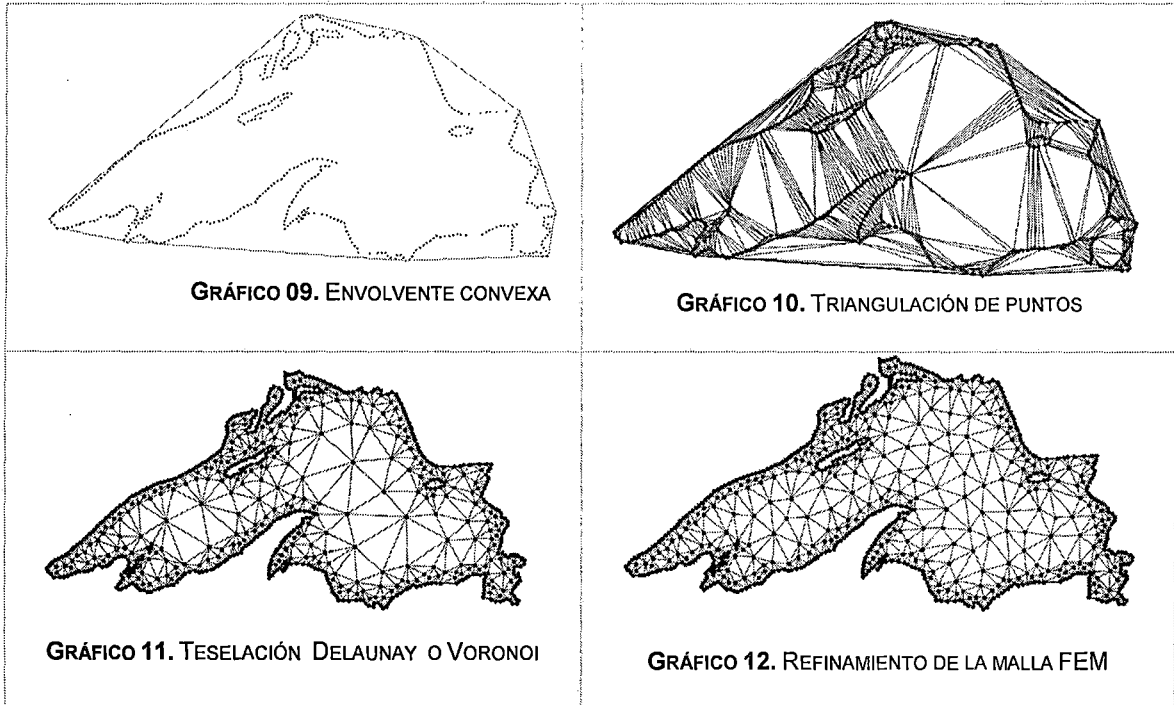


GRÁFICO 13. CAMINO MÁS CORTO EN EL DOMINIO

3.5. Características de la aplicación:

- 1) Ciudades medias, son capitales de departamento, región o núcleo metropolitano.
- 2) Posean una población entre 100000 y 750000 hab., que cuenten con transporte público urbano.
- 3) Las ciudades catalogadas como medias, poseen entre 30 y 250 Km² de extensión en su zona urbana.
- 4) Su distribución es relativamente homogénea sobre el territorio, con capacidad de difusión.

4. RESULTADOS.

Se aborda un enfoque vinculado al análisis cuantitativo de la red. Se propone una construcción del territorio diferente del enfoque tradicional basado en la dialéctica del centro y la periferia, y se plantea un enfoque alternativo sobre la evolución de la presencia de las 3 invariantes: *la malla, el nodo y la red*.

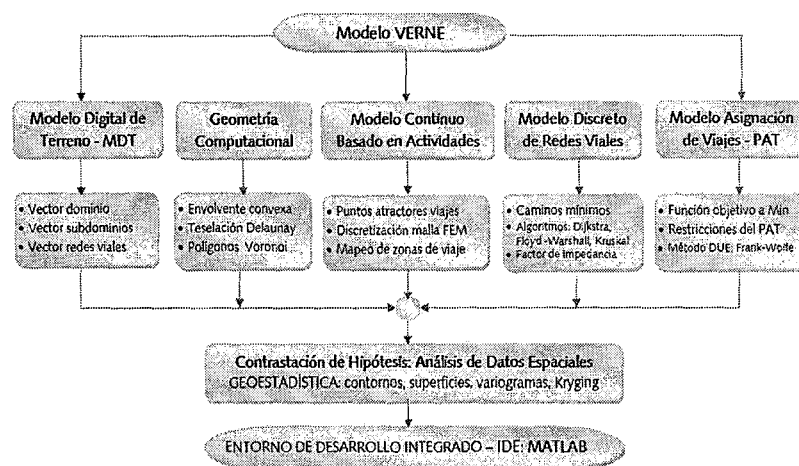


GRÁFICO 11. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA VERNE PARA DETERMINACIÓN DE ZONAS DE VIAJE

4.1. Programa VERNE.

Se presenta una aplicación informática, denominada **VERNE®**, que utilizará como plataforma de preproceso, solución y posproceso el GUI de **MATLAB**. Es una aplicación integrada de modelamiento y solución computacional de problemas de integración dinámica entre territorio, transporte y movilidad, desarrollada como parte de esta investigación. Está orientado para el análisis de: modelos macroscópicos de redes y modelos de asignación discretos y continuos. Entre las características a resaltar, se tiene una plataforma completamente integrada, en el cual es posible acceder desde una misma interfaz a todos los programas contenidos, lo que hace fácil e intuitivo para la representación de los modelos. Utiliza las funciones de *Matlab* para el análisis y representación de resultados (gráficos, solución de ecuaciones, etc.)

Se logró el desarrollo de un software en un lenguaje de programación de alto nivel, con el paradigma de programación estructurada; con una GUI aparente a los requerimientos de los diseñadores, que permitirá desarrollar estudios de las funciones flujo-costos para los modelos de asignación de tráfico que consideren la yuxtaposición de los parámetros intrínsecos. Este sistema ha sido desarrollado para diseño. El software es portable y escalable, permitiendo el modelado del tránsito sobre la totalidad del espectro de tamaños de red, desde una intersección en forma aislada hasta las redes de caminos nacionales. Este sistema puede ser validado con otras herramientas de modelado macroscópicas existentes, información de relevamientos de tránsito y observaciones realizadas en el terreno.

Dada la complejidad la asignación de flujo de tráfico, no existen reglas generales que produzcan el método idóneo para utilizar en cada caso. Cuando se realizó la puesta a punto de un programa VERNE (plataforma de operación) en sus distintos módulos como:

MOBILIS (programación estructurada del algoritmo Mobilis in Mobile "MiM" de creación de zonas de viajes en un continuo)

ASIGNACIÓN (programación estructurada del algoritmo Frank-Wolfe "F-W" para asignación de tráfico en redes discretas)

REDES (programación estructurada de los algoritmos de camino mínimo como el Algoritmo de Dijkstra, Algoritmo de Floyd-Warshall, Algoritmo de Bellman-Ford, Algoritmo de Kruskal, Algoritmo de Ford-Fulkersson para el diseño de experimentos de obtención de coeficientes de fricción en ciudades, considerando la asimetría de la red y la localización y medición de distancias)

GEOMETRÍA COMPUTACIONAL (programación estructurada del algoritmo de envolvente convexa, algoritmo de triangulación de DELAUNAY "DT", algoritmo de polígonos de VORONOI "VD" para la representación gráfica de superficies a partir de un conjunto de puntos de coordenadas (x,y,z) que generen Redes de Triángulos irregulares "TIN")

GEOESTADÍSTICA (programación estructurada diseñada para la prueba de hipótesis que aplique los métodos de estadística para análisis de datos espaciales que determinen los contornos, superficies, variogramas y otros parámetros para validar los datos y para limitar el número máximo de iteraciones que deben realizarse, pues puede suceder que un fallo de programación atenúe la convergencia.

4.2. Creación de zonas de viaje en ciudades: Módulo "Mobilis" - MiM

Esquema de trabajo del Algoritmo "MiM"- Programa VERNE - Módulo MOBILIS

Se propone un modelo de equilibrio de tráfico basado en el análisis continuo de las regiones donde se generan los viajes. El modelo se resuelve mediante algoritmo de solución basada en FEM para la discretización del dominio y la determinación de las zonas de viaje, de acuerdo a la dinámica de los puntos atractores basados en actividades y a la influencia de las superficies de fricción, con lo cual luego se procede a estimar el volumen de viajes.

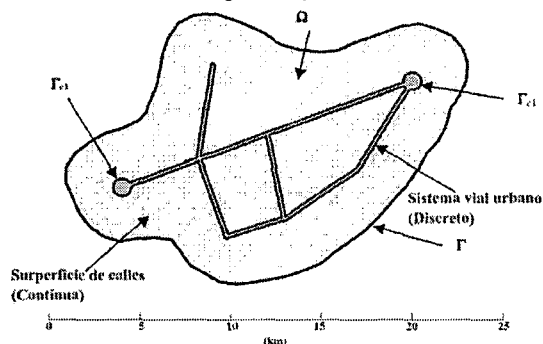
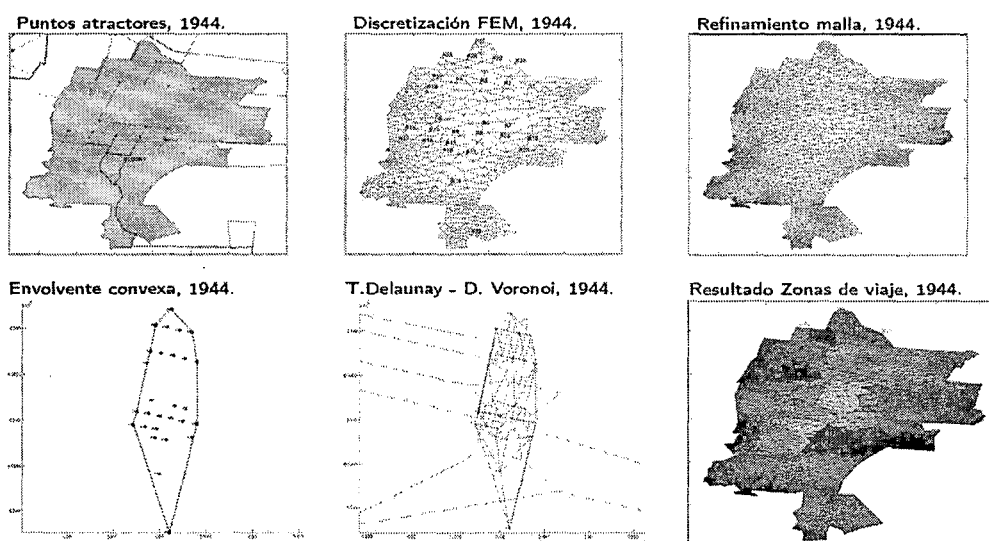


GRÁFICO 12. ESQUEMA DE TRABAJO DEL ALGORITMO "MiM"- PROGRAMA VERNE - MÓDULO MOBILIS

4.3. Resultados de Evolución Urbana



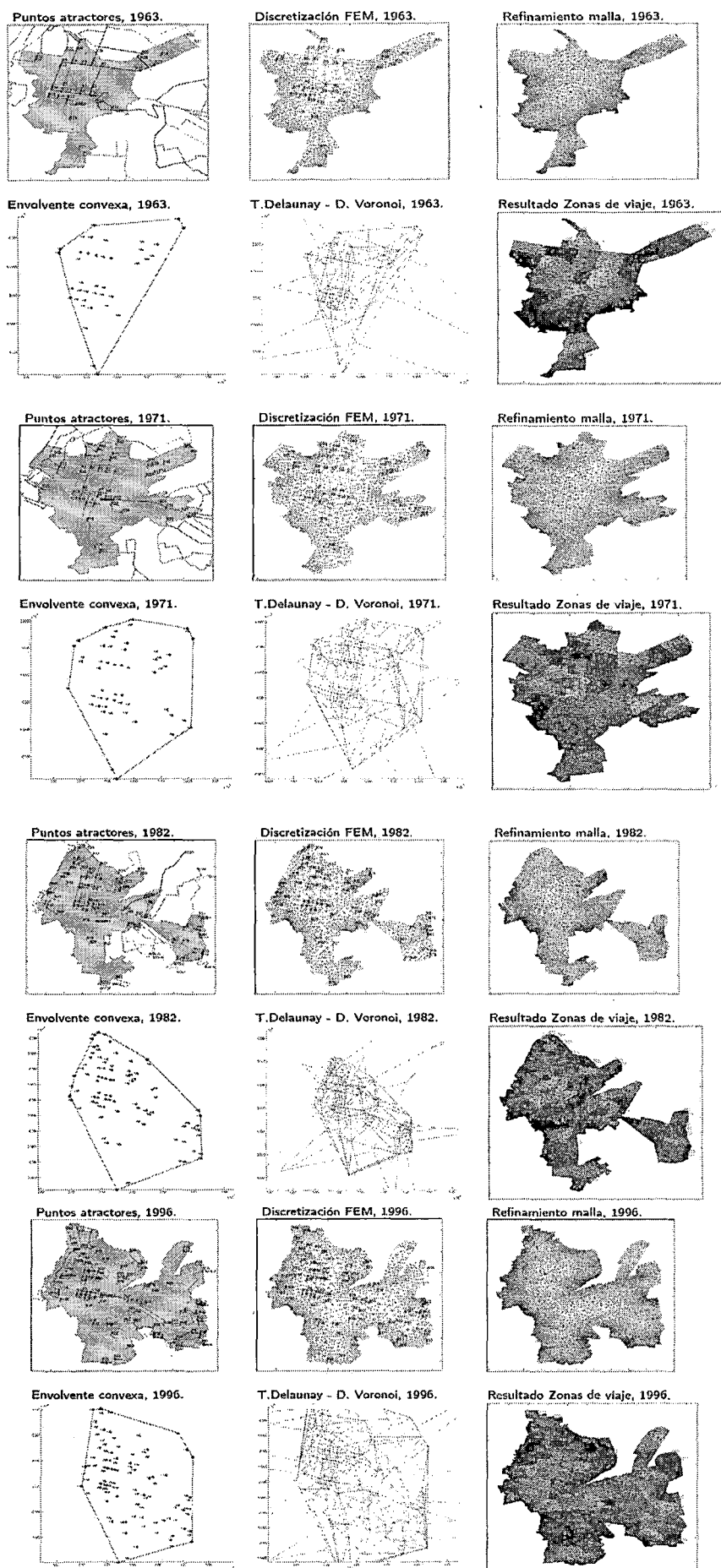


GRÁFICO 13. RESULTADOS DEL MODELO "MIM": EVOLUCIÓN URBANA DE AYACUCHO

4.4. Resultados simplificados de MOBILIS

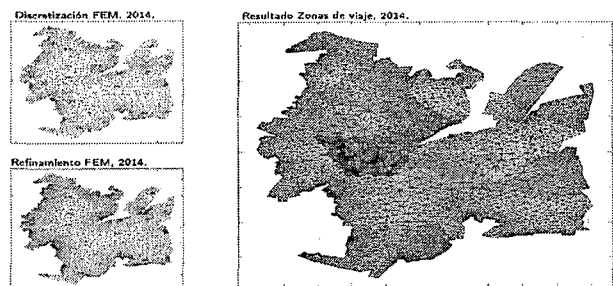


GRÁFICO 14. RESULTADOS SIMPLIFICADOS TIPO CBD CON MOBILIS, AYACUCHO 2016

4.5. Diseño de experimento.

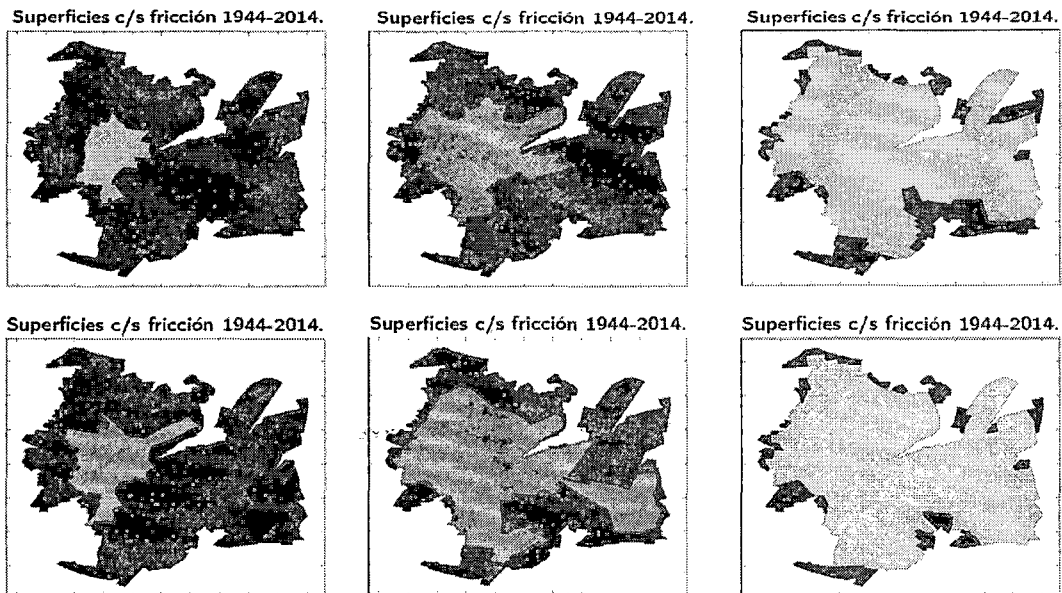


GRÁFICO 15. DISEÑO DE EXPERIMENTO CON EL PROGRAMA VERNE-MOBILIS

4.6. Resultados de mallado

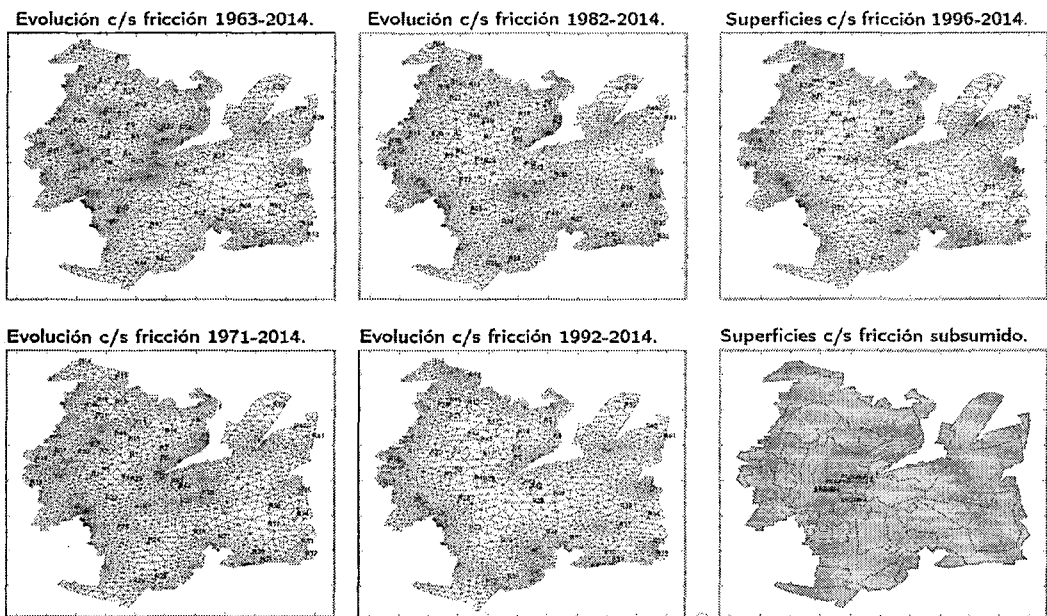


GRÁFICO 16. RESULTADOS DE MALLADO CON PROGRAMA VERNE-MOBILIS

4.7. Simulación con superficies de fricción

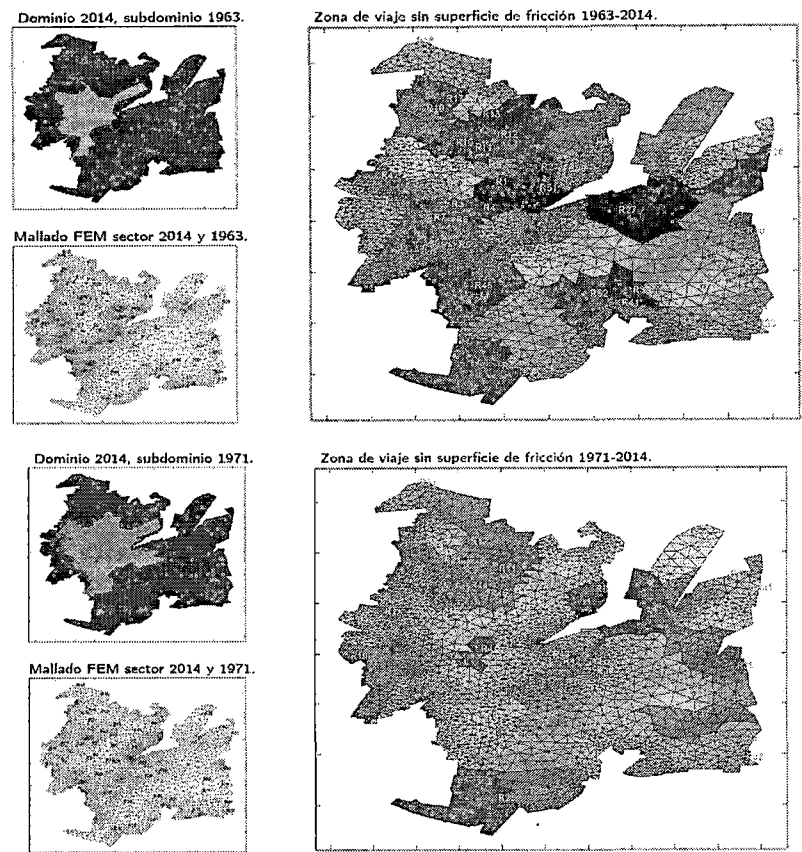


GRÁFICO 17. ZONA DE VIAJE-MODELO ISOTRÓPICO (46 ATRACTORES)

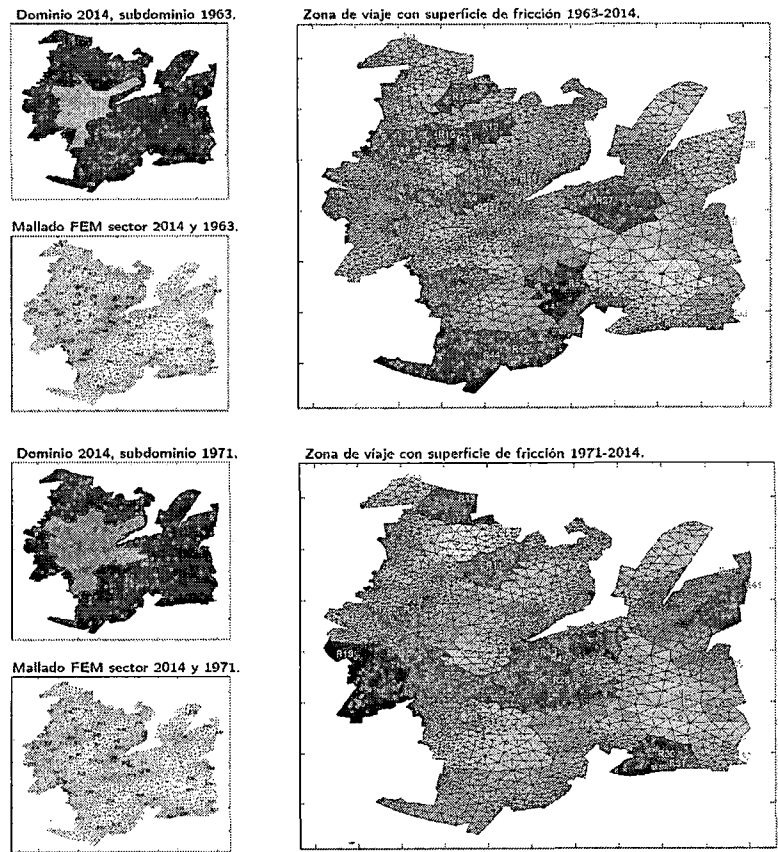
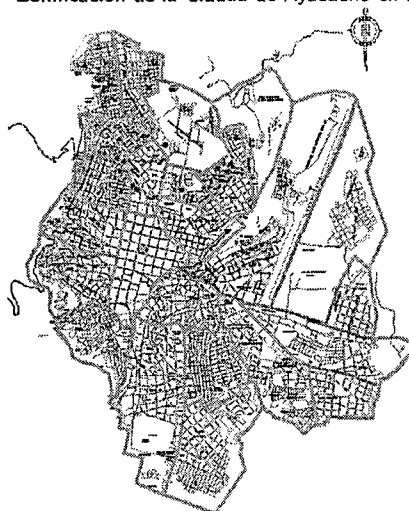


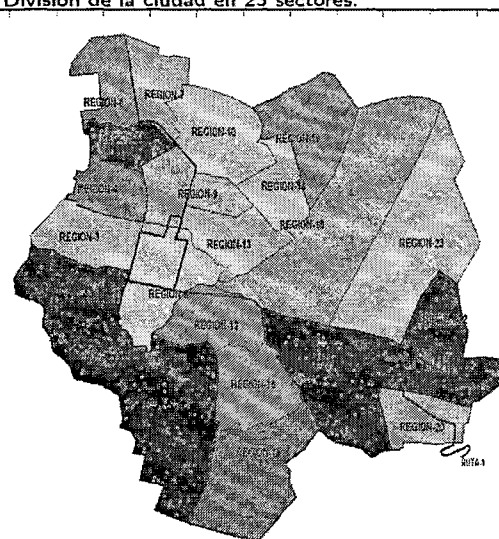
GRÁFICO 17. ZONA DE VIAJE-MODELO ANISOTRÓPICO 46 ATRACTORES)

4.8. Validación del modelo continuo.

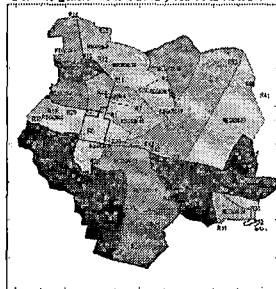
Zonificación de la Ciudad de Ayacucho en 23 sectores.



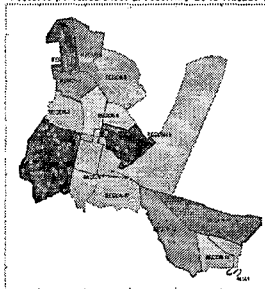
Division de la ciudad en 23 sectores.



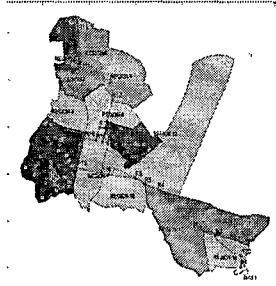
Domínio general de la ciudad y red de la Ruta10.



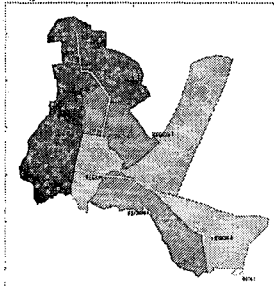
Sectores pertenecientes al recorrido de la Ruta10.



Atractores en el recorrido de la Ruta10.



Integración de sectores de influencia de la Ruta10.



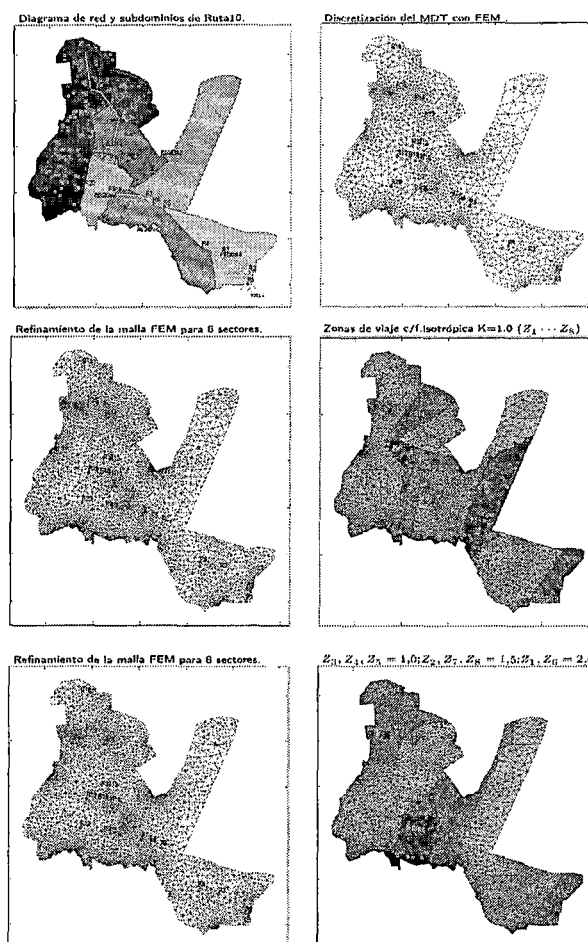


GRÁFICO 18. CREACIÓN DE ZONAS DE VIAJE: CASO DE ESTUDIO RUTA 10

4.9. Discusión de resultados.

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 EF; 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 EF y el atractor, medida en distancia, tiempo o costo.

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 MDT y MDE 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 EF y punto atractor de actividades) se puede medir en varias unidades de impedancia.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- (1) El enfoque continuo se presenta como una alternativa para el análisis de redes. Los sistemas urbanos de transporte requieren procesos distintos para situaciones de proyectos vinculados a intervenciones en invariantes que presentan superficies de fricción en flujo.
- (2) Se logró el desarrollo de un software en un lenguaje de programación de alto nivel, con el paradigma de programación estructurada. El software es portable y escalable, permitiendo la integración de modelo de uso de suelo y transporte, sobre la totalidad del espectro de tamaños de red. Se realizó la puesta a punto de un programa VERNE (plataforma de operación) en sus distintos módulos. El modelo "MiM" elaborado es competitivo en tiempo de preparación y ejecución y en precisión de los resultados y puede utilizarse como alternativo a los procedimientos habituales de simulación del tráfico basados en la carga de una matriz de viajes origen/destino sobre una red y para estudiar evolutivamente la integración de transporte y usos de suelo en ciudades medias.
- (3) La investigación desarrolla un modelo numérico para la tener zonas de viaje y a partir de ese resultado generar volúmenes de viaje calibrados con matrices O-D y/o aforos, tal que se pueda solucionar la asignación de tráfico en ciudades con congestión en las que existe una red de vías superpuesta sobre la red de calles. Se utiliza una malla de elementos finitos para discretizar la red de calles, lo que permite la obtención de buenas aproximaciones sin necesidad de elaborar un grafo de transporte para la red de calles. Se propone una construcción del territorio diferente del enfoque tradicional basado en la dialéctica del centro y la periferia, y se plantea un enfoque alternativo sobre la evolución de las 3 invariantes territoriales: la malla, el nodo y la red.

5. REFERENCIAS

- **Cecarelli, P.** (1976), Las incógnitas del tráfico urbano. Edit. G. Gili, Barcelona, España.
- **M. Herce y F. Robusté** (1997), Apuntes de Transporte y Territorio. Centre de Publicacions del Campus Nord. Barcelona. España.
- **Arboleda, Rivas, Solano, Rutaswin** (2005), Modelo de análisis de sistemas de transporte público. Facultad de Ingeniería Civil - Departamento de Vías y Transporte. Universidad del Cauca. VII Simposio de ingeniería de tránsito y transporte. Colombia.
- **M. Herce Vallejo y J. Miró Farrerons** (2002), El soporte infraestructural de la ciudad. Ediciones UPC, España.
- **Herce, M. y Magrinyà F.** (2002), La ingeniería en la evolución de la urbanística, Ediciones UPC, España.
- **Lane, Powell, Smith** (1975), Analytical Transport Planning, traducción de Santiago Téllez Olmo. Instituto de Estudios de Administración Local. Madrid. España.
- **Wardrop, J. G.** (1952), Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. Proceedings of the Institute of Civil Engineers Part II. pp. 325-378. U.S.A.
- **Ortúzar, J.D.** (2000), Modelos de Demanda de Transporte. Alfaomega Ediciones, Universidad Católica, Chile.
- **Beckmann M., McGuire C.** (1956) Studies in the Economics of Transportation. Yale University Press, New Haven, Connecticut; edit. Rand Corporation. U.S.A.
- **Sheffi Y.** (1985) Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. U.S.A.
- **Sánchez, J., Galán, M., Rubio, E.** (2008), Evolutionary Computation applied to Urban Traffic Optimization. Advances in Evolutionary Algorithms, Vienna, Austria.
- **G. Xu, W. Lam, K. Chan** (2004), Integrated approach for trip matrix updating and network calibration. Journal of Transportation Engineering, March-April 2004. U.S.A.
- **Cortínez, V., Dominguez, P.** (2010), Un modelo continuo anisótropo para el estudio del comportamiento del tráfico urbano congestionado. Journal Mecánica Computacional Vol XXIX, págs. 2173-2197, Eduardo Dvorkin, Marcela Goldschmit, Mario Storti (Eds.), Argentina, 2010.
- **Sasaki, T., Iida, Y., Yang, H.** (1990), User-Equilibrium Traffic Assignment by Continuum Approximation of Network Flow. Journal Proceedings of the 11th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Yokohama, Elsevier, Japón, 1990.
- **Olaya, V.** (2007), Sistemas de Información Geográfica (Capítulo 23. Geomorfología y Análisis del Terreno) Edición 1, Revisión 26, España, 2007, http://svn.osgeo.org/osgeo/book/es/libro_sig/.
- **Grupo Técnico de Consultoría** (2008), Estudio del Sistema de Transporte en la Ciudad: Plan Director de la Ciudad de Ayacucho. Municipalidad Provincial de Huamanga. Ayacucho, Perú, 2008.