

ALMA
Un modelo OO para estrategias de ajuste de
posiciones a mapas digitales

Dalponete, María Nieves¹ Lliteras, Alejandra Beatriz ²
Director: Dra. Gordillo, Silvia

07 de Noviembre de 2005

¹Nro. Alumno: 3110/1 - dalponete@sol.info.unlp.edu.ar

²Nro. Alumno: 1859/4 - lliteras@sol.info.unlp.edu.ar

Índice general

1. Introducción	7
1.1. Casos de estudio	7
1.2. Servicios Basados en Posiciones	9
1.3. Definición del problema	10
1.4. Estructura del trabajo	11
1.5. Contribuciones de la tesis	11
2. Conceptos generales	13
2.1. ¿Qué es un SIG?	13
2.2. ¿Qué son las aplicaciones móviles?	14
2.2.1. Modelo Clásico	14
2.2.2. Modelo Context- Aware	14
2.3. Sistemas de Información Geográfica Móviles	15
2.4. Visiones acerca de los Sistemas de Información Geográfica	15
2.5. La Información Geográfica	17
2.6. ¿Cómo se interpreta la información geográfica?	18
2.6.1. Sistemas de Coordenadas	19
2.6.2. Datum	23
3. Modelos terrestres	27
3.1. Mapas	27
3.1.1. Mapas digitales	28
3.2. Información Topológica	28
3.3. Modelos de representación	30
3.3.1. Enfoque basado en la posición	31
3.3.2. Enfoque basado en las entidades	36
3.3.3. Campos continuos	38
3.3.4. Comparación entre los enfoques	40

4. Sistemas de posicionamiento	43
4.1. Introducción	43
4.1.1. Clasificación	43
4.2. Dead Reckoning	44
4.2.1. Sistema Odométrico	46
4.2.2. Sistema de Navegación Inercial	48
4.2.3. Errores de Dead Reckoning	49
4.3. Sistemas de Posicionamiento Satelital	49
4.3.1. GPS	49
4.3.2. Otras Redes Satelitales	52
4.3.3. Degradación de precisión	52
4.4. Integración de sistemas de posicionamiento	52
5. Map Matching	55
5.1. Introducción	55
5.2. Definición del problema	56
5.3. Errores en la cartografía digital	57
5.4. Métodos Geométricos de Map Matching	61
5.4.1. Punto a Punto	61
5.4.2. Punto a Eje	62
5.4.3. Eje a Eje	64
5.4.4. Métodos geométricos considerando topología	65
5.5. Métodos Probabilísticos de Map Matching	67
5.5.1. Método probabilístico simple usando Belief Theory	68
5.5.2. Múltiples Hipótesis	69
6. ALMA	73
6.1. Arquitectura	73
6.2. Modelo Orientado a Objetos	76
6.2.1. Posicionamiento	76
6.2.2. Cartografía	78
6.2.3. Estrategias	79
6.2.4. Administración	87
7. Conclusiones	91
7.1. Conclusiones	91
7.2. Trabajos futuros	93
Bibliografía	95
A. Cálculos de geometría	99

Índice general

B. Vocabulario	101
C. Notación usada en el trabajo	103

Capítulo 1

Introducción

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), son sistemas que permiten capturar, almacenar, manipular, analizar y visualizar datos espacialmente referenciados a la Tierra [Longley 1991]. Estos sistemas se han empleado en diferentes áreas como la agricultura, planeamiento del uso del suelo, forestación, planeamiento catastral, etc. [Aronoff 1995].

Hoy en día y con el auge de las aplicaciones móviles, los SIG, se complementan con sistemas de posicionamiento (por ejemplo, GPS y GLONNAS) y mapas digitales, constituyendo un poderosa herramienta para *Servicios Basados en Posiciones* como por ejemplo los provistos con *Sistemas de Seguimiento Vehicular* o AVL (Automatic Vehicle Location) y *Sistemas de Navegación* [Schiller 2004].

1.1. Casos de estudio

Conocer de manera precisa la posición de un vehículo es útil para diversas aplicaciones. En esta sección se describe un conjunto de casos de estudio donde se manifiesta la necesidad de estimar y representar posiciones relativas a vehículos sobre cartografía digital. En algunos casos, además se necesita considerar los recorridos de dichos vehículos.

Para todos los casos de estudio se asume la existencia de:

- dispositivos emisores de posiciones instalados en los vehículos involucrados, y la existencia de una central encargada de recibir, procesar, analizar y visualizar dichas posiciones.
- información acerca de las redes de calles representadas como cartografía

digital

A continuación se describen tres casos de estudio.

Empresa Aseguradora de Vehículos

Una empresa aseguradora dispone de un sistema de seguimiento vehicular para monitorear los vehículos asegurados en ella. En este caso de estudio se presenta la aplicación de dicho sistema para brindar asistencia ante desperfectos mecánicos y corroborar la participación de un vehículo involucrado en un siniestro¹.

En el caso en el que un vehículo asegurado sufre un desperfecto mecánico y su conductor desconoce la dirección en la que el vehículo se detuvo. Al momento de llamar a su aseguradora, éste no es capaz de indicarle a la operadora donde se encuentra para que le envíen la ayuda necesaria. Sin embargo, dado que el vehículo está siendo monitoreado por la empresa aseguradora, el dato de su posición actual es conocido por el operador a partir de que el conductor informa ciertos datos de la póliza de seguro.

Por otro lado, cuando un asegurado denuncia un siniestro en un lugar y a una hora determinados, la aseguradora puede corroborar si el vehículo se encontraba en las inmediaciones de dicho siniestro en el momento indicado. Para esto emplea el sistema de seguimiento vehicular, el que realiza un análisis del recorrido procesado correspondiente al vehículo.

Empresa Transportadora de Caudales

Una empresa transportadora de caudales necesita conocer el recorrido exacto de sus vehículos con el objetivo de detectar cambios en las rutas preestablecidas para éstos. En este caso de estudio, el conductor de cada camión de caudales recibe, al salir de una base, instrucciones para seguir un recorrido establecido donde se detallan las calles a transitar y las paradas a realizar.

El conocimiento de la posición real de un vehículo permite detectar paradas inesperadas o desvíos imprevistos, señales que podrían indicar anomalías en el comportamiento del conductor.

¹Ver apéndice de Notación (C)

Asistencia al Viajero

La empresa aquí descrita asiste a sus clientes sugiriendo caminos que cumplen con características solicitadas por ellos. Sea el caso de un vehículo cuyo conductor desconoce la ciudad donde se encuentra y necesita llegar a una dirección determinada correspondiente a dicha ciudad. El conductor puede solicitarle a la empresa información de posibles caminos desde su posición actual hacia el destino. Para esto la empresa necesita conocer la red de calles de la ciudad en la que se encuentra el vehículo y su posición actual. Además puede tener en cuenta información de congestión de tránsito, calles en reparación y accidentes en la vía pública.

1.2. Servicios Basados en Posiciones

Los servicios basados en posiciones, se refieren a aplicaciones que poseen funciones de manejo de datos geospaciales y a la integración de información georeferenciada con otro tipo de datos [Peng 2003]. Ejemplos de estas aplicaciones son los Sistemas de Navegación y los Sistemas de Seguimiento Vehicular.

Los sistemas AVL obtienen, cada cierto intervalo de tiempo, la posición de un vehículo mediante equipo electrónico instalado en él para tal fin. Las posiciones generadas por este tipo de equipos son enviadas a una central de control. [NCDOT 2001]

Mediante el uso de un sistema AVL, es posible monitorear la posición y movimiento de vehículos.

Los Sistemas de Navegación integran sensores, posiciones, hardware y software de comunicación usados para guiar el movimiento de personas, vehículos y objetos en general, de un lugar a otro. Facilitan la navegación inteligente y automatizada mediante componentes de software y hardware [Schiller 2004]. Mínimamente, cualquiera de estos sistemas necesita determinar la posición absoluta del vehículo con respecto a información de cartografía digital [Najjar 2003]. El sistema puede asistir al usuario móvil en la toma de decisiones, por ejemplo, ayuda en la elección de caminos, advertencia de accidentes de tránsito, de embotellamientos y calles cerradas al tránsito vehicular. En estos casos, se requiere que la posición conocida del vehículo sea coherente con respecto a la cartografía digital, pues esta es usada en la toma de decisiones.

Estos sistemas pueden clasificarse incrementalmente en consideración de su capacidad. El primer grupo simplemente provee al usuario la habilidad

de hacer búsquedas en un mapa de diferentes maneras y mostrar los resultados gráficamente sobre un mapa. Por ejemplo, búsqueda de una dirección o algún punto de interés. El segundo grupo permite además localizar al usuario y graficar dicha posición sobre el mapa. Esta posibilidad requiere, en cuanto software, una mayor complejidad; y en cuanto a hardware requiere equipo adicional. El tercer grupo permite además asistir al usuario en la toma de decisiones.

Es importante notar que en el segundo grupo la posición del usuario provista por el equipo puede no coincidir con la red de calles. Este aspecto lo distingue del tercer grupo, donde la posición considerada debe tener una precisión aceptable de modo que el sistema esté capacitado para tomar decisiones de navegación [Bernstein 1996].

Los casos de estudio descritos en la sección anterior corresponden a Sistemas de Seguimiento Vehicular y a Sistemas de Asistencia en Navegación.

1.3. Definición del problema

De los casos de estudio descritos en la sección 1.1 se desprende la necesidad de manipular las posiciones recibidas para obtener respuestas en función de ellas.

Las posiciones estimadas por un sistema de posicionamiento, están sometidas a un cierto error de precisión. Debido a dicho error, las posiciones relativas a un vehículo pueden estar desplazadas respecto de la red de calles representada mediante cartografía digital. Este desplazamiento puede dificultar la visualización de las posiciones sobre la cartografía y la recuperación de los recorridos de los vehículos.

En el primer caso, se puede presentar una incoherencia en la visualización del comportamiento de un vehículo. Por ejemplo, ver que circule por las aceras en lugar de hacerlo por las calles. En el segundo caso, se necesita calcular los ejes viales^o por los que circuló el vehículo, valiéndose de las posiciones recibidas.

En ambos casos se requiere de alguna técnica de *ajuste de posiciones* para corresponder cada posición recibida con un eje vial y asociarla con una posición sobre éste.

1.4. Estructura del trabajo

El trabajo desarrollado se focaliza en sistemas basados en posiciones que trabajan con posicionamiento global. En este trabajo se propone un método para hacer coincidir información de posiciones con cierta imprecisión, basándose en la metodología orientada a objetos para modelar los aspectos inherentes y soportar el método propuesto.

En el Capítulo 2 se describen conceptos relevantes de los SIG y se menciona la evolución de estos sistemas en el tiempo. Se incluyen conceptos básicos sobre las aplicaciones móviles y su relación con ciertos sistemas de información geográfica.

El Capítulo 3 describe conceptos relacionados con la abstracción del dominio geográfico para aplicaciones SIG. Se presentan y comparan distintas representaciones de la información geográfica.

En el Capítulo 4 se describen diferentes técnicas actualmente usadas para la estimación de la posición de un vehículo. A continuación se describen los posibles errores a los que están sometidos estos sistemas y finalmente se describen distintas técnicas de corrección de las posiciones con respecto a cartografía digital.

En el Capítulo 5 se definen técnicas para ajustar posiciones a cartografía digital.

En el Capítulo 6 se relacionan los conceptos definidos en los capítulos anteriores y se presenta la arquitectura de un sistema de ajuste de posiciones estimadas y un modelo orientado a objetos para el ajuste de dichas posiciones a mapas digitales.

En el Capítulo 7 se presentan conclusiones acerca de las estrategias de ajuste de posiciones y el modelo orientado a objetos propuesto. Además se proponen trabajos futuros.

1.5. Contribuciones de la tesis

Se propone una clasificación de modelos de representación del espacio geográfico. Se realiza un estudio exhaustivo de los sistemas de posicionamiento para luego proponer una definición del proceso de *Map Matching* y del problema a abordar. Se propone luego, una categorización de las estrategias de *Map Matching* y se formalizan los requerimientos acerca de la cartografía digital a contemplar en este proceso. Se propone una arquitectura modular para implementar un sistema de ajuste de posiciones y finalmente se presenta un modelo orientado a objetos para implementar el ajuste de posiciones.

Capítulo 2

Conceptos generales

En este capítulo se introducen conceptos generales de los Sistemas de Información Geográfica, relevantes para las secciones subsiguientes y se describe una breve reseña de su evolución en el tiempo y su relación con las aplicaciones móviles.

2.1. ¿Qué es un SIG?

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son sistemas usados para manipular información geográfica (este concepto es ampliado en la sección 2.5). Han evolucionado hasta convertirse en herramientas esenciales para el uso efectivo de la información geográfica [Aronoff 1995].

La evolución de los SIG ha sido altamente influenciada por el progreso de la tecnología de la información, llevándolos desde los SIG de oficina hacia los distribuidos incluyendo a los SIG móviles [Peng 2003].

Los SIG de oficina típicamente se clasifican en stand-alone y en los que corren en una red de tipo LAN^o.

Los SIG stand-alone centralizan toda su funcionalidad en la misma máquina sin existir comunicación entre distintos equipos, mientras que los que corren en una LAN, generalmente adoptan una arquitectura de tipo Cliente-Servidor^o. En este tipo de SIG cada máquina cliente posee instalada la aplicación SIG y se comunica con servidores pertenecientes a la LAN.

Por otro lado, los SIG distribuidos, no necesariamente requieren que el usuario instale un programa SIG en su máquina personal, éste puede trabajar a través de Internet o redes wireless^o de comunicación.

2.2. ¿Qué son las aplicaciones móviles?

Una aplicación móvil consiste de un programa corriendo en un dispositivo móvil que le entrega algún resultado a un usuario móvil.

A raíz del párrafo anterior, necesitamos definir dos conceptos, por un lado que es un dispositivo móvil y por otro lado, que es un usuario móvil.

Un **dispositivo móvil** es un aparato portable que recurre a la tecnología inalámbrica para la transmisión y la recepción de datos. Existen diferentes tipos de dispositivos móviles como por ejemplo los teléfonos con tecnología GSM y las PDA's. Existen limitaciones propias para este tipo de dispositivos, como por ejemplo, la alimentación con batería, capacidad de almacenamiento limitada, bajo poder de procesamiento y tamaño reducido de la pantalla [Rupnik 2004].

Un **usuario móvil** es aquel que no se encuentra siempre en la misma posición física operando su dispositivo móvil. Las aplicaciones móviles asumen usuarios móviles accediendo a la información de una central u organización.

Existen dos modelos para las aplicaciones móviles, que se describen a continuación.

2.2.1. Modelo Clásico

Se basa en un modelo *pull*, donde la aplicación trabaja bajo demanda. En este modelo el usuario móvil, ejecuta una aplicación móvil indicando su necesidad puntual. La desventaja que se resalta de este tipo de modelo es que el usuario carece de actualización de información importante en momentos críticos para la información en si misma o para la organización, si tenemos en cuenta que el usuario móvil decide cuando acceder a la información de la organización a la cual pertenece.

2.2.2. Modelo Context- Aware

Este tipo de aplicaciones se basan en el concepto de contexto. Según la definición de [Dey 2000], "El contexto es cualquier tipo de información que pueda ser utilizada para caracterizar la situación de una entidad. Una entidad puede ser una persona, un lugar o cualquier objeto que pueda ser relevante para la interacción entre el usuario y la aplicación, incluyendo al usuario y a la aplicación".

Entonces es posible decir que una aplicación móvil es context aware si usa el contexto para proveer información relevante y/o servicio al usuario, donde la relevancia depende de la tarea del usuario. Este tipo de aplicaciones usa el

contexto para proveerle información al usuario.

La diferencia sobre el modelo clásico de aplicaciones móviles se centra en la generación de información ya no bajo demanda del usuario, sino en función del contexto del mismo.

2.3. Sistemas de Información Geográfica Móviles

Una vez introducido el concepto de aplicación móvil, se traslada este concepto a los sistemas de información geográfico.

Este tipo de SIG hace referencia al acceso y uso de datos y funciones propias de un SIG mediante dispositivos wireless y móviles, como por ejemplo PDA's como una Palm y dispositivos pocket PC. Con la mejora introducida a lo largo de los años en la tecnología de la comunicación wireless, Internet y en tecnología GPS^o (este tema se retomará en capítulos siguientes), los SIG móviles manifiestan jugar un rol importante en la adquisición y validación de datos (espaciales y no espaciales en tiempo real) por parte de usuarios móviles.

Este tipo de sistemas es ampliamente consumido por usuarios de servicios basados en posiciones. Un ejemplo de estos servicios es la asistencia en la elección de un camino a tomar para llegar a un punto en particular (por ejemplo un hospital). Para esto se tiene en cuenta información como el medio en el que se desplaza el solicitante del servicio, el sentido de circulación de la calle en la que estese encuentra, congestionamientos de tránsito en la zona, etc. El servicio detallado anteriormente, al igual que muchos otros, utiliza cartografía digital para resolver el requerimiento de un usuario (información relacionada con el concepto de cartografía digital, será brindada en el capítulo siguiente).

2.4. Visiones acerca de los Sistemas de Información Geográfica

Existen principalmente tres visiones solapadas de los Sistemas de Información Geográfica, estas se dan en términos de mapas, base de datos y análisis espacial.

La visión de *mapas* se centra en los aspectos de la cartografía manipulada por un SIG. Esta visión ha sido incorporada basándose en el trabajo del ecologista Ian McHarg quien hacia hincapié en la necesidad de tomar decisiones

de planeamiento ambiental mediante la superposición de mapas existentes [McHarg 1969]. Los defensores de esta visión ven a los SIG como sistemas de visualización o procesamiento de mapas. En el procesamiento de mapas, cada conjunto de información es representado como un mapa o layer de cobertura (La figura 2.1 muestra un conjunto de layers de cobertura). Los mapas se manejan usualmente en formato raster[◊] o vector[◊], constituyendo lo que se conoce como mapas digitales (este tema será ampliado en el siguiente capítulo).

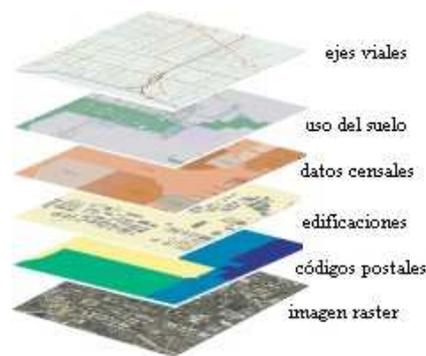


Figura 2.1: Layers de cobertura

Un SIG, a diferencia de los primitivos sistemas de visualización de mapas, permite realizar operaciones espaciales entre las entidades representadas. Permite además contemplar información entre distintas entidades relativa a adyacencia, inclusión, etc. Esto manifiesta la contemplación dentro de los SIG del concepto de Topología (este concepto será exployado en la Sección 3.2).

La visión de SIG como *base de datos* hace énfasis en la importancia de una base de datos no sólo bien diseñada sino que también bien implementada.

Las bases de datos de los SIG contienen datos gráficos y alfanuméricos. La exactitud de los datos viene determinada por el uso que se le dará posteriormente a ellos. La generación de la base de datos inicial incluye la captura e integración de datos que generalmente proceden de fuentes diversas. Estas fuentes a menudo presentan diferentes escalas[◊] y formatos que deben ser unificados.

Por último la visión de *análisis espacial* es la usada para diferenciar a los SIG del resto de los sistemas de información.

Como se ha mencionado anteriormente, la visión sobre un Sistema de Información Geográfica, depende de la perspectiva con la que se analice [Longley 1991] y generalmente éstas se solapan.

2.5. La Información Geográfica

Una aspecto que distingue a los Sistemas de Información Geográfica de otros sistemas informáticos es el tipo de información que ellos manipulan. En el contexto de los SIG los objetos de estudio no sólo están descritos por un conjunto de atributos no espaciales, sino que además tienen una posición geográfica (donde está), un conjunto de relaciones espaciales (como se relaciona con su entorno) y posiblemente un valor de tiempo (momento en el que existió).

Cuando se habla de información geográfica, cada entidad involucrada debe poseer una posición especificada de modo tal que además de ser única no sea ambigua [Longley 2000]. Las posiciones son guardadas en términos de algún sistema de coordenadas, como por ejemplo Latitud/Longitud, y en función de alguna representación de la Tierra, por ejemplo el datum WGS84 [Schiller 2004]. Este tema será ampliado en la sección 2.6. Las relaciones espaciales entre diferentes entidades geográficas suelen ser complejas pero muy importantes, por ejemplo, no sólo es importante saber donde se encuentra posicionado un Hospital, sino además cuán cerca se halla éste de un accidente reportado. Este tipo de relación es claramente deducible por un ser humano al mirar un mapa e individualizando las posiciones de las entidades involucradas, en nuestro caso, el hospital y el punto del accidente, sin embargo en un SIG computarizado las relaciones deben estar representadas de una manera computable. Sólo algunas relaciones se ingresan de manera explícita dentro de un SIG, mientras que el resto deben ser calculadas.

Lo último que resta definir para representar un dato geográfico o dato georeferenciado, es el tiempo. La información geográfica es referenciada en un instante de tiempo determinado. Conocer el momento en el que un dato georeferenciado ha sido tomado es crítico para usar este dato apropiadamente. En el ejemplo del hospital, si la posición almacenada para esta entidad en el sistema es obsoleta, enviar una ambulancia con los heridos del accidente a una dirección errónea, puede llevar a lamentar la vida de un involucrado en el mismo.

La información histórica constituye una componente valuable en los SIG ya que colaboran en la toma de decisiones [Aronoff 1995]. La representación

del tiempo dentro del SIG agrega un alto nivel de complejidad que no siempre es trivial de sobrellevar, como resultado de ésto, este factor suele no ser incorporado en los sistemas.

Los datos obtenidos mediante satélites ayudan a examinar las variaciones sufridas en el planeta, constituyendo los SIG una herramienta muy valiosa para su interpretación y manipulación ya que es posible analizar con ellos, por ejemplo, imagenes satelitales. La Figura 2.2 muestra el cambio en la fisonomía de una ciudad (Aceh) luego del paso de Tsunami el pasado 26 de Diciembre de 2004 [Tsunami 2004]. En ella se visualiza la importancia del almacenamiento dentro de un SIG del momento en el que se ha tomado la información, ya que claramente ésta cambia con el tiempo.



Figura 2.2: Ciudad de Aceh antes y después del Tsunami

2.6. ¿Cómo se interpreta la información geográfica?

Como se ha mencionado en la sección anterior, un dato georeferenciado además de información de la posición, puede tener información relacionada con el tiempo. La información temporal de una entidad georeferenciada, puede ser omitido, no así la de su posición, puesto que dejaría de tener valor en un sistema geográfico.

La manera en la que se indica la posición de un objeto no debe ser ambigua. Por ejemplo, si mencionamos el restaurante de calle 50 N° 631 de la ciudad de La Plata, Provincia de Buenos Aires, República Argentina, no existe otro restaurante en esa misma dirección y la descripción es suficiente para poder hallar dicho punto. Este es un mecanismo de georeferenciamiento, pero sin embargo resulta natural al momento de compartir información con personas que o fueran de la zona.

2. Conceptos generales

La manera en la que se asignan valores a una posición se denomina *Sistema de Referencia*. La asignación puede ser descriptiva (como en el ejemplo del restaurante) o matemática como veremos mas adelante.

Definición 2.1 (Sistema de Referencia):

Un sistema de referencia establece un sistema de coordenadas y dependiendo de éste, un datum.

Existen diversos sistemas de referencia en los que una coordenada puede ser descripta, si bien en cada uno de ellos la representación numérica de la posición puede cambiar, todas ellas representan la misma posición geográfica [Voser-MapRef].

Debido a la heterogeneidad en formato y fuentes de captura de los datos contemplados en un SIG, muchas veces se deben aplicar transformaciones a las posiciones con el objetivo de homogeneizar el sistema de referencia. Con esto se logra un único contexto geográfico, lo que posibilita realizar operaciones y análisis sobre los datos. A continuación se describen los conceptos de sistemas de coordenadas y datum.

2.6.1. Sistemas de Coordenadas

Definición 2.2 (Sistema de Coordenadas):

Un sistema de coordenadas es un conjunto de valores que permiten definir unívocamente la posición de cualquier punto de un espacio geométrico respecto de un punto denominado origen. Constituyen un marco matemático [Voser].

Existen diferentes tipos de sistemas de coordenadas, algunos de ellos se describen a continuación.

Sistema de Coordenadas Geográficas

Constituye el sistema mas poderoso ya que permite una alta resolución espacial y análisis espacial incluyendo el cálculo de distancia entre puntos ubicados sobre la corvatura de la Tierra [Longley 2000]. Divide a la Tierra en un sistema de meridianos y paralelos (ver Figura 2.3).

Meridianos

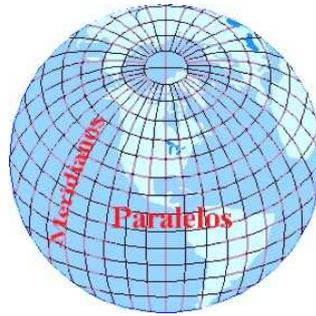


Figura 2.3: Sistema de Coordenadas Geográficas

Los meridianos, también llamados líneas de longitud, son los círculos máximos imaginarios que pasan por los polos, o los semicírculos que van de polo a polo. Cualquier punto a lo largo de un mismo meridiano tiene igual longitud.

Si tomamos un meridiano terrestre cualquiera, éste divide a la Tierra en dos hemisferios, uno occidental y otro oriental. Se ha convenido universalmente como punto de partida o de origen para la determinación de la longitud geográfica terrestre, el meridiano que pasa por el observatorio de Greenwich (Inglaterra), es decir, el punto cero o de inicio a partir del cual se van numerando los distintos meridianos.

Longitud

La longitud (Figura 2.4) se define como la distancia de arco existente entre el meridiano que pasa por un punto de la superficie terrestre y el meridiano 0 de Greenwich. Este valor se expresa en grados, minutos y segundos; va desde 0° hasta 180° Este u Oeste, dependiendo de si el punto se encuentra a Oriente u Occidente de Greenwich. Los polos Norte y Sur no tienen longitud.

Paralelos

Los paralelos, también llamados líneas de latitud, son círculos imaginarios 'paralelos' al ecuador que cortan los meridianos formando ángulos rectos. Cualquier punto a lo largo de un mismo paralelo tiene igual latitud.

Así como en los meridianos todas las líneas son círculos máximos, en los paralelos sólo hay un círculo máximo, el del ecuador o paralelo 0; éste divide a la Tierra en dos hemisferios, Norte y Sur. Los paralelos reducen su círculo máximo conforme se acercan a los polos, hasta convertirse en un punto. Se puede trazar un número infinito de paralelos, pero en los mapas se representan sólo a intervalos regulares; están numerados de 0° a 90° tanto hacia el Norte como hacia el Sur del ecuador o punto de origen.

2. Conceptos generales



Figura 2.4: Longitud

Latitud

La latitud (Figura 2.5) se define como la distancia de ángulo que existe entre un punto de la superficie terrestre y el Ecuador. Este valor se expresa en grados, minutos y segundos. Las líneas imaginarias de latitud son los paralelos, los cuales circundan todo el globo 'paralelos' al Ecuador. La latitud puede ser Norte o Sur, según el hemisferio donde se encuentra el punto a referenciar, esto es, al Norte o Sur del Ecuador. Se mide de 0° a 90° ; así, el Ecuador se encuentra a latitud 0° , mientras que la latitud más alejada por encima del Ecuador es el Polo Norte (latitud 90° Norte), y la más alejada por debajo del Ecuador es el Polo Sur (latitud 90° Sur).

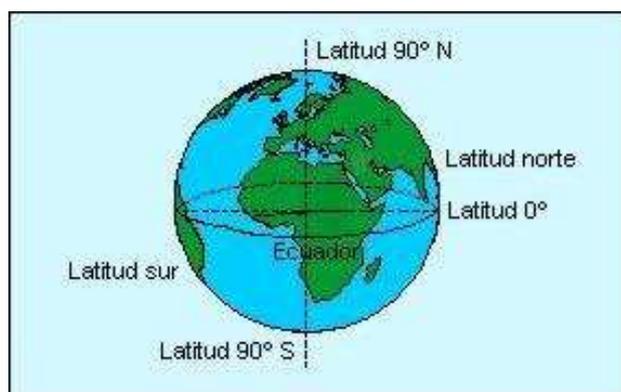


Figura 2.5: Latitud

Sistema de Coordenadas Geocéntricas o Cartesianas

X,Y,Z son coordenadas cartesianas con respecto a una terna de ejes fijos a la Tierra con origen en su baricentro. X esta dirigido al meridiano de Greenwich y Z hacia el Polo [Del Cogliano 2001]. La orientación de los ejes es la apropiada para transformar de XYZ a Latitud, Longitud y Altura (sistema presentado en el apartado anterior). La unidad de medida de estas coordenadas es el metro [Del Cogliano 2001].

La figura 2.6 muestra los ejes coordenados.

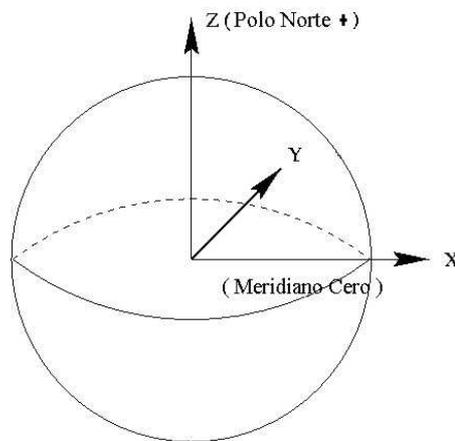


Figura 2.6: Sistema de Coordenadas Geocéntricas

Sistema de Coordenadas Planares

Muchas veces es necesario aplanar o proyectar la superficie terrestre, por ejemplo, porque el papel es plano y éste se usa como medio de entrada de datos en los SIG mediante scaneo o digitalización y generalmente la salida de SIG son mapas. Por otro lado, el formato de representación raster (ver Sección 3.3.1) es inherentemente plano (es imposible cubrir superficies curvas) [Longley 2000]. Una de las técnicas usada para representar un cuerpo tridimensional, como lo es la Tierra, en un plano es el procedimiento conocido como proyección. Por ejemplo, nuestra sombra en una pared es la proyección de nuestro cuerpo en una superficie. En una proyección se establece una correspondencia entre cada punto en el cuerpo proyectado y en la proyección. Las rectas que unen entre sí estos puntos convergen en otro punto llamado foco. En el ejemplo de la sombra; el foco es la fuente de luz. Las posiciones relativas del foco, el cuerpo proyectado y la superficie de proyección determinan la forma de la proyección y la manera en que ésta se ajusta a las

proporciones del cuerpo proyectado.

Definición 2.3 (Proyección):

Una proyección determina la manera en la que la superficie curva de la Tierra es transformada y representada sobre una pieza plana de papel o en la pantalla de una computadora [Thompson 2003].

Representar en forma plana una superficie curva conlleva una pérdida de exactitud, ya que el traslado de los datos implica la deformación de los rasgos. No obstante, mediante los mapas se puede conseguir una aproximación muy cercana a la realidad.

Existen varios tipos de proyecciones, el destino de unos u otros dependen de su aplicación, ya que todas sufren en alguna medida una deformación de la realidad; en las llamadas **proyecciones equivalentes** se respeta la realidad de la superficie, mientras que en las llamadas **proyecciones conformes** se respeta la realidad de los ángulos [Longley 2000].

Cada zona de la Tierra posee una proyección que mejor se adecúa a ella, sin embargo, existe una proyección conforme diseñada para ser usada a nivel mundial conocida como UTM (Universal Transverse Mercator). Esta proyección divide al planisferio en 60 zonas o husos numerados desde el 01 al 60. Cada zona UTM esta dividida en 20 bandas, nombradas desde la letra C hasta la X (Figura: 2.7). Las bandas C hasta la M se encuentran en el hemisferio Sur, mientras que las restantes en el hemisferio Norte. Cada banda entre la letra C y la letra W tiene una altura de 8 grados, mientras que la banda correspondiente a la letra X de 12 grados.

La proyección adoptada por Argentina, es la denominada Gauss Krügger, constituye una variación de la UTM manteniendo las propiedades de conformidad de ésta. Este sistema de proyección es empleado por el Instituto Geográfico Militar para la confección de todas las cartas topográficas nacionales. Cada faja de la grilla Gauss-Krüger mide 3° de ancho (longitud) por 34° de largo (latitud)(Figura: 2.8).

2.6.2. Datum

Un datum, describe el tamaño y forma de la Tierra y representa un modelo de ella. Desde la primera aproximación de la Tierra realizada por Aristóteles, centenares de datums se han definido y usado [Dana 1999]. La manera en la que un datum describe la forma de la Tierra es a través de un elipsoide, esto se debe a una evolución en la visión de la Tierra desde modelos planos hasta los esféricos, en los que se halló mayor precisión para navega-

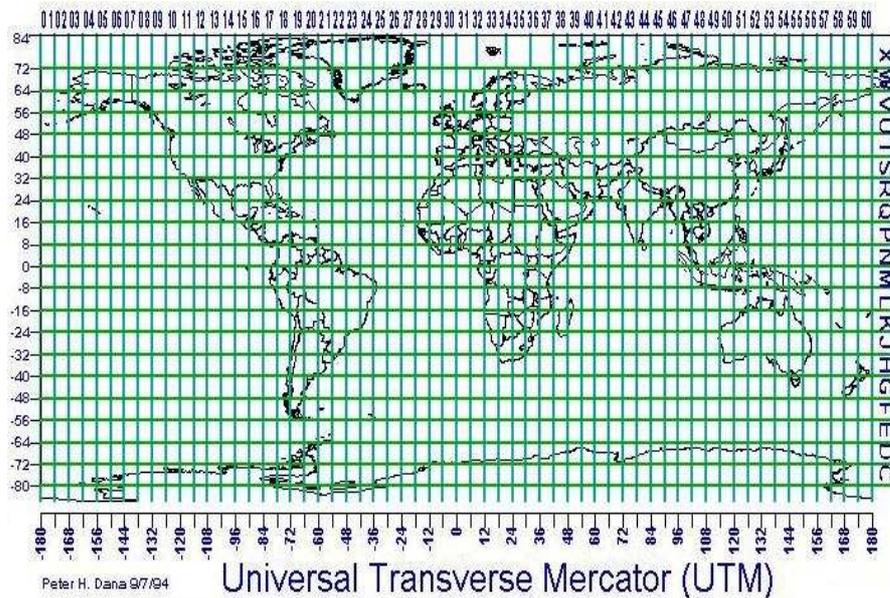


Figura 2.7: Proyección UTM

ción y exploración global. Recién luego del año 1700 se usaron datum con representaciones verdaderas cuando mediciones mostraron que la forma de la Tierra era elipsoidal [Dana 2003]. Un datum esta formado por un elipsoide orientado y desplazado con respecto a un origen. Como ya se ha mencionado, existen muchos datums y la elección de uno en particular depende de la zona de la tierra sobre la cual se desee trabajar. Se ha establecido un datum como estándar internacional, llamado WGS 1984, el cual posee las siguientes características:

- El origen se encuentra en el centro de masa del planeta
- El eje Z apunta al polo Norte
- El eje X pasa por el meridiano de Greenwich

Las líneas de Longitud y Latitud en un mapa o carta de navegación están referenciadas siempre a un Datum específico, es decir, que cada mapa tiene un Datum de referencia, que debe estar descrito en él de manera visible (normalmente en algún margen).

2. Conceptos generales

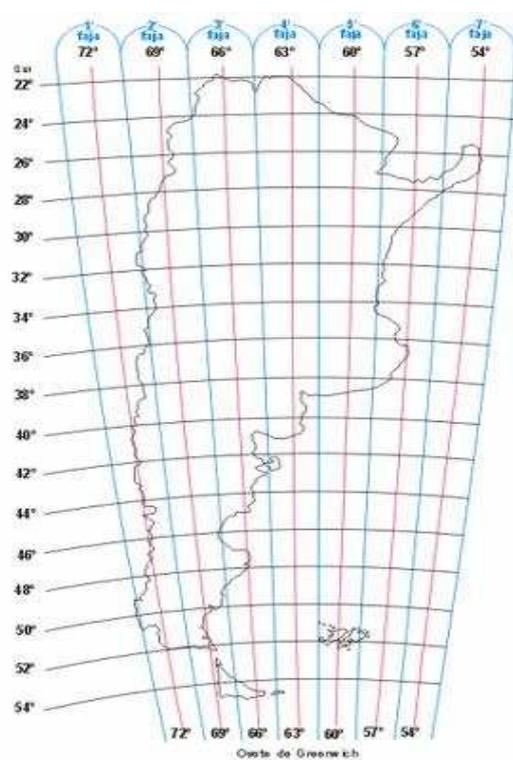


Figura 2.8: Proyección Gauss-Krüger

Capítulo 3

Modelos terrestres

En este capítulo se describen conceptos relacionados con la abstracción del dominio geográfico para aplicaciones SIG. Se presentan y comparan distintas representaciones de la información geográfica.

3.1. Mapas

Un mapa es una representación gráfica de un área del espacio geográfico, proyectada sobre una superficie plana (ver Sección 2.6.1). Constituye un medio de comunicación que usa elementos gráficos para describir al lector relaciones entre entidades de tipo punto, línea y área. Los mapas son una necesidad básica para el establecimiento y reconocimiento de un territorio, ellos permiten delimitar propiedades, recursos naturales, ríos, accidentes geográficos y poblaciones.

Los primeros mapas representaron grandes porciones de tierra, posteriormente se comenzaron a realizar mapas más precisos sobre las rutas marítimas y terrestres, los ríos, el relieve, las poblaciones existentes y las nuevas fundaciones.

La evolución de la tecnología conlleva a la necesidad de incorporar la información representada en los mapas a sistemas informatizados. Dos de las tres visiones acerca de los SIG, presentadas en el capítulo anterior, están directamente relacionadas con el concepto de mapas digitales (visión de mapas y de análisis espacial).

Un mapa, ya sea en papel o digital, puede definirse como una representación bidimensional de cierta área de la superficie terrestre, con determinada escala^o y proyección.

3.1.1. Mapas digitales

El objetivo de un mapa digital es capturar los fenómenos geográficos y hacerlos disponibles para la recuperación de datos dinámica, el análisis espacial y la representación de la información mediante sistemas de visualización.

Como se explicó en el capítulo 3 (Sección 2.5), un aspecto que distingue a los Sistemas de Información Geográfica de otros sistemas informáticos es el tipo de información que ellos manipulan. Cada objeto espacial debe tener una posición especificada unívocamente y cuya definición puede ser compleja en función de la naturaleza del objeto. Si dicha información espacial es una posición absoluta en relación a la superficie terrestre, entonces se la denomina *información georeferenciada*.

3.2. Información Topológica

En la mayoría de las aplicaciones SIG es importante llevar a cabo operaciones entre distintas entidades espaciales y muchas veces es necesario conocer las relaciones de vecindad entre ellas. Esto sugiere la necesidad de representar formalmente dichas relaciones.

La topología es probablemente la más joven de las ramas clásicas de las matemáticas. Aparece en el siglo XVII, con el nombre de *analysis situs*, esto es, análisis de la posición. La motivación detrás de la topología es la existencia de algunos problemas geométricos que no dependen de la forma exacta de las entidades involucradas, sino de la manera en que están conectadas.

De manera informal, la topología se ocupa de aquellas propiedades de las figuras que permanecen invariantes, cuando dichas figuras son plegadas, dilatadas, contraídas o deformadas, de modo que no aparezcan nuevos puntos, o se hagan coincidir puntos diferentes.

Una definición más precisa de la topología, en el ámbito de los sistemas SIG, requiere de las siguientes definiciones previas:

Definición 3.1 (Punto):

Un punto es una abstracción cero-dimensional de una entidad representada por un sólo par de coordenadas^o. Normalmente representa una entidad demasiado pequeña para ser representada mediante una línea o un área. [Alexandroff 1961]

Por ejemplo, un punto permite representar la posición de un edificio en un mapa de mayor nivel de detalle o la ubicación de una ciudad en un mapa de menor detalle.

Definición 3.2 (Línea):

Una línea es un conjunto ordenado de coordenadas que representan la forma de una entidad geográfica demasiado delgada para ser representada por un área, teniendo en cuenta una cierta escala. Un **vértice** es un par de coordenadas (punto) que forma parte de una línea. Un **nodo** es el punto inicial o el punto final de una línea. Se dice que un nodo está topológicamente relacionado a todas las líneas que terminan o comienzan en ese nodo. [Alexandroff 1961]

Por ejemplo, podría elegirse una línea para representar un contorno, el centro de una calle (eje vial^o) o un arroyo.

Definición 3.3 (Polígono):

Un polígono es una entidad utilizada para representar un área. Se define mediante las líneas que conforman sus fronteras. [Alexandroff 1961]

Por ejemplo, un polígono podría representar el área cubierta por una manzana, una provincia o un país.

Entonces puede considerarse otra definición de la información topológica, en este caso aplicada a los sistemas SIG:

Definición 3.4 (Topología):

La topología es la posición relativa de los fenómenos geográficos independientemente de su posición exacta. En la información digital, las relaciones topológicas como la conectividad, adyacencia y posición relativa son expresados usualmente como relaciones entre nodos, líneas y polígonos.

En este marco, la Topología permite estructurar la información espacial en base a las relaciones entre las entidades. Algunas relaciones son: la conectividad entre líneas, la adyacencia entre polígonos y la inclusión entre polígonos.

Originalmente, la información topológica en los SIG se utilizó para prevenir la existencia de información no consistente en una base de datos espacial, por ejemplo, polígonos no cerrados o líneas duplicadas que se superponen, entre otros.

Los grafos son un ejemplo de información topológica con numerosas aplicaciones comerciales, además de otro tipo de aplicaciones. Por ejemplo, la red

de rutas puede ser representada por un grafo con el objetivo de determinar el trayecto óptimo ¹ de camiones que deben recorrer puntos de todo el país. En este grafo se representan relaciones de conexión entre líneas, que representan las rutas de una ciudad a otra.

En un SIG, las relaciones espaciales deben ser establecidas por el software mediante un lenguaje y un conjunto de reglas de geometría. La capacidad de crear topología es también otro aspecto característico que diferencia a un SIG de otros sistemas de gestión de la información.

Los mecanismos para capturar la topología pueden ser muy variados, pero una posible clasificación de la topología es la que se detalla a continuación:

- Topología explícita basada en la representación vectorial: Las relaciones se almacenan en tablas, y se utilizan pudiendo representarse las entidades en el plano (por ejemplo mediante la representación Arco-Nodo) o en el espacio (por ejemplo mediante la representación TIN).
- Topología calculada basada en la representación vectorial: Las relaciones se calculan bajo demanda, en general a partir de una representación de tipo spaghetti.
- Topología implícita basada en la representación Raster: Las relaciones se definen a partir de la posición de los datos en la grilla.

En la siguiente sección se presentarán distintos modelos de representación de mapas digitales. Serán descriptos, entre otros, los modelos nombrados en esta sección (Arco-Nodo, TIN, Spaghetti, Raster).

3.3. Modelos de representación

A pesar de que el espacio es una noción cotidiana, su representación formal mediante un modelo no es tan simple. A continuación se presenta una posible clasificación de los *modelos de representación del espacio* ([Frank]).

Existen fundamentalmente dos posibilidades para representar el aspecto espacial de la información. El proceso de abstracción podría inclinarse por la identificación de las entidades y el tratamiento del espacio como atributo de las entidades (enfoque orientado a las entidades o *feature based*), o bien podría identificarse el espacio y las propiedades de las entidades encontradas

¹Un trayecto óptimo puede ser el menos costoso o el más rápido

en cada posición y de esta manera pensarse las entidades como propiedades de las posiciones (enfoque basado en la posición o *location based*).

En el primer caso, el concepto de la geografía es la composición de entidades que pueden ser ubicadas en el mapa mediante un sistema de coordenadas (ver sección 2.6.1) y descritas mediante propiedades y atributos. La segunda visión considera los atributos como valores que tienen una eventual variación constante. Un ejemplo de este caso es el valor de altitud.

Existe un enfoque adicional que se denomina *campos continuos* el cual sólo será brevemente descrito ya que no está incluido como tema de la tesis presentada. En las restantes secciones de este capítulo se amplían los enfoques propuestos.

3.3.1. Enfoque basado en la posición

Debido a que puede ser muy complejo representar grandes áreas geográficas mediante una sola función numérica, es común dividir el espacio geográfico en unidades espaciales discretas², donde el área representada con cada unidad espacial se considera asociada al mismo valor de cada atributo. El resultado de esta división se denomina **mosaico** y existen varios enfoques para llevarla a cabo, descritos a continuación.

Mosaico regular

Un sistema de representación que utiliza mosaico regular se basa en la noción de subdivisión del espacio en celdas del mismo tamaño y forma.

En el modelo de mosaico regular, la recuperación de los atributos para cada celda puede ser considerada como una función *map*, definida a continuación:

$$map : (X, Y, p_i) \rightarrow D_i$$

donde X e Y son los dominios de las coordenadas de los puntos, $P = \{p_i, i \in 1..n\}$ es el conjunto de propiedades (atributos) asociadas al área geográfica, y D_i es el dominio de la propiedad p_i .

Esta función constituye un modelo que permite definir un álgebra de mapas ([Tomlin 1983]) con operaciones *op* de tipo:

$$op : map^+ \rightarrow map$$

²una función, variable o sistema es discreto, en contraposición a continuo, si es divisible un número finito de veces

Es decir, op es una operación entre uno mas mapas (indicado con map^+) cuyo resultado es otro mapa. Los mapas obtenidos tienen la misma estructura de mosaico que los mapas iniciales, pero el contenido de cada celda queda determinado en la operación.

Dado que cada celda está asociada a un valor, los diferentes atributos deben representarse en distintas grillas, lo que eventualmente daría lugar a distintos archivos (ver Figura 3.1). Esto lleva a una cantidad total de valores determinada por el producto entre la cantidad de celdas y la cantidad de layers diferentes. Mientras menor sea el tamaño de las celdas individuales, es mayor la resolución que se consigue, pero es mayor la cantidad de datos a almacenar.

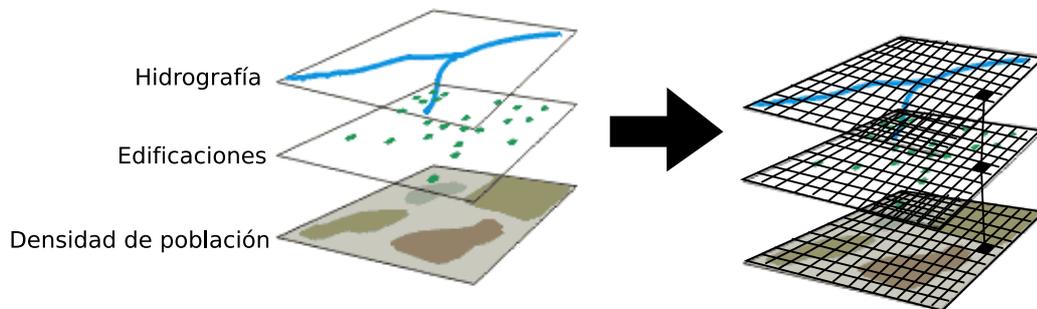


Figura 3.1: Representación en layers de mosaico regular

El **modelo raster** es un caso particular del mosaico regular que divide el espacio en una matriz de celdas de forma cuadrada (ver Figura 3.2), donde la posición de cada entidad espacial se define mediante los números de fila y columna de las celdas que ocupa [Frank]. El área que representa una celda determina la resolución del modelo y el valor almacenado en cada celda indica el tipo de entidad que se encuentra en esa posición. Así, las unidades espaciales son las celdas, que corresponden a un área geográfica en una posición específica.

Si se define una mejor resolución, la representación raster puede resultar en un mayor número de celdas. En dicho caso es probable obtener grandes conjuntos de celdas adyacentes asociadas al mismo valor, lo que genera redundancia de información. Para disminuir dicha redundancia existen algunas implementaciones que optimizan considerablemente el tamaño del archivo raster. Entre ellas pueden citarse la codificación *Run-Length*, *block-coding* y las estructuras jerárquicas.

Las estructuras jerárquicas se aplican a mosaicos que puedan ser descom-

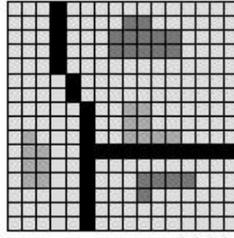


Figura 3.2: Raster

puestos recursivamente en patrones similares de menor tamaño. Los mosaicos raster (celdas cuadradas) son los mas usados en la construcción de jerarquias, en la que cada nivel de descomposición puede subdividirse en cuatro cuadrantes [Smith 1987].

Una posible implementación de estructura jerárquica es el *Quadtree*. Esta implementación provee una representación de mosaico mas compacta permitiendo celdas de tamaño variable. Cada área se divide en cuatro cuadrantes sólo si no tiene el mismo valor de atributo en todas sus celdas (es decir, si se requiere mas detalle). Esta división se repite hasta llegar a un nivel de celda atómico ³. Un ejemplo de esto se muestra en la Figura 3.3.

Mediante la implementación propuesta se puede reducir el volumen de datos y por lo tanto el tiempo de procesamiento. Esta reducción depende de la redundancia de datos presente en el mapa.

Mosaico irregular

El mosaico irregular es una descomposición del área en polígonos irregulares o una descomposición del espacio en poliedros[◊] irregulares.

Este modelo se sustenta sobre el concepto de celdas definidas por su topología algebraica ([Alexandroff 1961]). Cada celda tiene una dimensión específica y según su dimensión recibe un nombre diferente. A continuación se definen los tres posibles tipos de celdas presentes en este modelo:

- 0-dimensional: celda denominada como Punto, nodo o vértice.
- unidimensional: celda denominada como Linea, arco o arista
- bidimensional: celda denominada como Area, región o celda.

³el nivel atómico está determinado por el nivel de detalle (resolución) deseado en la implementación del Quadtree

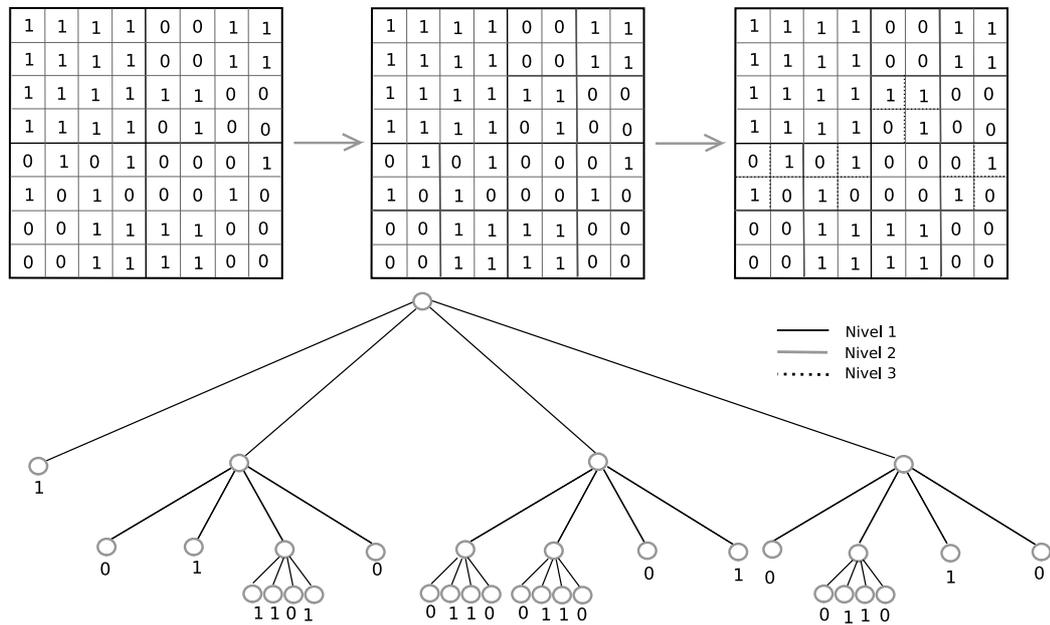


Figura 3.3: Estructura de Quadtree

Donde cada celda esta limitada por celdas de menor dimensi3n y asi mismo es l3mite (o frontera) entre una o mas celdas de mayor dimensi3n. Por ejemplo, una l3nea est3 limitada por dos puntos y puede limitar la frontera de un 3rea.

Bajo el concepto de mosaico irregular previamente presentado, pueden presentarse tres concepciones principales:

1. Una concepci3n integradora, donde las celdas son las 3reas de mayor tama3o posible en las que se tiene los mismos valores en todos los atributos (figura 3.4).
2. Una concepci3n en capas, donde cada capa representa una propiedad y donde las celdas de cada capa son el 3rea de mayor tama3o con el mismo valor en com3n de la propiedad p_i (figura 3.5). Cada capa puede asociarse con una funci3n $Capa_i$ definida como sigue:

$$Capa_i : x, y \rightarrow D_i$$

donde D_i es el dominio de la propiedad p_i , y el mapa se define como un conjunto de capas $capa_i$. Es decir: $map = \{Capa_i, i \in 1..n\}$

3. Una concepci3n de entidades, donde se definen entidades con propiedades geom3tricas y no geom3tricas.

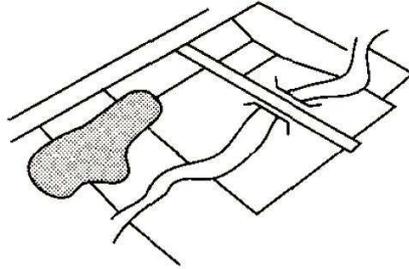


Figura 3.4: Modelo integrador

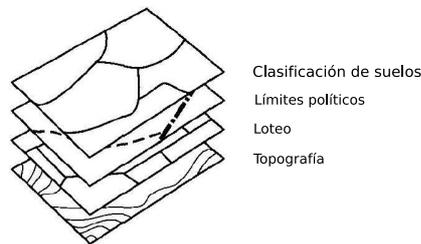


Figura 3.5: Modelo en capas

Comparación entre distintos modelos del enfoque orientado a la posición

Tanto para el mosaico regular como para el mosaico irregular, las limitaciones de la representación finita (debido al uso de computadoras) afectan al comportamiento de las operaciones espaciales. La resolución espacial de un mosaico regular se entiende más limitante que la resolución espacial de un mosaico irregular. Esto es porque en el primer caso la resolución está determinada por el tamaño de celda, y en el segundo caso está determinada por la precisión en cuanto a cantidad de bits utilizados en el almacenamiento de las coordenadas.

Carencias del enfoque orientado a la posición

Los modelos de mosaico presentados anteriormente requieren representar el espacio mediante una subdivisión en celdas mutuamente excluyentes. Existen fenómenos para los que esta representación no es apropiada. Por ejemplo, la superposición espacial de las entidades y el análisis de proximidad son resueltos de mejor manera por una implementación *orientada a las entidades* (descritos en la Sección 3.3.2).

Por otro lado, a pesar de que las estructuras de Quadtree permiten una

representación mas precisa con el mismo volúmen de datos, su estructura Raster aún implica una pérdida de precisión en el posicionamiento.

3.3.2. Enfoque basado en las entidades

Este enfoque se basa en la necesidad de representar y manipular entidades aisladas, sin tener en cuenta el área que las contiene. Estas entidades individuales se representan mediante la geometría que define sus límites o fronteras, descrita mediante un conjunto de entidades espaciales que pueden ser puntos, líneas o polígonos. De cada entidad espacial se conoce su posición expresada en coordenadas relativas a un cierto sistema de referencia. Por ejemplo, una posición podría describirse mediante coordenadas Latitud-Longitud o mediante una dirección postal (ver Sección 2.5).

Comunmente este enfoque se conoce como *Modelo Vector*. A continuación se presentan dos modelos que respetan el *enfoque basado en las entidades*. Al final de la sección se desarrolla una comparación entre ellos.

Modelo Spaghetti

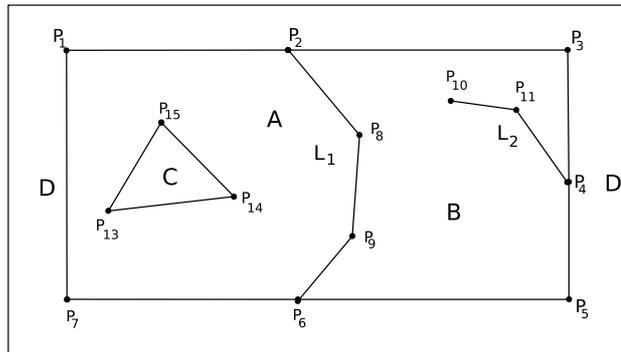
Cada entidad a representar se traduce a un conjunto de coordenadas. dicho conjunto depende de la naturaleza de cada entidad, es decir, un punto se codifica con un solo par de coordenadas, una línea como una colección ordenada de pares de coordenadas, y un área se representa por una colección ordenada de pares de coordenadas que describen un polígono cerrado. Un archivo construido en este modelo es un conjunto de estas representaciones de entidades. Un ejemplo de modelo spaghetti se puede ver en el Cuadro 3.1, donde se construye una tabla para cada tipo de entidad, describiendo la estructura de cada una de ellas.

Este modelo es muy simple y fácil de comprender, pero no se registra ningún tipo de relación espacial entre las entidades⁴. En caso de necesitar información de adyacencia entre entidades, se debe calcular explícitamente.

La representación independiente de cada entidad puede introducir un importante nivel de redundancia. Por ejemplo, cuando dos polígonos son adyacentes es porque tienen al menos un arco en común, pero sin embargo cada arco se representará una vez por cada polígono que lo comparte. El origen de este problema es la ausencia en este modelo de relaciones espaciales explícitas entre las entidades.

⁴También denominado modelo desconectado o *unlinked*

3. Modelos terrestres



Puntos		Líneas	
Numero	Coordenadas	Numero	Coordenadas
P_2	(x_2, y_2)	L_1	$(x_2, y_2), (x_8, y_8), (x_9, y_9), (x_6, y_6)$
P_6	(x_6, y_6)	L_2	$(x_4, y_4), (x_{11}, y_{11}), (x_{10}, y_{10})$

Polígonos	
Numero	Coordenadas
A	$(x_7, y_7), (x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_8, y_8), (x_9, y_9), (x_6, y_6), (x_7, y_7)$
B	$(x_2, y_2), (x_8, y_8), (x_9, y_9), (x_6, y_6), (x_5, y_5), (x_4, y_4), (x_3, y_3), (x_2, y_2)$
C	$(x_{13}, y_{13}), (x_{14}, y_{14}), (x_{15}, y_{15}), (x_{13}, y_{13})$

Cuadro 3.1: Ejemplo del modelo spaghetti

Modelo Topológico

Es el modelo mas usado para codificar relaciones espaciales en un SIG, donde se tienen en cuenta las definiciones de Punto, Nodo, Vértice, Línea (también llamada Arco) y Polígono detalladas en la Sección 3.2.

La entidad lógica elemental es el *arco*. Los nodos aislados, que no son parte de ningún arco, representan entidades de tipo punto. Un nodo es un punto de intersección donde se encuentran dos o mas arcos, y también puede ocurrir en el extremo de un arco que no se encuentre con ningún otro arco.

Una implementación particular del modelo topológico es el modelo *Arco-Nodo*, descrito a continuación.

En la implementación *Arco-Nodo* se construye una tabla de topología por cada tipo de elemento (Arcos, Nodos, Poligonos) y en una tabla separada se describen las coordenadas.

La tabla de *topología de polígonos* describe, para cada polígono, los arcos que lo definen, haciendo referencia a estos arcos mediante un número de identificación.

En la tabla de *topología de nodos* se relaciona cada nodo con los arcos a los que pertenece. La tabla de *topología de arcos* define las relaciones de los nodos y polígonos con respecto a los arcos (ver Cuadro 3.2).

La última tabla es la de coordenadas, que describe las coordenadas que determinan los arcos.

Una de las ventajas de la estructura topológica es la posibilidad de llevar a cabo una importante cantidad de operaciones espaciales sin utilizar la información de coordenadas. El análisis de conectividad entre ejes (de particular importancia en este trabajo) puede llevarse a cabo casi completamente utilizando solamente las tablas de topología. Por ejemplo, es posible calcular todas las entidades contenidas en un polígono usando estas tablas.

Modelo TIN

El modelo TIN (Triangulated Irregular Network) es un modelo de datos topológico diseñado para representar las superficies terrestres, donde se particiona toda el área de estudio en un conjunto de regiones triangulares [Aronoff 1995]. Cada triángulo está definido por tres nodos de los que se conoce sus coordenadas (x, y, z) . Los valores del fenómeno a representar se especifican sólo en los nodos de los triángulos. Sin embargo, dado que se asume que la superficie de cada triángulo es una función de sus coordenadas, se pueden calcular los valores del fenómeno en cualquier punto perteneciente al triángulo a partir de los valores asociados a los nodos, mediante el mecanismo de **interpolación**.

El valor de altitud (coordenada z) puede verse como un valor de fenómeno asociado a cada punto (x, y) .

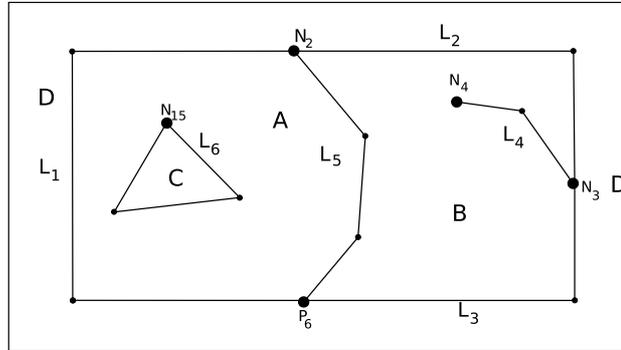
Los límites entre los triángulos están determinados por la ubicación de los nodos. De este modo, la correspondencia entre la superficie real y la que es representada mediante la triangulación ⁵, se determina por el conjunto de puntos seleccionados para definir los nodos. Dado que los TINs definen superficies continuamente variantes, los modelos de TIN no pueden ser usados para estructurar datos categóricos (no numéricos). Un ejemplo de representación mediante TIN se presenta en el Cuadro 3.3.

3.3.3. Campos continuos

Los campos continuos constituyen el último enfoque que se describe en esta sección y del cual solamente se dará una breve descripción por no formar

⁵Conjunto de regiones triangulares

3. Modelos terrestres



Topología de Arcos				
Arco	Nodo inicial	Nodo final	Políg. izquierda	Políg. derecha
L_1	N_1	N_2	D	A
L_2	N_2	N_3	D	B
L_3	N_3	N_1	D	B
L_4	N_4	N_3	B	B
L_5	N_2	N_1	B	A
L_6	N_5	N_5	A	C

Topología de Nodos	
Nodo	Arcos
N_1	L_1, L_3, L_5
N_2	L_1, L_2, L_5
N_3	L_1, L_3, L_4
N_4	L_4
N_5	L_6

Topología de polígonos	
Polígono	Arcos
A	L_1, L_5
B	L_2, L_3, L_5
C	L_6
D	L_1, L_2, L_3

Tabla de Coordenadas			
Arco	Coords iniciales	Coords intermedias	Coords finales
L_1	x_1, y_1	$x_2, y_2; \dots; x_{n-1}, y_{n-1}$	x_n, y_n
L_2	x_1, y_1	$x_2, y_2; \dots; x_{n-1}, y_{n-1}$	x_n, y_n
L_3	x_1, y_1	$x_2, y_2; \dots; x_{n-1}, y_{n-1}$	x_n, y_n
L_4	x_1, y_1	$x_2, y_2; \dots; x_{n-1}, y_{n-1}$	x_n, y_n
L_5	x_1, y_1	$x_2, y_2; \dots; x_{n-1}, y_{n-1}$	x_n, y_n
L_6	x_1, y_1	$x_2, y_2; \dots; x_{n-1}, y_{n-1}$	x_n, y_n

Cuadro 3.2: Ejemplo de modelo topológico. Implementación Arco-Nodo

parte de la tesis, tal como se mencionó anteriormente. Este enfoque contempla fenómenos que tienen características continuas en el sentido que para todo punto en el espacio es posible obtener su valor y estos valores tienen un cambio gradual. Ejemplos de esto son la temperatura y los campos magnéticos. El fenómeno se representa como una función $f :: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ donde el valor asociado a cada punto puede obtenerse mediante una expresión matemática o puede ser interpolado a partir de valores medidos.

3.3.4. Comparación entre los enfoques

Los primeros SIG se construían sobre colecciones de puntos y líneas, técnica usualmente denominada como *spaghetti*. Con este modelo, las intersecciones entre líneas debían deducirse de las coordenadas y los límites de un área debían ser buscados en la colección de líneas mediante operaciones geométricas.

El modelo spaghetti es equivalente a un mosaico irregular dado que pueden deducirse el mismo conjunto de propiedades. Estas deducciones son costosas en términos de operaciones de cómputo, pero además pueden llevar a contradicciones internas debido a las características finitas del almacenamiento.

En un mosaico irregular, las relaciones topológicas están incluidas, debido a que se conocen para cada celda sus celdas limítrofes. Lo mismo ocurre en un mosaico regular, pues la topología está incluida implícitamente en el patrón de numeración de cada celda. Por ejemplo, la celda de numeración (i, j) tiene como celdas limítrofes al conjunto $\{(i - 1, j), (i + 1, j), (i, j - 1), (i, j + 1)\}$, donde i y j son los números de fila y columna respectivamente de la celda.

3. Modelos terrestres

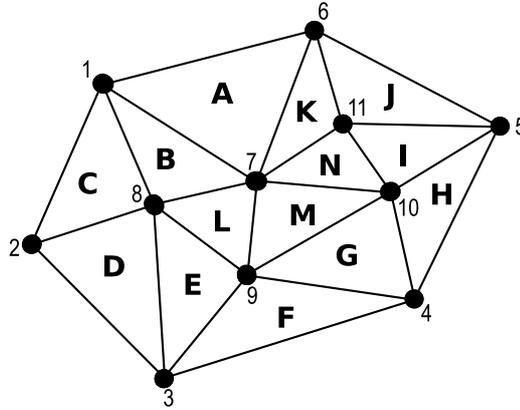


Tabla de nodos	
Triángulo	Nodos
<i>A</i>	1, 6, 7
<i>B</i>	1, 7, 8
<i>C</i>	1, 2, 8
<i>D</i>	2, 3, 8
<i>E</i>	3, 8, 9
<i>F</i>	3, 4, 9
<i>G</i>	4, 9, 10
<i>H</i>	4, 5, 10
<i>I</i>	5, 10, 11
<i>J</i>	5, 6, 11
<i>K</i>	6, 7, 11
<i>L</i>	7, 8, 9
<i>M</i>	7, 9, 10
<i>N</i>	7, 10, 11

Tabla de Adyacencia	
Triángulo	Adyacentes
<i>A</i>	<i>B, K</i>
<i>B</i>	<i>A, C, L</i>
<i>C</i>	<i>B, D</i>
<i>D</i>	<i>C, E</i>
<i>E</i>	<i>D, F, L</i>
<i>F</i>	<i>E, G</i>
<i>G</i>	<i>F, H, M</i>
<i>H</i>	<i>G, I</i>
<i>I</i>	<i>H, J, N</i>
<i>J</i>	<i>I, K</i>
<i>K</i>	<i>A, J, N</i>
<i>L</i>	<i>B, E, M</i>
<i>M</i>	<i>G, L, N</i>
<i>N</i>	<i>I, K, M</i>

Tabla de Coordenadas	
Nodo	Adyacentes
1	x_1, y_1, z_1
2	x_2, y_2, z_2
3	x_3, y_3, z_3
4	x_4, y_4, z_4
5	x_5, y_5, z_5
6	x_6, y_6, z_6
7	x_7, y_7, z_7
8	x_8, y_8, z_8
9	x_9, y_9, z_9
10	x_{10}, y_{10}, z_{10}
11	x_{11}, y_{11}, z_{11}

Cuadro 3.3: ejemplo de representación TIN

Capítulo 4

Sistemas de posicionamiento

En este capítulo se describen diferentes sistemas actualmente usados para la estimación de la posición de un vehículo. En cada caso se describen los posibles errores a los que están sometidos dichos sistemas.

4.1. Introducción

El problema de determinar la posición de una entidad en un sistema de referencia se conoce como posicionamiento [Andersson2004].

Un sistema usado antiguamente por los navegantes para determinar su posición durante sus largas jornadas en altamar, se basó en las estrellas y en los faros. En la actualidad se recurre a otros sistemas de posicionamiento que permiten alcanzar mayor precisión [Schiller 2004].

Los sistemas de posicionamiento descritos en este capítulo constituyen sistemas *out-door*, es decir, sistemas de posicionamiento global que no están restringidos a edificios o a habitaciones dentro de ellos [Schiller 2004].

4.1.1. Clasificación

Los sistemas o métodos de posicionamiento actuales pueden clasificarse en dos grupos: los *métodos aislados* o relativos y los *métodos globales* o absolutos.

El posicionamiento mediante un método aislado consiste en la estimación de la posición y orientación de un vehículo mediante la integración de datos provistos por diferentes sensores instalados en el vehículo. Esta integración comienza en una posición inicial y se actualiza en forma continua con respecto al tiempo. El posicionamiento aislado es también denominado *Dead Reckoning* [Roumeliotis 1997].

Por otro lado, los métodos globales permiten obtener la posición del vehículo con respecto a la Tierra mediante la interacción con dispositivos de los cuales se conoce su posición. Dichos dispositivos pueden ser satélites, estaciones de radio, *beacons*[◦], etc. [Roumeliotis 1997].

4.2. Dead Reckoning

El concepto de *Dead Reckoning* (DR) se basa en la integración de un vector de desplazamiento estimado y una posición conocida. Un sistema de *Dead Reckoning* estima la posición y la orientación de un vehículo en cualquier instante de tiempo a partir del conocimiento de una posición inicial, la velocidad, el tiempo transcurrido y la orientación del vehículo [Ochieng 2003].

El movimiento de un cuerpo en el espacio está descrito por un conjunto de ecuaciones. La solución de las mismas permiten conocer la cantidad de movimiento y la orientación del cuerpo con respecto a un marco de referencia[◦]. La cantidad de movimiento determina la posición de un objeto dentro del espacio (X, Y, Z) y se puede describir mediante las tasas de traslación $(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z)$. La orientación de un objeto se denomina técnicamente **actitud** y se describe mediante las tasas de rotación (Θ, Ψ, Φ) [Sanchez 2005].

Definición 4.1 (Actitud):

La actitud es la relación entre el marco de un cuerpo y el marco XYZ, descrita mediante los ángulos de orientación de un objeto alrededor de los ejes (X, Y, Z) que se conocen con el nombre de *pitch*, *roll* y *yaw* [Abascal 2001].

- Pitch (denotado Θ): Representa el desplazamiento angular del eje lateral en un eje horizontal perpendicular al eje lateral
- Yaw (denotado Ψ): Representa el desplazamiento angular del eje vertical.
- Roll (denotado Φ): Representa el desplazamiento angular del eje lateral.

La ilustración A de la Figura 4.1 muestra la actitud respecto al eje Z, resaltando el ángulo *yaw*. La ilustración B muestra la actitud respecto al eje X, indicando el ángulo *roll*. Finalmente, la ilustración C muestra la actitud respecto al eje Y, marcando el ángulo *pitch*.

En este trabajo se orienta al eje X hacia el Norte, el eje Y hacia el Este y el eje Z indica la altitud. Esto conlleva a las siguientes interpretaciones

4. Sistemas de posicionamiento

- el ángulo *yaw* como un ángulo *Azimuth*[◊],
- el ángulo *pitch* como la inclinación frontal del vehículo, y
- el ángulo *roll* como la inclinación lateral del vehículo.

En este contexto, el ángulo *roll* no es relevante para el posicionamiento, y por ello se utilizan solamente los ángulos *yaw* y *pitch* en este trabajo.

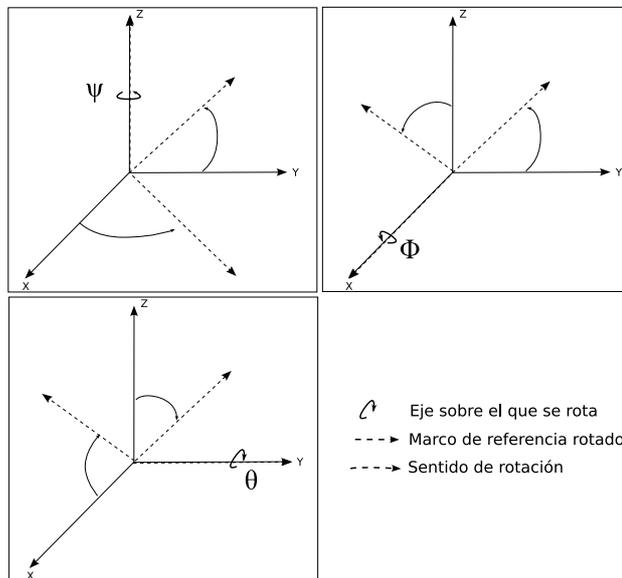


Figura 4.1: Rotaciones del marco XYZ. Ángulos Pitch (Θ), Yaw (Ψ) y Roll (Φ)

Para calcular los valores de velocidad y orientación del vehículo, se utilizan sensores montados en él. Con estos datos es posible calcular las tasas de traslación y de rotación en un tiempo determinado, y así obtener las coordenadas de la posición del vehículo.

A continuación se presenta un modelo general de ecuaciones (4.1 a 4.5) para calcular la posición y orientación de un vehículo en el instante t_{k+1} . La posición en un instante t_1 se denota P_1 y se describe mediante las coordenadas tridimensionales $(N(t_1), E(t_1), Z(t_1))$. Asimismo, la orientación del vehículo en el instante t_1 se describe mediante $(\Psi(t_1), \Theta(t_1))$

$$N(t_{k+1}) = N(t_k) + v(t_k)T \cos(\Theta(t_k)) \cos(\Psi(t_k)) \quad (4.1)$$

$$E(t_{k+1}) = N(t_k) + v(t_k)T \cos(\Theta(t_k)) \sen(\Psi(t_k)) \quad (4.2)$$

$$Z(t_{k+1}) = Z(t_k) + v(t_k)T \sin(\Theta(t_k)) \quad (4.3)$$

$$\Psi(t_{k+1}) = \Psi(t_k) + T\Psi(t_k) \quad (4.4)$$

$$\Theta(t_{k+1}) = \Theta(t_k) + T\Theta(t_k) \quad (4.5)$$

donde se conocen la posición anterior (P_k), las mediciones de velocidad, ángulo *pitch* y ángulo *yaw* en el instante t_k (denotados respectivamente $v(t_k)$, $\Theta(t_k)$ y $\Psi(t_k)$).

Este criterio supone constantes la velocidad, y las mediciones angulares entre los instantes de tiempo de la posición anterior (indicado por t_k) y de la posición a calcular (indicado por t_{k+1}). Esta suposición, sumada a los errores de precisión de los sensores en el vehículo, determina un error de la posición calculada. Además, este error es acumulativo con respecto al incremento del tiempo. Sin embargo, una ventaja de los sistemas DR es que es posible tomar muestras de los sensores con alta frecuencia y así prevenir en gran parte la acumulación del error.

A continuación se describen dos métodos basados en Dead Reckoning: el Sistema Odométrico y el Sistema de Navegación Inercial.

4.2.1. Sistema Odométrico

La odometría tiene por objetivo estimar la posición y orientación de un vehículo a partir del número de vueltas dadas por sus ruedas. En la actualidad, para llevar la cuenta del número de vueltas dadas (y fracciones de éstas) se utilizan codificadores ópticos de alta precisión montados sobre los ejes.

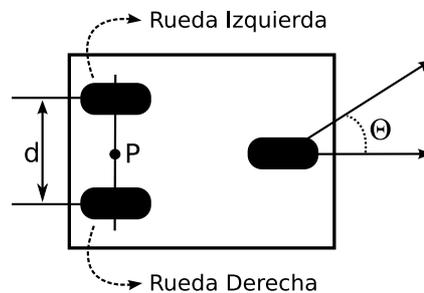


Figura 4.2: Esquema de un triciclo (vista aérea)

4. Sistemas de posicionamiento

En la Figura 4.2 se indica con el punto P el punto medio entre ambas ruedas. La distancia recorrida (Δs) en un intervalo de tiempo Δt por el punto P esta determinada por

$$\Delta s = \frac{1}{2}(\Delta S_R + \Delta S_L) \quad (4.6)$$

donde ΔS_R y ΔS_L son las distancias recorridas por las ruedas derecha e izquierda respectivamente. La variación en la orientación del vehículo está definida por la ecuación:

$$\Delta \Theta = \frac{1}{d}(\Delta S_R - \Delta S_L) \quad (4.7)$$

donde d es la distancia entre ambas ruedas.

Mediante la integración de las ecuaciones se obtiene:

$$s(t) = \frac{1}{2}(S_R(t) + S_L(t)) \quad (4.8)$$

$$\Theta(t) = \Theta(0) + \frac{1}{d}(S_R(t) - S_L(t)) \quad (4.9)$$

donde $s(t)$ es la distancia recorrida por el punto P y $\Theta(t)$ es la orientación del vehículo para un tiempo dado t . Por lo tanto, las coordenadas x e y del punto P pueden obtenerse mediante las ecuaciones:

$$x(t) = x(0) + \int_0^t \frac{1}{2}(S_R(t) + S_L(t))\cos(\Theta(t))\partial t \quad (4.10)$$

$$y(t) = y(0) + \int_0^t \frac{1}{2}(S_R(t) + S_L(t))\sen(\Theta(t))\partial t \quad (4.11)$$

[Gonzalez 1996]

Errores del sistema

Un aspecto a favor de la odometría es su simplicidad y bajo coste. Sin embargo, además de necesitar una frecuente calibración como consecuencia del desgaste y pérdida de presión en las ruedas, desajuste de los ejes, etc., esta técnica es vulnerable a considerables impresiones causadas por el deslizamiento de las ruedas e irregularidades del suelo [Gonzalez 1996].

4.2.2. Sistema de Navegación Inercial

Una unidad de medida inercial (IMU) es un instrumento completamente autónomo que mide el movimiento de un cuerpo registrando las aceleraciones y tasas de rotación relativas a un marco de referencia en tres ejes ortogonales [Aranda 2003].

Un acelerómetro es un instrumento que mide la aceleración de un objeto con respecto a un solo eje [King 1998]. Los acelerómetros suelen estar basados en sistemas pendulares y su precisión suele ser crítica [Gonzalez 1996]. Si se integra el valor de aceleración medido con respecto al tiempo, se obtiene un valor de velocidad. Si se integra el valor de velocidad nuevamente se obtiene un valor de posición (en realidad un desplazamiento). Si se conoce una posición inicial y una dirección de trayectoria, es posible calcular la posición actual [King 1998].

Para medir los ángulos de orientación se emplean giróscopos que pueden ser mecánicos u ópticos. Es posible también medir el ángulo de orientación empleando brújulas [Gonzalez 1996].

Un sistema inercial requiere tres acelerómetros montados en tres ejes ortogonales, alineados respectivamente de Norte a Sur, de Este a Oeste y Verticalmente. Para mantener esta orientación a pesar de las maniobras del vehículo, los acelerómetros se suspenden en un conjunto de cardanes°.

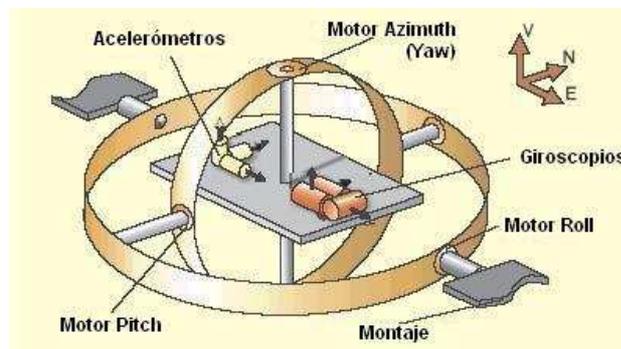


Figura 4.3: Plataforma inercial usando cardanes

Errores del sistema

A diferencia de los sistemas odométricos, los sistemas de navegación inercial no se ven afectados por los problemas derivados de la interacción del vehículo con el suelo, además de que pueden corregir los efectos de las ondulaciones o las irregularidades del terreno. Esto hace que, en la práctica, sean

mas fiables y precisos que los sistemas basados en odometría, aunque como contrapartida son mas frágiles y caros que estos [Gonzalez 1996].

4.2.3. Errores de Dead Reckoning

La estimación mediante métodos de Dead Reckoning no resulta suficientemente precisa para la mayoría de las aplicaciones. El motivo no es debido tanto a los errores que los sensores pudieran cometer, sino al hecho de que estos se van acumulando durante la navegación, lo que origina que la región de incertidumbre asociada a la posición y orientación del vehículo vaya creciendo conforme este se mueve [Gonzalez 1996].

4.3. Sistemas de Posicionamiento Satelital

Un Sistema de Posicionamiento satelital está constituido por una constelación de satélites que transmite rangos de señales utilizados para el posicionamiento y localización en cualquier parte del globo terrestre, ya sea por tierra, mar o aire [Lewis 2005].

A continuación se describen algunos sistemas de posicionamiento satelital.

4.3.1. GPS

El sistema de posicionamiento global conocido como GPS (Global Positioning System) es un sistema de navegación basado en radio [Ochieng 2003]. Fué fundado por el departamento de defensa de los Estados Unidos de Norteamérica en la década del 60. Ha sido concebido para obtener cobertura global desde el Ecuador hasta los Polos. Posee una constelación de 24 satélites que se mueven en 6 órbitas diferentes, teniendo cada una de ellas 4 satélites [Longley 2000].

Cada satélite lleva a bordo relojes atómicos para asegurar la exactitud de las marcas de tiempo y la estabilidad de la frecuencia emitida [Del Cogliano 2001].

Este tipo de posicionamiento posee la ventaja de no verse influenciado por cuestiones climáticas y poseer alta precisión. Por otro lado, el posicionamiento sólo es posible si el usuario recibe un número suficiente de satélites. Particularmente, no es posible usar esta técnica dentro de edificios [Schiller 2004].

El uso de la señal es gratuito pero se requiere de un receptor GPS. El mecanismo para la obtención de información consiste de una comunicación unidireccional desde el satélite hacia el receptor del usuario.

Existen dos servicios de GPS:

- PPS (Precise Positioning System): con una precisión de 22 metros. Este servicio está encriptado y sólo puede ser usado por las fuerzas armadas de los E.E.U.U.
- SPS (Standard Positioning System): Habilitado para el uso civil, posee una precisión de 100 metros.

El sistema de posicionamiento GPS, está sujeto a los siguientes errores:

- Error de reloj: Debido a la exactitud en los relojes, se produce un error de 1.5 metros en la posición calculada
- Fluctuación de órbita: El movimiento de los satélites no es exactamente igual al calculado para su órbita debido a la fuerza de gravedad ejercida por el sol y la luna, por ejemplo. Esto causa un error de 2.5 metros
- Desorden atmosférico: La presión atmosférica y las condiciones climáticas causan un error de 0.5 metros
- Desorden en la ionósfera: Las partículas presentes en la ionósfera causan un error de 5 metros
- Múltiples caminos: El reflejo de la señal en el ambiente del receptor generan un error de 0.6 metros

Además de los errores mencionados anteriormente, hasta el año 2000 la señal correspondiente al servicio SPS fue distorsionada de manera artificial para evitar mediciones precisas. Luego de la eliminación de dicha distorsión, la señal adquirió una precisión de 25 metros.

Se prevee el desarrollo de un nuevo servicio el cual se ha iniciado en el año 2003 y se prevee que se extenderá hasta el año 2012 [Schiller 2004]. El sistema permite obtener de manera relativamente fácil la posición (X,Y,Z) de una entidad [Longley 2000] [Del Cogliano 2001].

DGPS

La precisión del GPS es a menudo insuficiente, con el GPS Diferencial (DGPS) se puede obtener una mejora en la precisión, mediante la ayuda de estaciones terrestres ubicadas en posiciones conocidas con exactitud [Del Cogliano 2001]. Debido a este conocimiento la estación puede determinar el error en la señal del satélite [Thompson 2003].

Funcionamiento del sistema GPS

Para obtener la posición de una entidad en el espacio, es necesario recibir, al menos, señal de tres satélites. De ellos se debe conocer su posición exacta (P_s) y la distancia exacta entre el satélite (R_i) y la entidad a posicionar (E) la cual supondremos sobre la superficie terrestre. De este modo se generarán en el espacio tres esferas alrededor de cada satélite, cada una de ellas con radio R_i , donde el subíndice i representa el número de satélite. La intersección de las tres esferas generará dos puntos de coincidencia, uno sobre la superficie terrestre y el otro no (Figura 4.4).

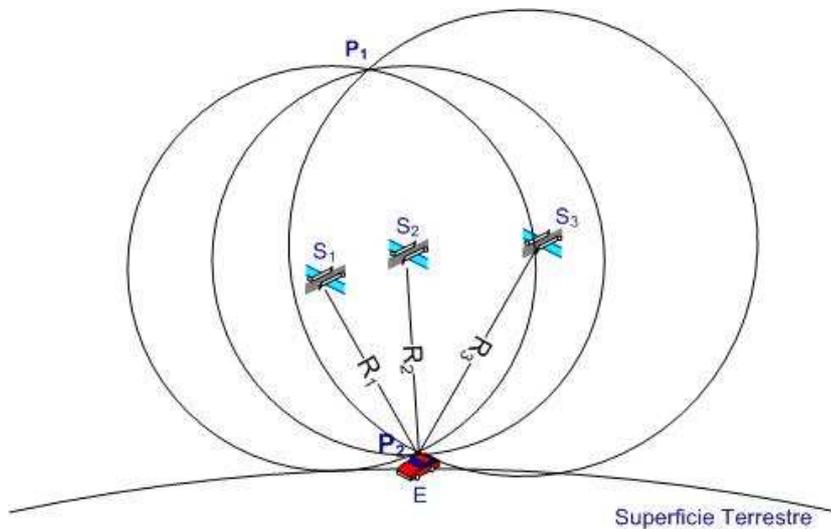


Figura 4.4: Generación de puntos con GPS

En la Figura 4.4 se visualizan tres satélites captados por el receptor GPS, denominados S_1 , S_2 y S_3 respectivamente, los cuales se encuentran posicionados en coordenadas PS_1 , PS_2 y PS_3 . Se conoce la distancia R_i desde cada satélite al vehículo E . Luego de generar esferas con radio R_i cada una de ellas, se detectan los puntos P_1 y P_2 , ubicados en el espacio y sobre la superficie terrestre respectivamente. Dado que el vehículo (E) se supuso anteriormente sobre la superficie terrestre, la posición en cuestión es P_2 .

Formalmente, a partir del trabajo permanente del sistema de control, el usuario dispone de coordenadas X_i, Y_i, Z_i para cada satélite i .

Por otro lado, la señal permite a los receptores la medición de las distancias R_i para cada satélite S_i .

Cada satélite observado permite construir una ecuación de la forma:

$$R_i^2 = (X_i - X_u)^2 + (Y_i - Y_u)^2 + (Z_i - Z_u)^2 \quad (4.12)$$

Donde X_u, Y_u, Z_u representa la posición del usuario y el resto son datos conocidos.

Ya que se rastrean varios satélites simultáneamente, todas las ecuaciones de un instante determinado, constituyen un sistema de ecuaciones de tres incógnitas, las coordenadas del usuario X_u, Y_u, Z_u [Del Cogliano 2001].

4.3.2. Otras Redes Satelitales

Existen otras redes satelitales de posicionamiento, como por ejemplo GLONNAS (*Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*).

GLONNAS constituye una red rusa cuya constelación posee 24 satélites con un servicio militar y otro civil, proveyendo una precisión de 26 metros. Comenzo a operar en el año 1996, pero debido a su corto tiempo de vida, muchos de los satélites de su constelación fallan. En el año 2000 sólo había disponibles 10 satélites lo que dificultaba la cobertura global. En febrero de 2004 sólo 9 satélites estaban operacionales [Schiller 2004].

Por otro lado, la comunidad europea, se encuentra trabajando sobre una nueva red satelital llamada GALILEO. Se planea para el año 2006 poner en órbita el primero de los 30 satélites que formarán la constelación. La puesta en funcionamiento de GALILEO esta prevista para el año 2008 [Schiller 2004]

4.3.3. Degradación de precisión

La performance de los receptores basados en sistemas satelitales se ve disminuida en zonas cubiertas de mucho follaje y en túneles urbanos. Bajo las circunstancias mencionadas, los receptores satelitales pueden no ser capaces de observar la cantidad de satélites necesaria para determinar una posición, experimentando el fenómeno denominado enmascaramiento de la señal [Andersson2004].

4.4. Integración de sistemas de posicionamiento

Para obtener una mejor estimación de la posición (reducir la incertidumbre o validar la información adquirida [Gonzalez 1996]) se suelen combinar los datos procedentes de diferentes sistemas de posicionamiento mediante algoritmos de fusión sensorial como el filtro de Kalman y los algoritmos basados en posicionamiento. En caso de disponer de sensores GPS y odómetros,

4. Sistemas de posicionamiento

existen tres posibles modos de utilizarlos conjuntamente en la estimación de la posición de un vehículo [Pozo-Ruz 2000]:

- Utilizar la odometría como estimador de la posición hasta que la distancia recorrida sea superior a un umbral (por ejemplo 10 m.) y entonces acudir a la estimación que proporciona el GPS.
- Emplear como estimador de posición al GPS y cuando no se reciba señal acudir a la estimación del odómetro.
- Utilizar al GPS para mejorar continuamente la estimación proporcionada por el odómetro.

Los sistemas de posicionamiento y sus combinaciones descritas anteriormente, resultan insuficientes cuando la posición de un vehículo desea ser visualizada sobre una red de calles representada en cartografía digital. Este tema será abordado en el siguiente capítulo.

Capítulo 5

Map Matching

En este capítulo se describen técnicas para ajustar posiciones a cartografía digital. Los enfoques geométrico y probabilístico para el proceso de *Map Matching* serán abordados en este capítulo.

5.1. Introducción

Map Matching se refiere al procedimiento de comparar las posiciones estimadas mediante sistemas de posicionamiento con cartografía digital representando una red de calles. Se utiliza para mejorar la precisión de la posición, eliminar el error acumulado mediante el sistema de Dead Reckoning y calibrar los sensores utilizados en el posicionamiento [Zhang 2003].

Los algoritmos de *Map Matching* requieren, como fuente de entrada, información de posicionamiento y cartografía digital. Ciertos errores asociados a estas fuentes de entrada afectan negativamente al resultado de un algoritmo de *Map Matching* [Zhang 2003].

Más allá de su aplicación en diferentes campos, el proceso de *Map Matching* es único en dos aspectos: Los ejes de calle recorridos por el vehículo deben ser identificados inequívocamente, y todos los ejes identificados deben formar una ruta que tenga sentido. Este proceso establece la relación de correspondencia entre dos conjuntos de entidades espaciales: el conjunto de posiciones estimadas del vehículo y el conjunto de ejes viales que conforma la red de calles [Zhou 2005].

El proceso de *Map Matching* se define como la **corrección** de un conjunto de posiciones estimadas respecto a una red de calles. El término corrección define la acción de **corresponder** una posición estimada con un eje de calle y la acción **proyectar** esta posición sobre algún segmento o porción de dicho eje. Estos conceptos serán ampliados en la Sección 5.2.

La corrección puede verse afectada por errores introducidos en las posiciones y/o la red de calles [Marchal 2004]. Los errores relacionados con la estimación de posiciones han sido descritos en el capítulo anterior. En la siguiente sección se detallan algunos errores relativos a la cartografía digital. En este punto cabe destacar que en este trabajo se asume que existe una coherencia entre las posiciones estimadas mediante algún sistema de posicionamiento y el área geográfica representada mediante la cartografía digital.

5.2. Definición del problema

En este trabajo se consideran vehículos que circulan sobre una red de calles y que se encuentran equipados con dispositivos de posicionamiento. Estos dispositivos estiman y emiten la posición y orientación del vehículo en cada instante de tiempo [Marchal 2004].

Mediante el par $(x_i, y_i) \in \mathbb{R}^2$ se denota la coordenada bidimensional estimada en el instante de tiempo t_i . Con θ_i se denota la orientación estimada¹ del vehículo en el instante de tiempo t_i . Ambos datos son provistos por los dispositivos de posicionamiento. A fin de presentar las técnicas de *Map Matching* propuestas en este capítulo, se define una posición p_i en el instante de tiempo t_i como $p_i = (x_i, y_i, \theta_i, t_i)$. El conjunto de las posiciones p_i se denota como \mathbb{P} .

En algunas ocasiones es conveniente contemplar a la velocidad del vehículo como parte de la definición de una posición estimada p_i .

Por otro lado, una red de calles se representa mediante un grafo $g = (N, E)$, donde N es un conjunto de nodos (ver definición 5.3), y E es un conjunto de ejes viales (ver definición 5.2). El conjunto de grafos se denota como \mathbb{G} .

Definición 5.1 (Vértice):

Un vértice v es un par de coordenadas (x, y) .

Definición 5.2 (Eje Vial):

Un eje vial (o arco) (\bar{A}) es una sucesión denotada v_1, \dots, v_n , donde todo v_i con $i \in (1..n)$ es un vértice (ver definición 5.1). Cada par de vértices sucesivos denotados como (A_i, A_{i+1}) , constituyen un **segmento** de eje.

¹ángulo Azimuth^o

Definición 5.3 (Nodo):

Un nodo n es un vértice inicial o final de un eje vial. Es decir, en el eje vial $\bar{A} = v_1, \dots, v_n$, el nodo inicial es v_1 y el nodo final es v_n .

De esta manera, la corrección de una posición puede definirse mediante la función $snap : \mathbb{P} \times \mathbb{G} \rightarrow \mathbb{P} \times \mathbb{E}$, donde: para una posición $p_i \in \mathbb{P}$ y una red de calles $g \in \mathbb{G}$ se determina el eje vial $\bar{A} \in \mathbb{E}$ al cual debe asociarse la posición (correspondencia) y se obtiene una nueva posición p_i' respecto a algún segmento de \bar{A} (proyección).

En algunos casos, como parte del proceso de proyección se corrige la orientación de la posición estimada. Esta orientación se obtiene considerando la orientación del segmento de eje sobre el que se proyecta \bar{A} , basándose en la suposición de que el vehículo circula forzosamente sobre un eje.

Cabe aclarar que, en este contexto, una calle se representa como una sucesión conexas de ejes viales. La figura 5.1 distingue la calle conformada por la sucesión de ejes viales $E_1 \dots E_3$.

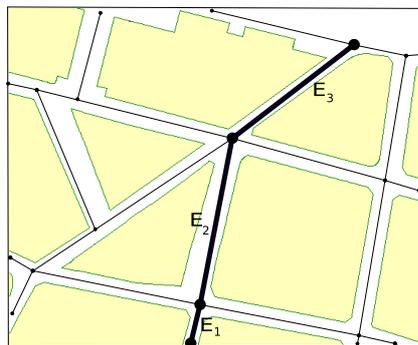


Figura 5.1: Ejes correspondientes a una misma calle

La figura 5.2 muestra una porción de una red de calles donde los vértices se representan mediante círculos (\bullet) y los nodos con diamantes (\blacklozenge). En ella se puede ver también que no siempre existen vértices intermedios entre dos nodos.

5.3. Errores en la cartografía digital

En este trabajo se considera representación topológica para la cartografía digital (ver Sección 3.3.2). Dos tipos de errores pueden presentarse bajo esta

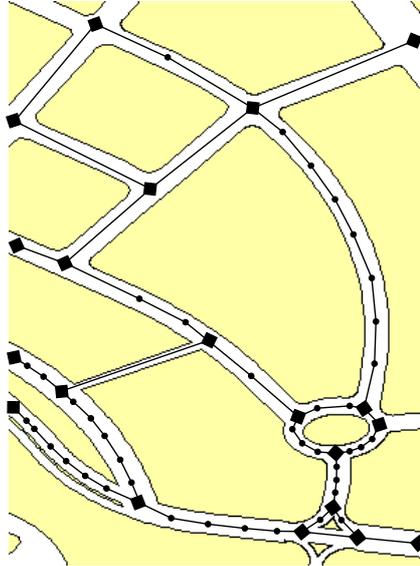


Figura 5.2: Nodos y Vértices

consideración [Zhang 2003]: El **error geométrico**, por un lado, es la diferencia entre una posición real y la correspondiente representada en el mapa. Por otro lado, el **error topológico** es el error en la representación de las relaciones topológicas (ver sección 3.2).

Por otro lado, la precisión de la cartografía digital está afectada por los errores de ploteo, la resolución del mapa y por la necesidad de aproximar la curvatura de las calles mediante el uso de polilíneas [Ochieng 2003].

Errores topológicos contemplados en el Trabajo:

Error en la nodificación: En la parte **I** de la Figura 5.3 se visualizan los nodos A, A', B, B' . Al generar el modelo topológico (ver sección 3.2) subyacente en dicha figura, se ha omitido la creación de un nodo que represente la intersección de los segmentos delimitados por los nodos antes descritos. La parte **II** de la figura muestra la representación correcta para el escenario planteado, donde se ha incorporado el nodo C , generando esto el conjunto de ejes viales $\{E_1, E_2, E_3, E_4\}$.

Ausencia de conexión entre ejes adyacentes: En la parte **I** de la Figura 5.4 se visualiza la presencia de un eje de calle E_4 delimitado por los nodos D y D' . Este error hace que se pierden relaciones de conectividad, imposibilitando entre otras cosas, el cálculo de adyacencia. Este tipo de error suele ser incorporado al momento de digitalizar la información

5. Map Matching

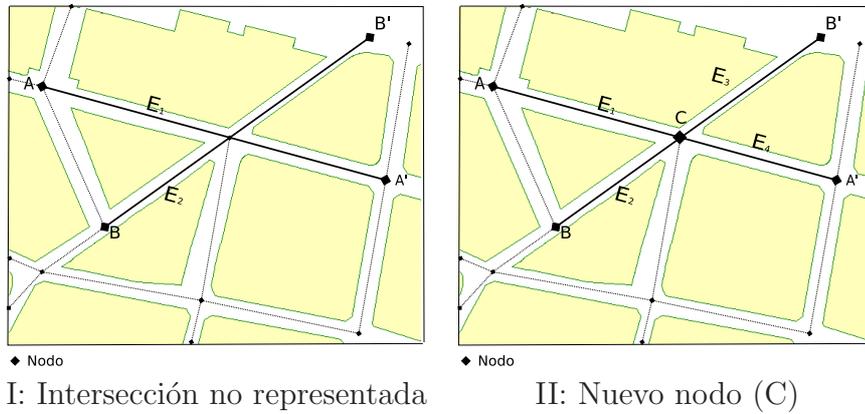


Figura 5.3: Error topológico (1)

para generar la red de calles. La parte **II** de la figura, muestra el error de conectividad resuelto, habiéndose eliminado los nodos D y D' por carecer de sentido luego de la corrección.

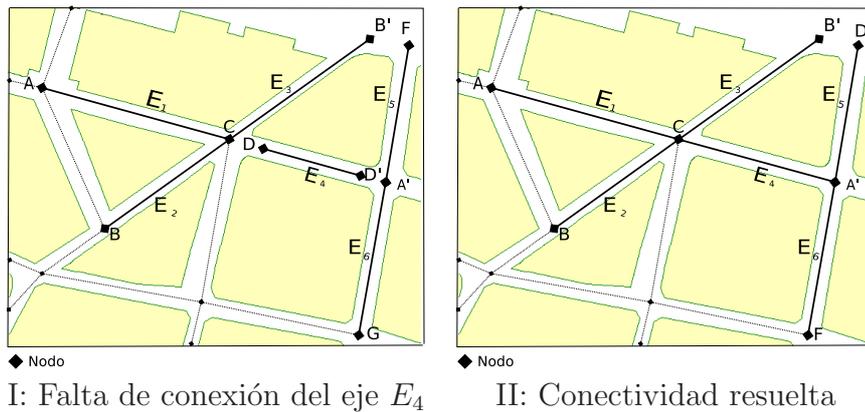


Figura 5.4: Error topológico (2)

Concordancia de Ejes: En la parte **I** de la Figura 5.5 se visualiza la presencia de un eje E_7 delimitado por los nodos C y D . Debido a su ubicación, la representación de E_7 sugiere un error de conectividad. Dicho error no permite representar la relación de adyacencia de ejes pertenecientes a una misma calle (en este caso los ejes E_1 y E_4). Este tipo de errores suelen ser incorporados al momento de digitalizar la información para generar la red de calles. La parte **II** de la figura, muestra el error de concordancia resuelto, habiéndose eliminado el nodo D y el eje E_7 , y quedando $E_3 = C, B'$ y $E_4 = C, A'$.

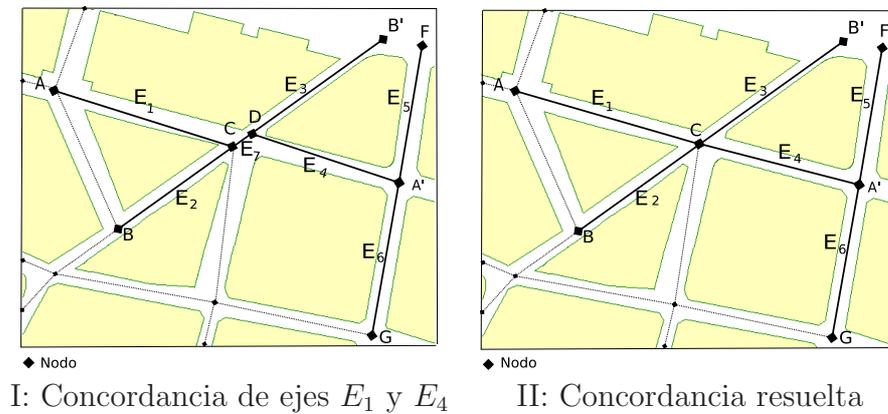


Figura 5.5: Error topológico (3)

Ausencia de representación: En la parte **I** de la Figura 5.6 se visualiza la omisión de un eje de calle que conecte el nodo **C** con E_4 . Esta omisión se origina en el proceso de digitalización. La parte **II** de la figura muestra la corrección del error presentado en la parte I, agregando el nodo **F** e indicando los nuevos ejes de calle E_5 y E_6 obtenido de modificar E_4 de la parte I y el eje E_7 .

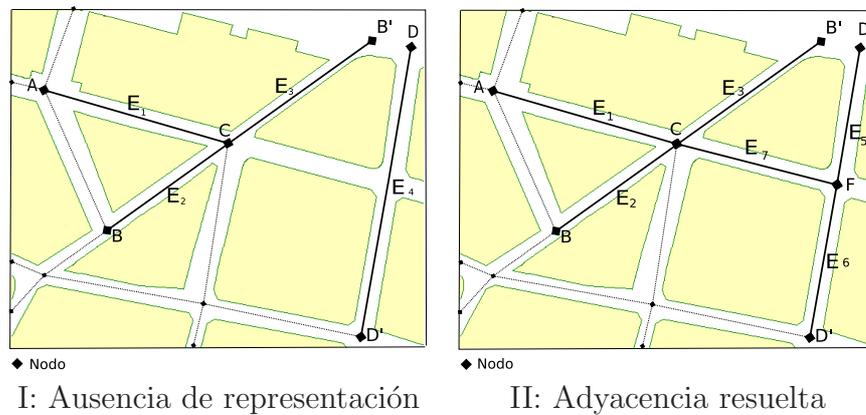


Figura 5.6: Error topológico (4)

Exceso en la representación: El último error destacado en esta sección se presenta cuando al momento de digitalizar, se prolongan calles generando ejes inexistentes en la realidad a abstraer. La parte **I** de la Figura 5.7 muestra esta situación mediante la representación del eje E_6 , mientras que la parte **II** muestra la misma red de calles en la que se ha corregido el error antes descripto.

5.7

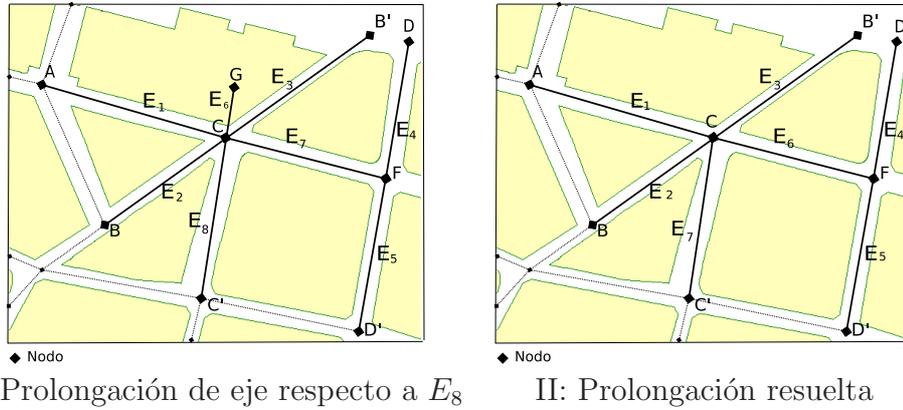


Figura 5.7: Error topológico (5)

5.4. Métodos Geométricos de Map Matching

Los métodos Geométricos llevan a cabo el proceso de *Map Matching* empleando solamente información geométrica respecto a la posición estimada a corregir, la red de calles y, en casos particulares, información de posiciones corregidas previamente.

A continuación se describen algunos de los métodos Geométricos:

5.4.1. Punto a Punto

En el método punto a punto las posiciones de los vehículos son proyectadas al vértice más cercano perteneciente a un eje vial. En este método se calcula la distancia Euclidiana entre la posición estimada del vehículo y todos los vértices pertenecientes a la red de calles [Fontaine 2004].

Como se dijo anteriormente, un método de *Map Matching* debe definir un criterio de correspondencia y un criterio de proyección (ver Sección 5.2). En este método, la proyección (ver Sección 5.2) consiste en generar una nueva posición a partir del vértice cuya distancia a la posición estimada es mínima, mientras que la correspondencia consiste en seleccionar el eje que contiene a dicho vértice .

Sea $p = (x, y, \theta, t)$ la posición estimada por el dispositivo en el instante de tiempo t . Sea $g = (N, E)$ (ver Sección 5.2) la red de calles a considerar. Sea $v = (x_v, y_v)$ el vértice de g con mínima distancia Euclideana a P y sea \bar{A} un eje vial perteneciente a g , que contiene al vértice v . De esta manera, la función de corrección se define:

$$\text{snap}_{pp}(p, g) = (p', \bar{A}), \text{ donde } p' = (x_v, y_v, \theta, t) \quad (5.1)$$

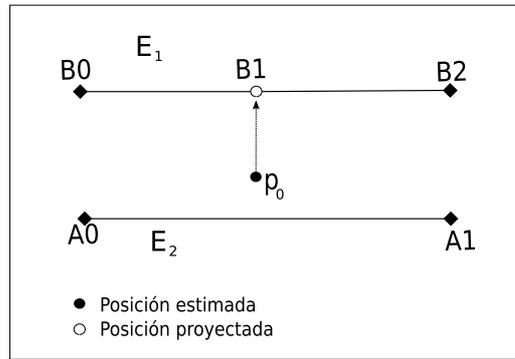


Figura 5.8: Error en la aplicación del método Punto a Punto

Este método no corrige la orientación de la posición estimada, por lo que el ángulo θ es el mismo en p y en p' .

La ventaja de este método es la simplicidad del algoritmo y que no requiere tiempo de cómputo muy significativo, pues es lineal con respecto al tamaño de la red. Sin embargo este método es poco preciso y propenso a inestabilidad y errores. La habilidad del método para proveer buenos resultados depende en gran parte de las características de la red que está siendo examinada. Aquellos ejes con más puntos intermedios serán elegidos, en promedio, para proyectar más posiciones que los ejes con menos puntos [Fontaine 2004].

5.4.2. Punto a Eje

El método **Punto a Eje** proyecta la posición estimada al segmento de eje mas cercano, no necesariamente a un vértice intermedio de este eje. Si se supone que el eje debe ser lineal entre cada par de vértices intermedios, es posible calcular el segmento dentro del eje que es más cercano a la posición (ver definición 5.4). Entonces se proyecta la posición al punto más cercano sobre dicho segmento [Andersson2004].

El proceso de *correspondencia* en el método Punto a Eje obtiene como resultado el eje \bar{M} de menor distancia (considerando la noción de distancia de la definición 5.4) respecto a la posición estimada.

Definición 5.4 (Distancia punto a eje):

Mínima distancia (perpendicular) entre una punto $r = (x, y) \in \mathbb{R}$ y un eje $\bar{A} = A_1, \dots, A_n$. Es decir:

$$D_{pe}(r, \bar{A}) = \min\{d_i : d_i = D_p(r, seg_i)\}$$

donde seg_i es el segmento de eje entre los vértices A_i y A_{i+1} (ambos vértices pertenecen al eje \bar{A}). La función D_p es la distancia perpendicular (definición A.2 del apéndice A)

Por otro lado, el proceso de *proyección* calcula la posición p' sobre el eje \bar{M} (elegido en el proceso de correspondencia) que se encuentra a una distancia mínima de la posición a corregir. La posición p' se encuentra sobre algún segmento \bar{M}_i perteneciente a \bar{M} . En la definición 5.5 se formaliza el proceso de proyección.

Definición 5.5 (Proyección punto a eje):

La proyección de un punto r a un eje $\bar{A} = A_1, \dots, A_n$ es el punto $r' = proy_{pe}(r, \bar{A})$. Sea S el segmento $\bar{A}_i\bar{A}_{i+1}$ de \bar{A} tal que $D_{pe}(r, \bar{A}) = D_p(r, S)$. Es decir que S es el segmento que minimiza la distancia perpendicular a r . Así se obtiene:

$$proy_{pe}(p, \bar{A}) = proy(p, S)$$

donde $proy$ es la proyección perpendicular (definición A.1 en el apéndice A).

Es posible redefinir la función de corrección *snap* considerando este método. Sea $p = (x, y, \theta, t) \in \mathbb{P}$, sea \bar{C} el eje con mínima distancia D_{pe} a la posición p .

$$snap_{pe}(p, g) = (p', \bar{C}), \text{ donde } p' = (x', y', \theta, t) \quad (5.2)$$

donde $(x', y') = proy_{pe}((x, y), \bar{C})$.

Este método debería proveer resultados más acertados que el método anterior, debido a que el número de puntos intermedios de los ejes no tienen influencia sobre el proceso de ajuste. Además, no tiene mayor complejidad de cómputo pues sólo se lleva a cabo un cálculo más por cada eje. Además, puede ser inestable en casos de ejes paralelos cercanos [Fontaine 2004]. Dado que este método no considera la trayectoria del vehículo o la topología, podría asignar las sucesivas posiciones a dos ejes paralelos de manera oscilante, sin haber conexión topológica entre ellos (ver Figura 5.9).

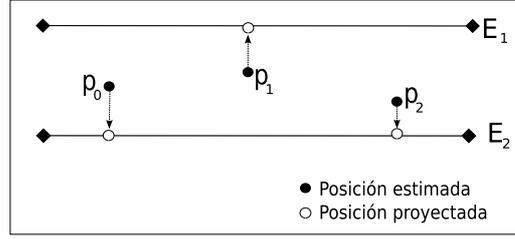


Figura 5.9: Error en la aplicación del método Punto a Eje

5.4.3. Eje a Eje

El método eje a eje, a diferencia de los dos anteriores, considera una secuencia de posiciones estimadas para corregir una nueva posición. La secuencia tenida en cuenta se denomina **contexto** de la posición, y se utiliza para construir una polilínea que representa trayectoria. Este método consiste en comparar dicha polilínea con los ejes de la red de calles y elegir el eje vial de mayor similitud. Esto sugiere la necesidad de establecer una noción de similitud entre ejes, y para esto se define la **distancia eje a eje** que se describe en la definición 5.6.

Definición 5.6 (Distancia eje a eje):

La distancia entre dos ejes \bar{A} y \bar{B} es el la distancia promedio de cada punto de \bar{A} al eje vial \bar{B} . Sea $\bar{A} = a_1, \dots, a_n$ y $\bar{B} = b_1, \dots, b_m$, donde $n \in \mathbb{N}$, $m \in \mathbb{N}$, y todos los a_i y b_i son vértices. Así la distancia eje a eje se define como:

$$D_{ee}(A, B) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_{pe}(a_i, B))$$

donde D_{pe} es la distancia de un punto a un eje (definición 5.4).

En este contexto, la función de corrección *snap* requiere, como dato de entrada, además de la posición estimada y la red de calles, el contexto de la posición. En este trabajo se considera que el contexto de una posición $p = (x, y, \theta, t)$ es un conjunto ordenado de posiciones $C = c_1, \dots, c_n$ correspondientes a instantes de tiempo anteriores a t . Sea \bar{E} la polilínea formada por el conjunto C más la posición p . Es decir, $C' = c_1, \dots, c_n, p$. Además, sea \bar{A} el eje de mayor similitud (considerando la definición 5.6) a C' . Entonces la función de corrección *snap* se define como sigue:

$$\text{snap}_{ee}(p, C, g) = (p', \bar{A}) \quad (5.3)$$

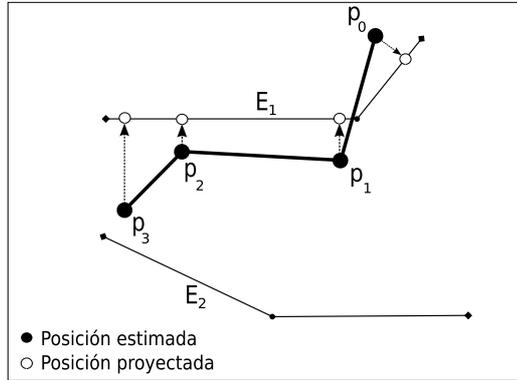


Figura 5.10: Ejemplo de corrección aplicando el método Eje a Eje

donde p es la posición estimada, C es el contexto de p y $g \in \mathbb{G}$ es una red de calles.

La figura 5.10 muestra un ejemplo donde se visualiza el resultado de aplicar el método eje a eje. La posición a corregir es P_3 y el contexto utilizado está formado por P_0 , P_1 y P_2 . En este ejemplo se evidencia que, si bien la distancia perpendicular de P_3 al eje E_2 es menor que la distancia perpendicular al eje E_1 , la distancia eje a eje determina que la corrección de P_3 debe hacerse sobre el eje E_1 .

Este algoritmo otorga mejores resultados que los dos métodos geométricos descritos anteriormente. Sin embargo sufre de algunas deficiencias, como por ejemplo cuando las curvas a comparar poseen longitudes diferentes [Andersson2004].

5.4.4. Métodos geométricos considerando topología

Los métodos geométricos pueden mejorarse mediante la inclusión de información topológica de la red de calles [Fontaine 2004]. Esta información permite incorporar al mecanismo de Map Matching la trayectoria del vehículo, la dirección del trayecto respecto de los ejes, y la conectividad de la red. La incorporación se lleva a cabo mediante la aplicación de **funciones de optimización** y procedimientos heurísticos que permitan determinar la factibilidad de cierta trayectoria.

Las funciones de optimización se aplican sobre los ejes de la red de calles para asociarle a cada uno un puntaje. Luego se elige el eje de mejor puntaje, de acuerdo a algún criterio. La proyección de la posición estimada se realizará sobre dicho eje.

Usualmente, una función de optimización contempla para cada eje:

1. La distancia entre la posición estimada del vehículo y el eje.
2. La diferencia entre la orientación estimada del vehículo y la orientación del eje.
3. La relación de adyacencia respecto al eje sobre el cual se proyectó la última posición corregida.

Esto muestra tres criterios diferentes para evaluar cada eje de la red de calles. Una función de optimización requiere definir una función para cada uno de estos criterios que se desee contemplar.

El criterio de distancia se debe describir mediante una función opt_d que se aplique a la posición estimada $p \in \mathbb{P}$ y al eje $\bar{A} \in \mathbb{E}$ que se desea evaluar. Para el criterio de orientación se necesita definir una función opt_o que pondere la similitud entre la orientación de la posición estimada p y la orientación del eje \bar{A} . El criterio de adyacencia requiere una función opt_{ady} que relacione el eje \bar{A} con otro eje $\bar{B} \in \mathbb{E}$ sobre el cual se proyectó la posición $p_{n-1} \in \mathbb{P}$ anterior a p .

Por lo tanto:

$$\begin{aligned} opt_d &: \mathbb{E} \times \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{R}^+ \\ opt_o &: \mathbb{E} \times \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{R} \\ opt_{ady} &: \mathbb{E} \times \mathbb{E} \times \mathbb{G} \rightarrow P(\mathbb{E}) \text{ (ver nota } ^2 \text{ al pié)} \end{aligned}$$

Finalmente se debe considerar en conjunto el resultado de la aplicación de cada criterio para determinar el puntaje del eje evaluado. Para esto, la función de optimización opt requiere una función f que relacione estos tres resultados:

$$opt(\bar{A}, p, \bar{B}, g) = f(d, o, a)$$

donde $d = opt_d(\bar{A}, p)$, $o = opt_o(\bar{A}, p)$ y $a = opt_a(\bar{A}, \bar{B}, g)$.

A continuación se describe una posible función de optimización para el método punto a eje mediante la definición de las funciones opt_d , opt_o y opt_{ady} .

$$opt_d(\bar{A}, p) = D_{pe}((x, y), \bar{A}), \text{ donde } p = (x, y, \theta, t)$$

$opt_o(\bar{A}, p) = |\theta - \theta_A|$ donde $p = (x, y, \theta, t)$ y θ_A es la orientación del segmento S de \bar{A} que minimiza la distancia perpendicular a la posición p .

² $P(\mathbb{E})$ denota el conjunto de partes de \mathbb{E}

$opt_{ady}(\bar{A}, \bar{B}, g) = \{\bar{C}_1, \dots, \bar{C}_n\}$ donde \bar{B} es el eje sobre el cual se proyectó la última posición y cada $C_i \in \mathbb{E}$ es adyacente a $C_{i+1} \in \mathbb{E}$. Además \bar{C}_1 es adyacente a \bar{A} y \bar{C}_n es adyacente a \bar{B} .

Finalmente, la función opt otorgará mejor puntaje al eje que minimize opt_d y opt_o y genere la menor cantidad de elementos mediante opt_{ady} , si este conjunto es no vacío, es decir, existe conectividad entre los ejes \bar{A} y \bar{B} . Los ejes \bar{A} para los cuales $opt_{ady}(\bar{A}, \bar{B}, g) = \emptyset$ no se contemplan en la comparación respecto a los restantes ejes de la red de calles.

Con esta definición de la función opt es posible definir la función de corrección $snap_{top}$ como indica la ecuación 5.4. Sea $p = (x, y, t, \theta)$ la posición estimada a corregir. Sea A_0 el eje al cual se ajustó la posición anterior a p , y sea $g \in \mathbb{G}$.

$$snap_{top}(p, A_0, g) = ((x', y', t, \theta_A), \bar{A}) \quad (5.4)$$

donde el eje \bar{A} es tal que $opt(\bar{A}) = \max\{opt(\bar{A}_i) : A_i \in \mathbb{E}\}$ (\bar{A} obtuvo máximo valor de opt) y sea $(x', y') = proy_{pe}((x, y), \bar{A})$.

5.5. Métodos Probabilísticos de Map Matching

Los métodos probabilísticos intentan conseguir una mejor calidad considerando de manera más precisa el nivel de incertidumbre de las estimaciones, pero en general también requieren de mayor costo computacional que los métodos geométricos simples o en consideración de topología [Fontaine 2004].

Dos posibles enfoques de los métodos probabilísticos se conocen como **método probabilístico simple** y **técnica de múltiples hipótesis**.

El enfoque de los métodos probabilísticos utiliza las características del error inherente a la estimación de posiciones para mejorar el proceso de Map Matching. Bajo el conocimiento de la naturaleza de los errores de estimación, es posible determinar un área entorno a la posición estimada. Esta área incluye, con una cierta probabilidad, a la posición real y se denomina **área de confianza**. De esta manera se puede restringir el conjunto total de ejes (\mathbb{E}) al subconjunto de ejes que intersectan con esta área.

Esencialmente, la consideración de la naturaleza del error puede usarse para restringir el área de decisión para la función de Map Matching. Un criterio natural establece que si el subconjunto contiene un solo eje, entonces es correcto proyectar la posición estimada a dicho eje. Si en cambio se encuentra más de un eje, entonces pueden utilizarse otros criterios de selección como

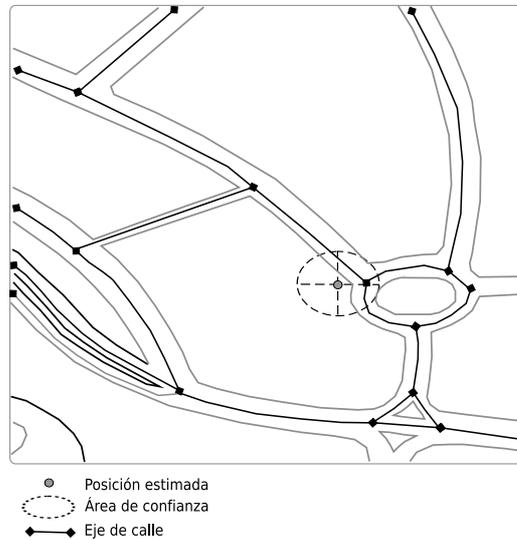


Figura 5.11: Área de confianza entorno a la posición estimada

los que se describió en la sección 5.4. Por último, si no existen ejes dentro del área de confianza, entonces se debe tomar un criterio adicional dependiendo del dominio sobre el cual se trabaja.

5.5.1. Método probabilístico simple usando Belief Theory

Belief Theory es una generalización del teorema de Bayes para el tratamiento de la incertidumbre. Se utiliza para fusionar información heterogénea con el objetivo de obtener la mejor decisión [Najjar 2003]. En esta sección se describe un método de *Map Matching* que, considerando varios criterios, aplica esta teoría para elegir el eje más apropiado.

La entidad básica en *Belief Theory* es un conjunto de respuestas posibles (también llamadas hipótesis) a una pregunta específica. Este conjunto se denomina **marco de discernimiento** (α). El grado de credibilidad de cada hipótesis H_c respecto a un criterio c se representa mediante un número real en el intervalo $[0,1]$. Este valor se obtiene mediante la aplicación de un función de **masa** (m_c) donde: $m_c : \alpha \rightarrow [0, 1]$.

Esta función cumple que:

$$\sum_{H_c \in \alpha} m_c(H_c) = 1$$

La aplicación de la función m_c correspondiente a cada uno de los criterios, permite obtener un conjunto de valores de masa para un segmento. Luego,

la probabilidad del segmento se obtiene aplicando una regla de fusión sobre dichos valores [Najjar 2002], lo que permite determinar el mejor segmento.

Los criterios que habitualmente se tienen en cuenta son los mencionados en la sección 5.4.4, es decir: criterio de distancia, de orientación y de adyacencia. Se debe tomar cada eje del área de confianza y considerando cada criterio por separado evaluar la manera en la que dicho eje responde a la pregunta “¿este eje es el apropiado?”. El marco de discernimiento considerado en este método de *Map Matching* es:

$$\alpha = \{si, no, quizás\}$$

Sea $AC(p)$ el área de confianza entorno a la posición $p \in \mathbb{P}$. Sea m_d la función de masa para el criterio de distancia, sea m_o la función de masa para el criterio de orientación y finalmente, sea m_a la función de masa para el criterio de adyacencia.

Para evaluar un eje $\bar{A}_i \in AC(p)$ respecto a los criterios mencionados anteriormente, se deben utilizar las funciones m_d, m_o, m_a . Una vez obtenidos estos valores, se los debe relacionar mediante la aplicación de una regla de fusión³. El resultado de aplicar una regla de fusión es la obtención de la probabilidad asociada a un eje, la cual se describe mediante dos valores, denominados admisibilidad y credibilidad. El valor de admisibilidad representa su probabilidad mínima y el de credibilidad su probabilidad máxima. Una posible regla de decisión, llamada **regla de la decisión ideal**, es la que elige el eje con mayor valor de admisibilidad que el valor de credibilidad de los ejes restantes pertenecientes a $AC(p)$.

5.5.2. Múltiples Hipótesis

El método de Múltiples Hipótesis mantiene un conjunto de posibles caminos candidatos. La probabilidad de que un camino candidato sea correcto se basa en:

1. la distancia entre la posición estimada y la proyectada al segmento, y
2. la diferencia entre el rumbo del segmento y el rumbo de la posición estimada.

Al igual que el método geométrico con topología, descrito en la sección 5.4.4, contempla características topológicas de la red de calles pero además mantiene un conjunto de posibles caminos hasta llegar a un criterio convergente

³Este concepto no se amplía en el presente trabajo. Para mayor información, se puede consultar [Najjar 2002]

o hasta que el vehículo deja el camino. En dicho momento las posiciones del vehículo se asignan al camino con mayor probabilidad de ser correcto.

Este método generalmente se divide en tres fases: inicial, de construcción de hipótesis y de mantenimiento de hipótesis [Fontaine 2004].

Fase Inicial

Al obtenerse una primera posición estimada $p_0 \in \mathbb{P}$ se identifican todos los ejes \bar{A}_i que se encuentran dentro de $AC(p_0)$. Se calcula la distancia $d_i = d_{pe}(p, \bar{A}_i)$ entre p_0 y cada uno de los ejes de $AC(p_0)$. La probabilidad $prob_{\bar{A}_i}$ de cada eje \bar{A}_i se obtiene teniendo en cuenta la distancia d_i , es decir, a mayor distancia, menor probabilidad.

Mediante la comparación de las probabilidades obtenidas es posible reducir el conjunto de ejes candidatos ($AC'(p_0)$). Una posible reducción puede llevarse a cabo identificando, si existe, el eje cuya probabilidad sea diez veces mayor que las probabilidades de los restantes ejes. En caso de no existir dicho eje se pueden eliminar del conjunto aquellos ejes con probabilidad menor al diez por ciento que el eje de mayor probabilidad.

Fase de construcción de hipótesis

Para cada nueva posición estimada $p_i \in \mathbb{P}$ ($i \in \mathbb{N}^{-\{0\}}$) se calcula $AC(p_i)$, y se generan el conjunto de hipótesis

$$\mathbb{H}_{p_i} = \{(\bar{A}, \bar{B}, \theta_B) : \exists(\bar{A}', \bar{A}) \in H_{p_{i-1}}, \bar{B} \in AC(p_i)\}$$

tal que $\forall(\bar{A}, \bar{B}) \in \mathbb{H}_{p_i}$ existe una conectividad entre \bar{A} y \bar{B} en la red de calles. El valor θ_B es la orientación del segmento S de \bar{B} que minimiza la distancia perpendicular a la posición p_i .

Fase de mantenimiento de hipótesis

Dado que el número de hipótesis hallado en la fase anterior crece exponencialmente con cada nueva posición agregada, se necesita de un mecanismo de descarte de hipótesis. Una opción para llevar a cabo el proceso de descarte es realizar una ponderación de las hipótesis aplicando la siguiente ecuación:

$$score(h, p_i) = \frac{prob_{\bar{A}} \times prob_{\bar{B}} \times \min(\{\Delta Azimuth\})}{\max(\{prob_{\bar{A}_i}\}) \times \max(\{prob_{\bar{B}_i}\}) \times \Delta Azimuth_h}$$

donde $h = (\bar{A}, \bar{B}, \theta_B) \in \mathbb{H}_{p_i}$
 $p_i = (x, y, t_i, \theta)$

5. Map Matching

$$\begin{aligned}\Delta Azimuth_h &= |\theta_B - \theta| \\ \Delta Azimuth &= |\theta_{B_i} - \theta| \\ \bar{B}_i &\text{ es tal que } \exists(\bar{B}', \bar{B}_i) \in \mathbb{H}_{p_i} \\ \bar{A}_i &\text{ es tal que } \exists(\bar{A}', \bar{A}_i) \in \mathbb{H}_{p_{i-1}}\end{aligned}$$

Los valores obtenidos son comparados para controlar si algún camino es suficiente mejor que los restantes (por ejemplo, es diez veces mayor a todos los restantes), o alguno es demasiado desfavorable en relación al de mayor puntaje (por ejemplo, su valor es menor al diez porciento respecto del mayor puntaje).

Esta fase puede ser aplicada por dos motivos:

- Se ha llegado al fin del recorrido, es decir, ya no hay posiciones para procesar.
- Se desea reducir el conjunto de hipótesis para luego continuar procesando posiciones del recorrido.

En el primer caso, las posiciones estimadas del recorrido se asocian con el camino resultante, en caso de haber conseguido solo uno, o con el de mayor puntaje, en caso de haber obtenido mas de uno.

En el segundo caso, a partir de una nueva posición se debe volver a aplicar la fase de construcción tal como fue descripta. Al aplicar nuevamente la fase tercera sobre el nuevo conjunto de hipótesis, la función de ponderación tendrá en cuenta los resultados obtenidos anteriormente. A continuación se describe para esto una nueva función de ponderación llamada *scoreSuc*.

$$scoreSuc(h, p_i) = score(h) \times \frac{prob_{\bar{B}} \times \min(\{\Delta Azimuth\})}{\max(\{prob_{\bar{B}_i}\}) \times \Delta Azimuth_h}$$

$$\begin{aligned}\text{donde } h &= (\bar{A}, \bar{B}, \theta_B) \in \mathbb{H}_{p_i} \\ p_i &= (x, y, t_i, \theta) \\ \Delta Azimuth_h &= |\theta_B - \theta| \\ \Delta Azimuth &= |\theta_{B_i} - \theta| \\ \bar{B}_i &\text{ es tal que } \exists(\bar{B}', \bar{B}_i) \in \mathbb{H}_{p_i} \\ \bar{A}_i &\text{ es tal que } \exists(\bar{A}', \bar{A}_i) \in \mathbb{H}_{p_{i-1}}\end{aligned}$$

Capítulo 6

ALMA

Los capítulos anteriores se han dedicado a la presentación y definición de conceptos involucrados en el proceso de ajuste de posiciones estimadas. El objetivo de este capítulo es relacionar dichos conceptos para presentar la arquitectura de un sistema de ajuste de posiciones estimadas y un modelo orientado a objetos para el ajuste de dichas posiciones a mapas digitales.

6.1. Arquitectura

Una primera aproximación para presentar la arquitectura de un sistema de ajuste de posiciones estimadas, consiste en la modularización del proceso de ajuste en tres módulos operacionales denominados: captura de posiciones, procesamiento de posiciones y generación de resultados.

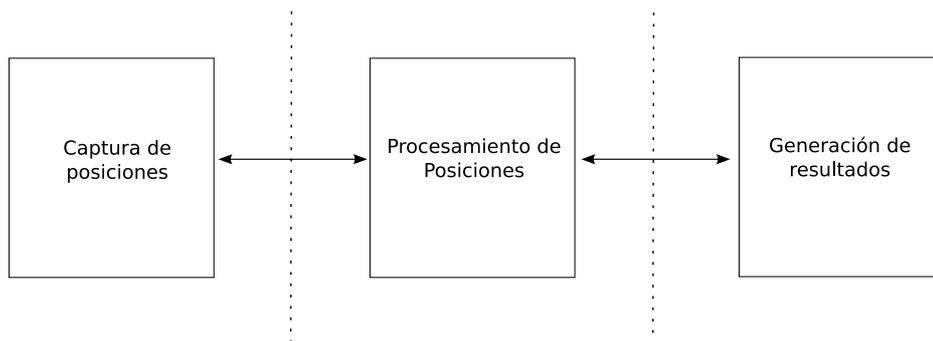


Figura 6.1: Arquitectura del sistema

La figura 6.1 muestra la separación en módulos propuesta anteriormente. Por un lado, el módulo de *captura de posiciones* describe la obtención de posiciones estimadas mediante alguna de las técnicas definidas en el Capítulo

4, por ejemplo GPS, Dead Reckoning o la fusión de ambos mediante algún algoritmo de fusión (Sección 4.4).

El módulo de *procesamiento de posiciones* recibe posiciones estimadas desde el módulo de *captura de posiciones* para llevar a cabo su corrección teniendo en cuenta cierta cartografía que modela la región de trabajo (de acuerdo a lo descrito en el Capítulo 3). Una nueva esquematización, mas detallada, de la arquitectura propuesta se puede ver en la Figura 6.2.

Como se mencionó en el Capítulo 4, los sensores empleados para el posicionamiento pueden necesitar calibración. Dicha calibración puede ser llevada a cabo mediante información generada desde el módulo de *procesamiento de posiciones*, en la figura 6.2 este concepto se refleja mediante el flujo llamado *Calibración de posicionamiento*.

El módulo de *generación de resultados* permite la visualización gráfica de los resultados obtenidos mediante el proceso de ajuste y la obtención de información estadística mediante el análisis de dichos resultados. Esta información estadística puede ser utilizada, entre otras cosas, para mejorar o calibrar el proceso de ajuste (en la figura 6.2 este concepto se refleja mediante el flujo llamado *Calibración de ajuste*).

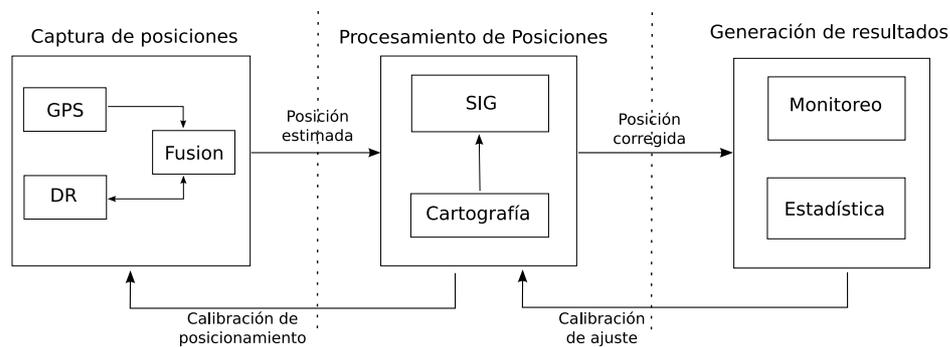


Figura 6.2: Arquitectura del sistema (II)

En el módulo de *captura de posiciones* se describe la retroalimentación del mecanismo de Dead Reckoning provista por los algoritmos de fusión [Andersson2004]. En el módulo de *procesamiento de posiciones*, ilustrado en la Figura 6.2, se distingue un submódulo denominado *SIG* que es el responsable de aplicar las estrategias de corrección sobre las posiciones estimadas. Estas estrategias de corrección combinan información cartográfica con información proveniente del módulo *Captura de Posiciones* para generar información de entrada al módulo *Generación de resultados*. La Figura 6.3 ilustra la representación del submódulo *Estrategias de corrección*.

Cada estrategia de ajuste emplea parámetros particulares durante el pro-

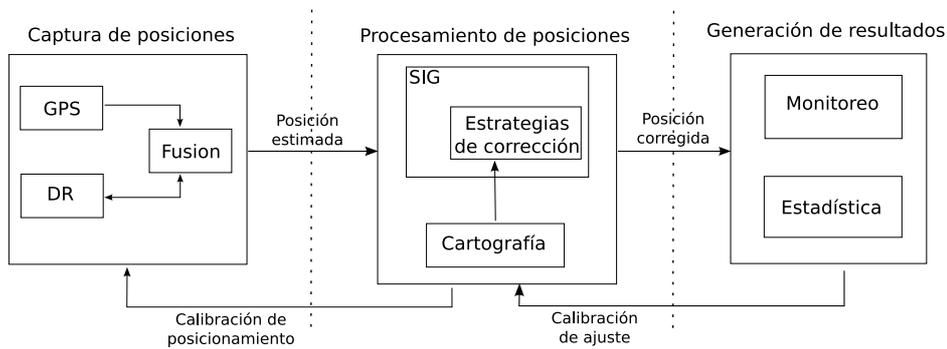


Figura 6.3: Arquitectura del sistema (III)

ceso de ajuste, algunos de ellos determinados por las técnicas de posicionamiento utilizadas. Por ejemplo, los errores introducidos por la técnica de posicionamiento satelital GPS descritos en la Sección 4.3.1. Debido a esto es necesario contemplar parámetros de configuración a ser utilizados por el submódulo de estrategias de corrección, pues colaboran a mejorar la precisión de las posiciones corregidas. La incorporación de este concepto a la arquitectura propuesta se visualiza en la Figura 6.4.

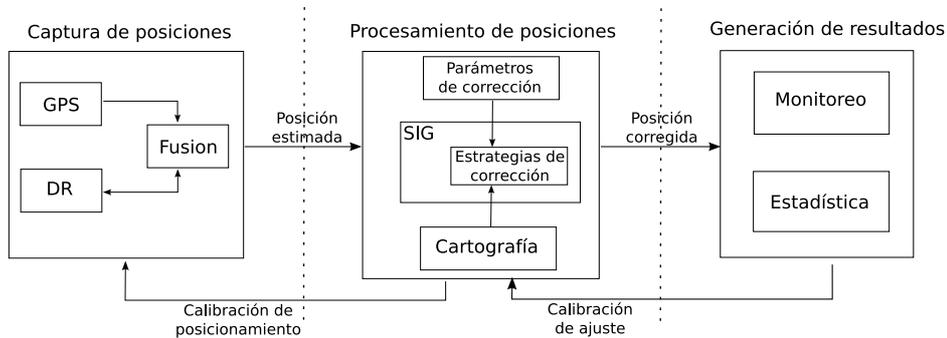


Figura 6.4: Arquitectura del sistema (IV)

Finalmente, el módulo de *generación de resultados* puede generar diferentes clases de información. Por un lado, la aplicable a los casos de estudio descritos en el Capítulo 1, es decir, información relacionada a un vehículo particular. Por otro lado, meta-información que, por ejemplo, indique el grado de congestión de una calle. Retomando los casos de estudio, un posible resultado de monitoreo puede ser el que se visualiza en la Figura 6.5.

La figura 6.5 muestra mediante triángulos (▲) las posiciones estimadas, mientras que con círculos (●) se describen las posiciones corregidas para un vehículo aplicando alguna estrategia de corrección.

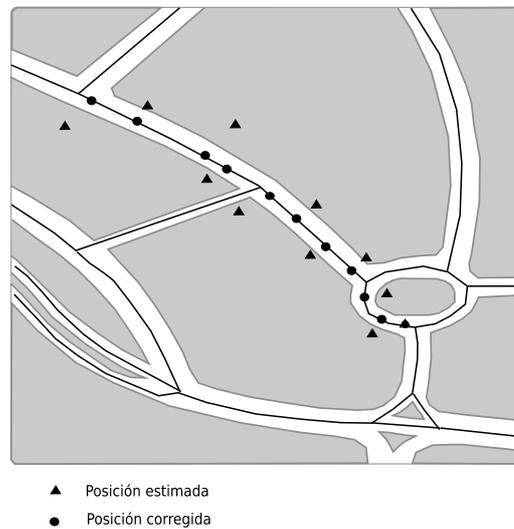


Figura 6.5: Resultado del monitoreo del vehículo

6.2. Modelo Orientado a Objetos

Mediante el uso del paradigma Orientado a Objetos, en esta sección se modelarán los conceptos relevantes de la arquitectura propuesta en la sección anterior.

Como se mencionó en el Capítulo 1, se asume que los vehículos considerados están provistos de dispositivos de posicionamiento. Para la construcción del modelo propuesto se emplea notación UML [Fowler1997]. Las clases y métodos abstractos se identifican mediante el uso de letra cursiva. Por otro lado, los estereotipos utilizados representan patrones de diseño.

6.2.1. Posicionamiento

El módulo de *captura de posiciones* involucra los aspectos relativos a la técnica de posicionamiento empleada por cada vehículo para estimar su posición a través de un dispositivo de hardware colocado en él. Dado que algunos métodos de ajuste de posiciones se enriquecen empleando el conocimiento de ciertos parámetros de posicionamiento, es importante representar estos valores. Estos parámetros pueden afectar aspectos generales de la técnica de posicionamiento, o particulares relacionados con el dispositivo tecnológico (hardware) que fue instalado en el vehículo. En la Figura 6.6 se presenta una primera aproximación para representar estos aspectos, en la cual se visualiza que todo vehículo posee un único dispositivo de posicionamiento.

La clase *DispositivoPosicionamiento* muestra en su representación el este-

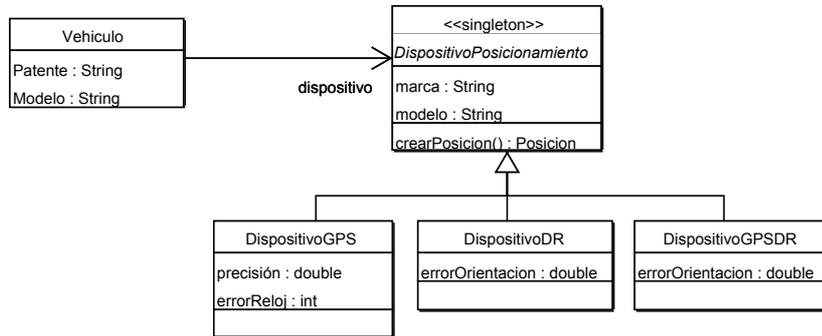


Figura 6.6: Captura de posiciones (I)

reotipo *singleton* puesto que respeta el patrón de creación Singleton [Gamma 1994]. Esta clase representa al dispositivo de posicionamiento y encapsula la información relacionada con su descripción tecnológica, por ejemplo, un modelo y un fabricante específico. La evolución tecnológica hace que se ofrezcan en el mercado nuevos modelos de dispositivos. Estos dispositivos, pueden diferir en cuanto a los valores de los parámetros contemplados para la técnica de posicionamiento que emplean. Las técnicas de posicionamiento, en cambio, poseen parámetros fijos que no se verán afectados por estos cambios de tecnología. Se decidió desacoplar la técnica de posicionamiento del dispositivo, de modo de encapsular la información propia de las técnicas de posicionamiento. Dado que es conveniente que todos los dispositivos asociados a una técnica manipulen la misma información de ella, se ha decidido, emplear el patrón de creación Singleton [Gamma 1994] para modelar las técnicas de posicionamiento. Esto se visualiza en la Figura 6.7.

El dispositivo de posicionamiento colocado en un vehículo, emite posiciones estimadas acordes a la técnica de posicionamiento asociada a él. Cada técnica de posicionamiento, eventualmente genera posiciones con diferente información, por ejemplo, las posiciones adquiridas mediante el uso de la técnica GPS carecen de información respecto a la orientación, a diferencia de las obtenidas mediante la técnica de Dead Reckoning. Por ésto se ha decidido modelar a las posiciones subclasificándolas de acuerdo a la técnica empleada para obtenerlas (ver Figura 6.8). Por otro lado, las posiciones son tomadas en un instante de tiempo determinado y están constituídas además por un valor bidimensional que representa el valor de la coordenada (x, y) georeferenciado mediante algún sistema de referencia [Lliteras 2000]. Cabe destacar que todas las posiciones estimadas correspondientes a un vehículo se asumen generadas por el dispositivo de posicionamiento colocado en él.

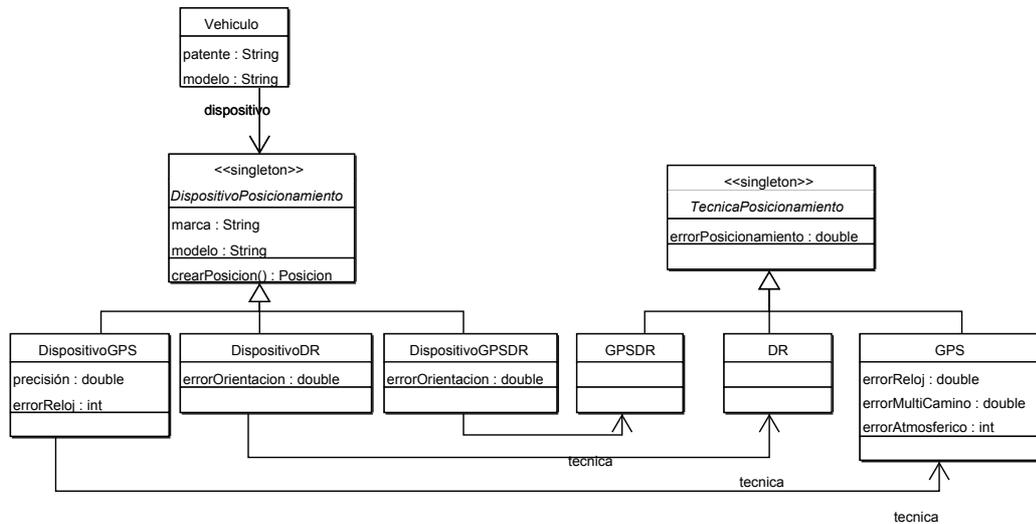


Figura 6.7: Captura de posiciones (II)

6.2.2. Cartografía

Uno de los componentes fundamentales para el ajuste de posiciones es la cartografía. En esta sección se propone un modelo de la cartografía separado en capas temáticas siguiendo el concepto descrito en el Capítulo 3.1. La Figura 6.9 muestra la representación de la cartografía con tres capas temáticas: Manzanas, Construcciones y Red de Calles.

El conjunto de capas a considerar en el modelo propuesto, depende directamente de las estrategias a desarrollar y eventualmente de la visualización gráfica de la información. En el presente trabajo, y como será presentado en la sección 6.2.3, solamente es necesaria la capa de red de calles, las restantes han sido consideradas a modo de ejemplificación de la jerarquía de clases (ver Sección 7.2).

Cada capa posee elementos georeferenciados mediante algún sistema de referencia. En el modelo propuesto mediante la Figura 6.9 todos los elementos de una capa son interpretados en un único sistema de referencia, sin embargo diferentes capas pueden estar georeferenciadas de manera diferente. Para realizar una operación espacial entre elementos con diferentes sistemas de referencia (por ejemplo, elementos pertenecientes a distintas capas), es necesario que previamente se compatibilicen los elementos. La compatibilización de dichos elementos es responsabilidad de la clase *SistemaReferencia*.

Como se mencionó anteriormente, la capa temática a desarrollar en el presente trabajo es la de red de calles. La red de calles ha sido modelada mediante la representación topológica descrita en la Sección 3.3.2.

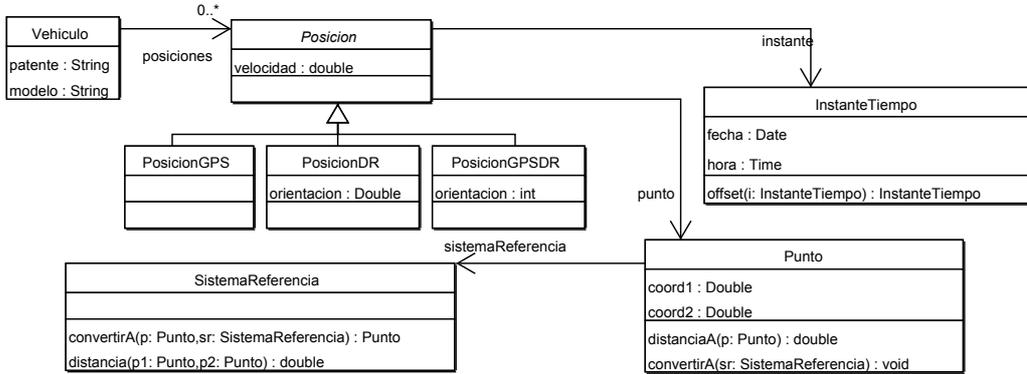


Figura 6.8: Captura de posiciones (III)

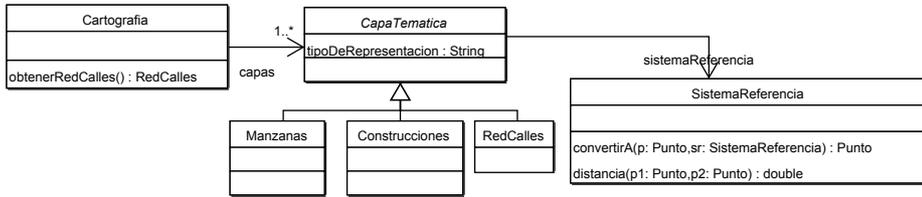


Figura 6.9: Cartografía

En el modelo de la Figura 6.10, un eje de calle está constituido por al menos un segmento y posee una relación de conocimiento con el nodo inicial y final que lo define (ver Definición 5.2). Toda calle debe poseer al menos un segmento al igual que la capa *RedCalles* debe contener al menos una calle. Sin las restricciones antes mencionadas, las estrategias de ajuste descritas en la Sección 6.2.3 carecerían de sentido.

6.2.3. Estrategias

Como se ha mencionado en el Capítulo 5, las estrategias de ajuste pueden ser clasificadas en Estrategias Geométricas y Estrategias Probabilísticas. Esta clasificación se visualiza en la Figura 6.11. Esta jerarquía respeta el patrón de diseño *Strategy* [Gamma 1994] y define el método `ajustar()`. Este método permite corregir las posiciones estimadas de un vehículo, correspondientes a un intervalo de tiempo teniendo en cuenta información contenida en la cartografía.

En el presente trabajo, todas las estrategias modeladas emplean sólo la capa temática *RedCalles* (otras posibilidades se detallan en la Sección 7.2).

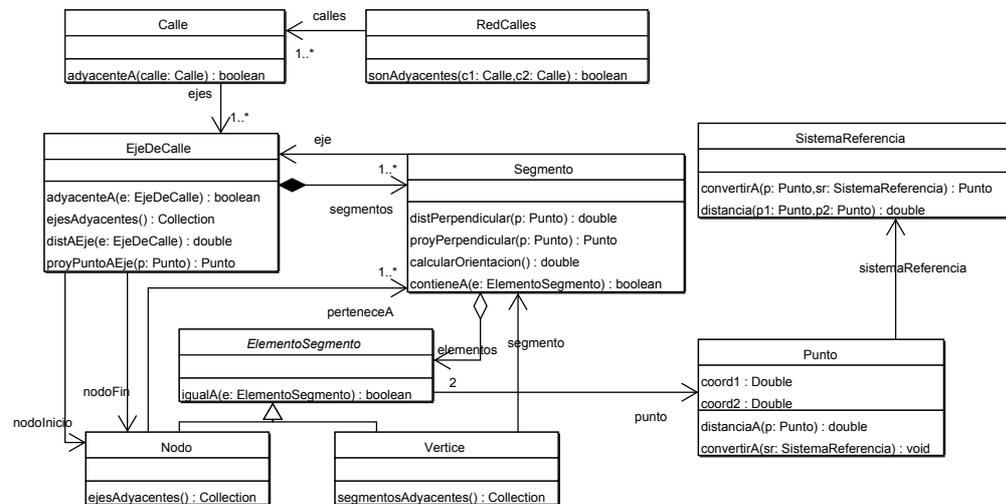


Figura 6.10: Red de Calles

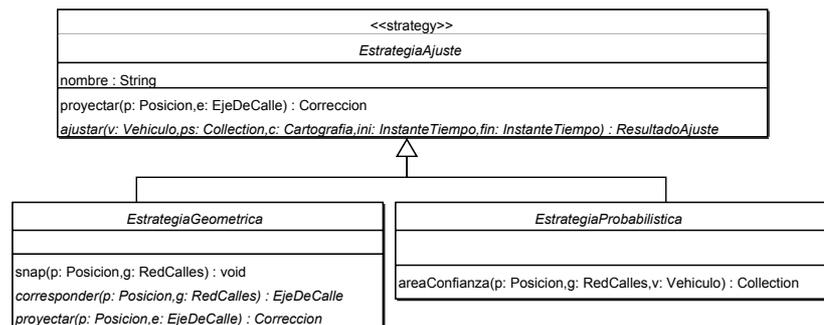


Figura 6.11: Jerarquía de estrategias

Cada subclase concreta de la jerarquía redefine el método `ajustar()` el cual aplica a cada posición estimada el método `snap()`. El método `snap()` está definido en función de los métodos `proyectar()` y `corresponder()`. Estos dos métodos representan los procesos de proyección y correspondencia definidos en la sección 5.1.

El resultado del proceso de ajuste se representa mediante la clase *ResultadoAjuste*. En esta clase se mantiene un conjunto de objetos de la clase *Correccion*. Cada objeto de esta clase asocia una posición estimada con su respectiva posición corregida y el eje de calle obtenido mediante el proceso de correspondencia. La modelización de las correcciones y los resultados de ajuste se visualiza en la Figura 6.12.

En la clase *ResultadoAjuste* se visualizan las variables de instancia *error-*

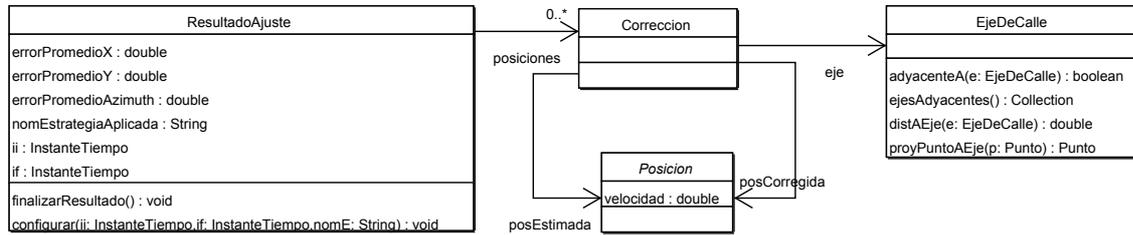


Figura 6.12: Resultado de un ajuste

PromedioX y *errorPromedioY*. Estos errores representan el valor promedio de la distancia entre las posiciones estimadas y sus correcciones respecto al eje X y al eje Y respectivamente. Por otro lado, la variable *errorPromedioAzimuth* representa el valor promedio entre la orientación de las posiciones estimadas y las corregidas. Estos valores se calculan durante el proceso de ajuste, mediante el método `finalizarResultado()` de la clase *ResultadoAjuste*. Además, se ha decidido mantener el intervalo de tiempo de las posiciones estimadas y el nombre de la estrategia que se aplicó para adquirir el conjunto resultado.

Estrategias Geométricas

Las estrategias Geométricas constituyen una jerarquía donde se define el método `snap()` basado en el patrón de diseño *Template Method* [Gamma 1994]. Es decir en la clase *EstrategiaGeometrica* se define el método `snap()`, en término de dos operaciones abstractas (`corresponder()` y `proyectar()`) que las subclases concretas definen para proveer el comportamiento específico (ver Figura 6.13).

La implementación en pseudocódigo del método `snap()` se define a continuación.

```

snap(p:Posicion, g:RedCalles){
    e = corresponder(p,g) ;
    p1 = proyectar(p,e) ;
    ^p1;
}
  
```

En particular se presenta la implementación en pseudocódigo del método `corresponder()` perteneciente a la clase *EstrategiaGeomTopo*.

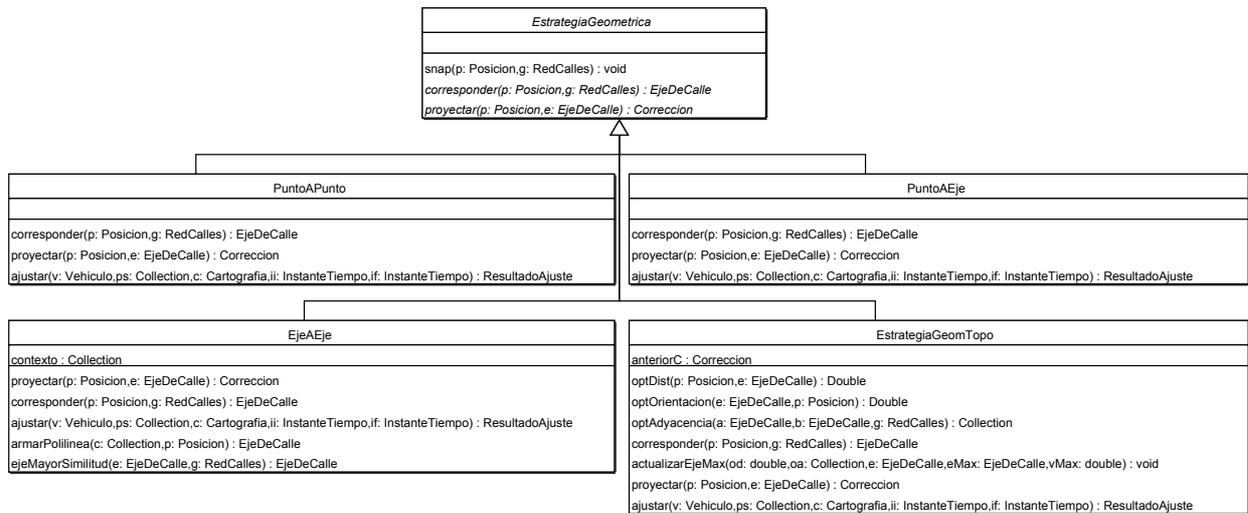


Figura 6.13: Estrategias Geométricas

```

corresponder(p:Posicion, g:RedCalles){
    e0 = anteriorC.obtenerEje();
    eMax = new EjeDeCalle();
    vMax = -1;
    foreach eje in g{
        od = optDist(p,eje);
        oo = optOrientacion(eje,p);
        oa = optAdyacencia(e0, eje, g);
        actualizarEjeMax(od, oo, oa, eje, vMax, eMax);
    }
    ~eMax;
}

```

Este método respeta la definición descrita en la Sección 5.4.4. Los métodos `optDist()`, `optOrientacion()` y `optAdyacencia()` se corresponden con las funciones de optimización mencionadas en dicha sección. Estos métodos, además del método `actualizarEjeMax()` han sido definidos en la clase *EstrategiaGeomTopo*. Por otro lado, este método requiere que la última posición corregida haya sido cargada en la variable de instancia `anteriorC` de esta clase.

Por otro lado, la clase *EjeAEje* define el método `corresponder()` de modo que contemple un contexto de la posición estimada p_k , de acuerdo con lo descrito en la Sección 5.4.3. Para esto se requiere que previamente haya sido cargada la variable de instancia `contexto` perteneciente a la clase *EjeAEje* con una colección de objetos de la clase *Posicion* que representa un conjunto de posiciones estimadas anteriores a la posición estimada p_k . Dicho conjunto se construye para cada posición estimada a ajustar, antes de invocar al méto-

6. ALMA

do `snap()`. A continuación se presenta una solución en pseudocódigo para el método `corresponder()` de la clase *EjeAEje*.

```

corresponder(p:Posicion, g:RedCalles){
    polilinea = armarPolilinea(contexto,p);
    ejeMax = ejeMayorSimilitud(polilinea,g);
    ^ejeMax;
}

```

Los métodos `armarPolilinea()` y `ejeMayorSimilitud()` son métodos privados de la clase.

Estrategias Probabilísticas

Como se mencionó en la Sección 5.5, las estrategias probabilísticas, a diferencia de las estrategias geométricas, utilizan las características del error inherente a la estimación de posiciones para mejorar el proceso de *Map Matching*. Esta información está representada en las clases *TecnicaPosicionamiento* y *DispositivoPosicionamiento*. Este tipo de estrategias contempla además, un conjunto reducido de ejes de calle para el ajuste, lo que se refleja en el método `areaConfianza()` de la clase *EstrategiaProbabilistica*. Este método y la jerarquía de estrategias probabilísticas propuesta se visualizan en la Figura 6.14.

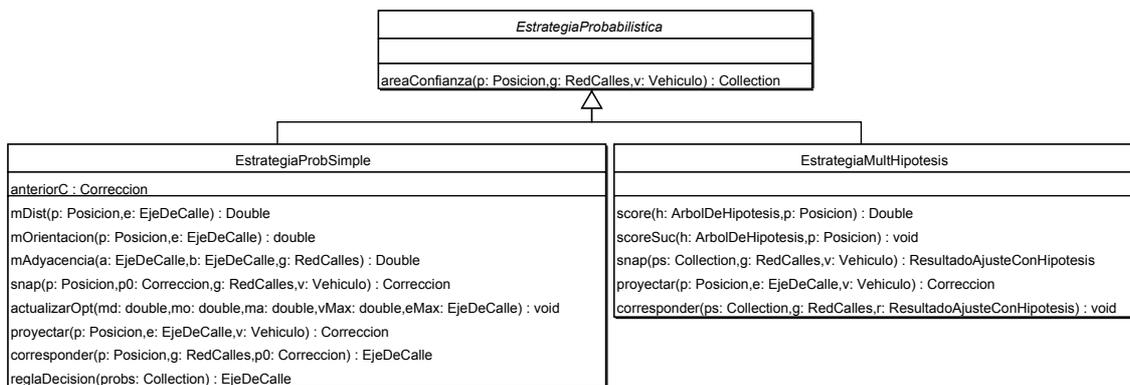


Figura 6.14: Estrategias Probabilísticas

Se define en pseudocódigo el método `corresponder()` para la clase *EstrategiaProbSimple*, el cual se basa en lo definido en la Sección 5.5.1:

```

corresponder(p:Posicion,g:RedCalles, v:Vehiculo){
    e0 = anteriorC.obtenerEje();
    ejes = areaConfianza(p,g,v);
    foreach eje in ejes{
        md = mDist(p,eje);
        mo = mOrientacion(eje,p);
        ma = mAdyacencia(e0, eje, g);
        actualizarOpt(md,mo,ma, eje, probabilidades);
    }
    eMax = reglaDecision(probabilidades);
    ~ eMax;
}

```

El método `areaConfianza()` empleado en el método `corresponder()` antes descrito, calcula el área de confianza entorno a la posición estimada p . Las funciones `mDist()`, `mOrientacion()` y `mAdyacencia()` corresponden a las funciones de masa de los criterios considerados para la estrategia. El método `actualizarOpt()` calcula los valores de admisibilidad y credibilidad (ver Sección 5.5.1) a partir de los valores de masa obtenidos para cada eje de calle. Dichos valores son mantenidos en una estructura auxiliar denominada `probabilidades`. Sobre dicha estructura se aplica una regla de decisión representada en el método `reglaDecision()` que determina el eje sobre el cual se realizará posteriormente el proceso de proyección.

A diferencia de los métodos `snap()` de las estrategias descritas hasta el momento en la sección 6.2.3, el método `snap()` correspondiente a la clase *EstrategiaMultHipotesis* realiza el ajuste teniendo en cuenta una secuencia de posiciones estimadas. Durante este proceso construye y mantiene un árbol de hipótesis aplicando las tres fases definidas en la Sección 5.5.2.

El árbol de hipótesis ha sido modelado mediante la clase *ArbolDeHipotesis*, subclasificada mediante las clases *HipotesisHoja* e *HipotesisNodo*. Esta jerarquía respeta el patrón de diseño *Composite* [Gamma 1994] y se visualiza en la Figura 6.15. Cada elemento del árbol de hipótesis mantiene una corrección y el valor de *score* desde la raíz hasta ese nodo, si alguna vez fue calculado (de acuerdo a la fase de mantenimiento descrita en la Sección 5.5.2). La estrategia de Múltiples Hipótesis mantiene un árbol de hipótesis con posibles trayectorias hasta determinar el conjunto de posiciones corregidas mediante el método `finalizarResultado()`. Cada posible trayectoria está representada por una rama del árbol desde la raíz hasta una hoja.

Se decidió en el presente trabajo, mantener el tratamiento de la incertidumbre como parte del resultado del ajuste. Esta información puede ser utilizada para mejorar la estrategia en sí misma. Esta decisión lleva a la necesidad de jerarquizar la clase *ResultadoAjuste*, tal como se propone en la Figura 6.16.

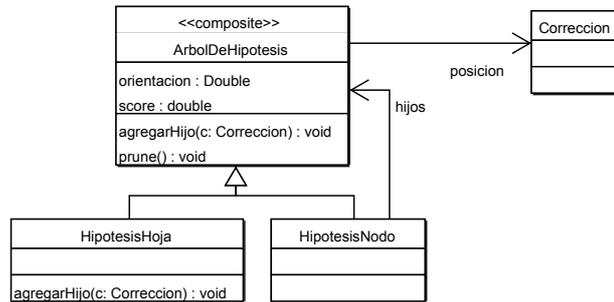


Figura 6.15: Árbol de hipótesis

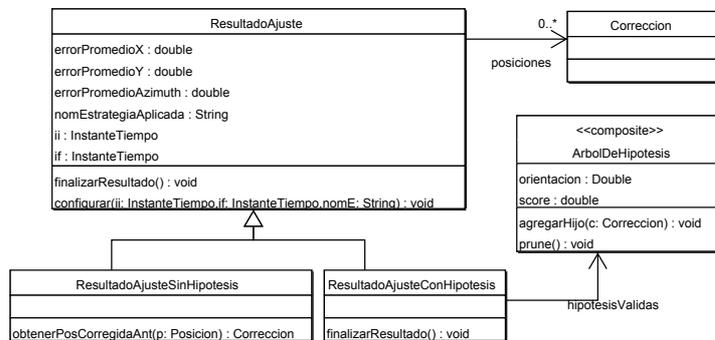


Figura 6.16: Jerarquía de resultados

Por simplicidad y legibilidad se muestra el funcionamiento de la estrategia de Múltiples Hipótesis mediante el diagrama de interacción visualizado en la Figura 6.17.

En el método `snap()` visualizado en la Figura 6.17 se crea una instancia de la clase `ArbolDeHipotesis`, el método `armarBaseArbol()` inicializa el árbol de hipótesis con los ejes de calle candidatos para la primera posición estimada del conjunto de posiciones estimadas llamado *ps*. Luego de este paso, se realizan las etapas constructiva y de mantenimiento descritas en la Sección 5.5.2, mediante los métodos `faseConstructiva()` y `faseMantenimiento()` respectivamente.

En la *Fase Constructiva*, se calcula el área de confianza (*ac*) para la posición estimada p_i y se la proyecta a cada eje de calle candidato perteneciente a *ac*. Cada eje de calle perteneciente a *ac* se corresponde con una hipótesis válida si existe conexión entre ella y alguna hoja del árbol de hipótesis. Para ello se debe analizar conectividad entre ejes de calle. Cada hipótesis válida, se agrega al árbol de hipótesis como continuación de la hoja con la que se conecta.

En la *Fase de Mantenimiento*, el árbol es sujeto a un proceso de po-

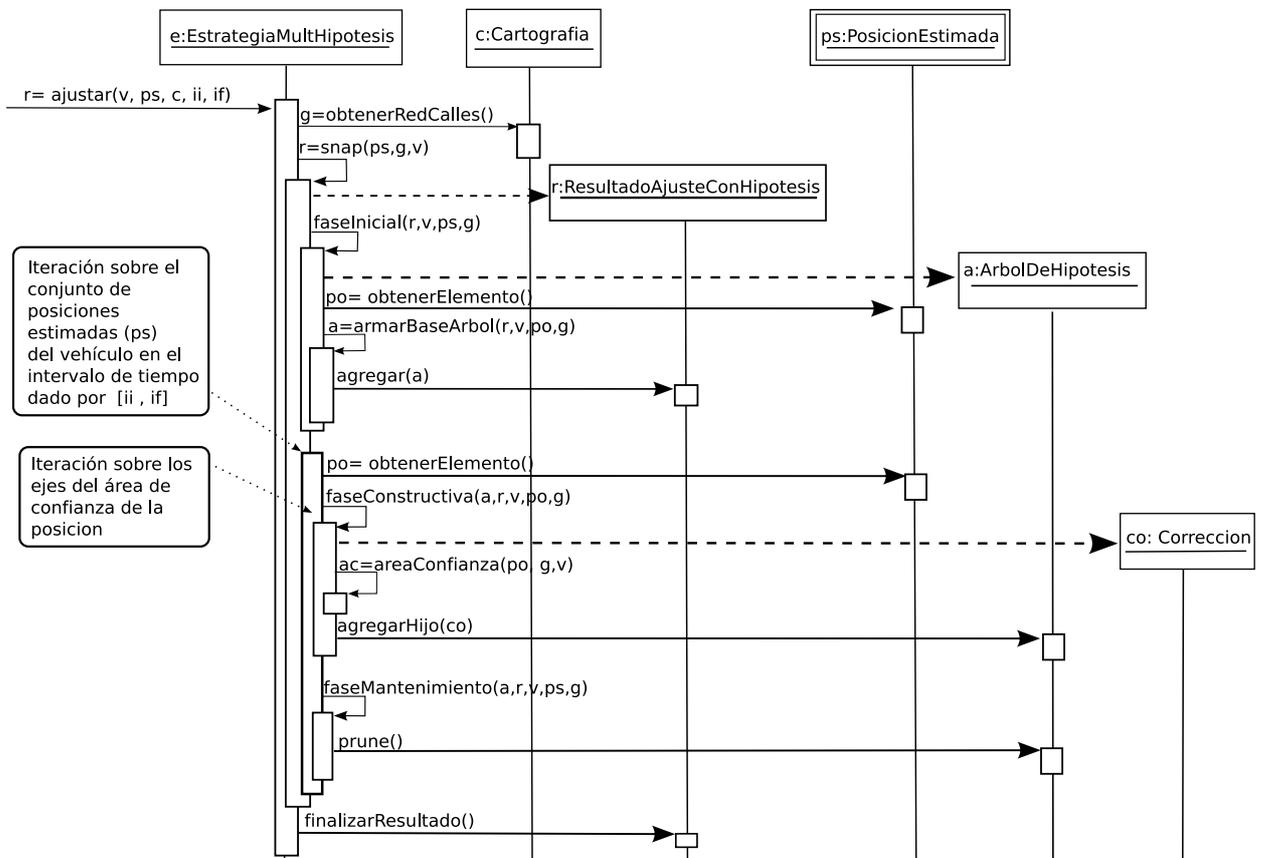


Figura 6.17: Ajuste de posiciones empleando EstrategiaMulHipotesis

da (método `prune()` de la clase *ArbolDeHipotesis*) empleando para ello los métodos `score()` y `scoreSuc()`. En este proceso, se aplican las reglas de descarte de hipótesis descritas en la Sección 5.5.2. Una vez finalizado el proceso de ajuste propiamente dicho, se procede a la invocación del método `finalizarResultado()` de la clase *ResultadoAjusteConHipotesis*. Mediante esta acción se calculan los errores promedio y se extrae del árbol de hipótesis el conjunto de posiciones corregidas que conforman la trayectoria óptima de acuerdo a algún criterio (por ejemplo, la rama de mayor valor de `score`).

Asociación de estrategias con técnicas de posicionamiento

Como se describe en la Sección 6.2.1, la técnica de posicionamiento determina la información disponible en las posiciones estimadas. El conjunto de estrategias de ajuste aplicables a las posiciones estimadas de un vehículo, esta limitado por la información contenida en dichas posiciones. Por este

6. ALMA

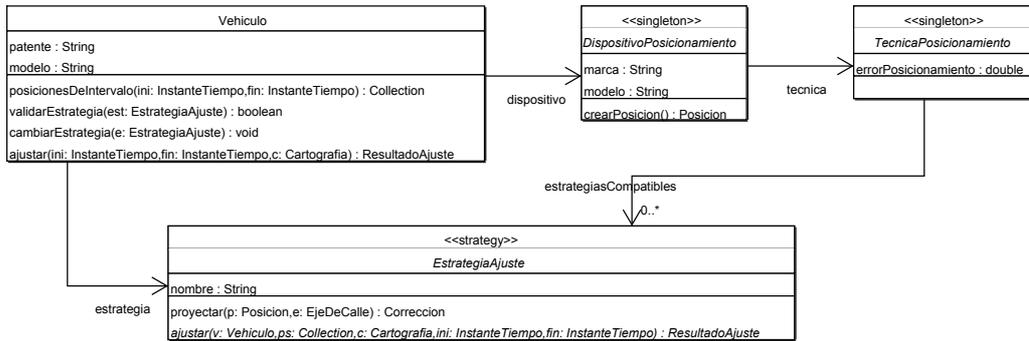


Figura 6.18: Asociación de estrategias con técnicas de posicionamiento

motivo se ha decidido modelar una relación de conocimiento entre la clase *TecnicaPosicionamiento* y la clase *EstrategiaAjuste*. Si bien cada técnica de posicionamiento puede conocer a más de una estrategia compatible, el proceso de ajuste se realiza empleando una estrategia en particular. Por esto, se ha decidido que la clase *Vehiculo* posea una relación de conocimiento con la clase *EstrategiaAjuste* que puede cambiar dinámicamente mediante el método *cambiarEstrategia()* perteneciente a la clase *Vehiculo*. Esta relación está directamente ligada con el concepto del patrón de diseño Strategy respetado por la jerarquía de Estrategias.

6.2.4. Administración

Con el objetivo de relacionar los módulos de la arquitectura propuesta en la Sección 6.1, los cuales fueron abarcados por las secciones 6.2.1, 6.2.2 y 6.2.3, se decidió incorporar al modelo una clase *Administrador*. La responsabilidad de esta clase consiste básicamente en la atención de pedidos de ajuste, configuración de elementos y análisis de resultados de ajuste. La Figura 6.19 muestra la incorporación de este concepto.

La atención de pedidos de ajuste se lleva a cabo mediante el método *ajustarPosiciones(v:Vehiculo, instanteI:Instante, instanteF:Instante)* de la clase *Administrador*. La Figura 6.20 muestra el diagrama de secuencia correspondiente a la invocación del método *ajustar()* de la clase *Administrador*.

En el diagrama de secuencia visualizado en la Figura 6.20, el administrador es el encargado de suministrar al vehículo la cartografía sobre la cual se realizará el proceso de ajuste.

El método *ajustar()* del vehículo delega la responsabilidad del ajuste a la estrategia concreta que posee configurada (como se indicó en la sección

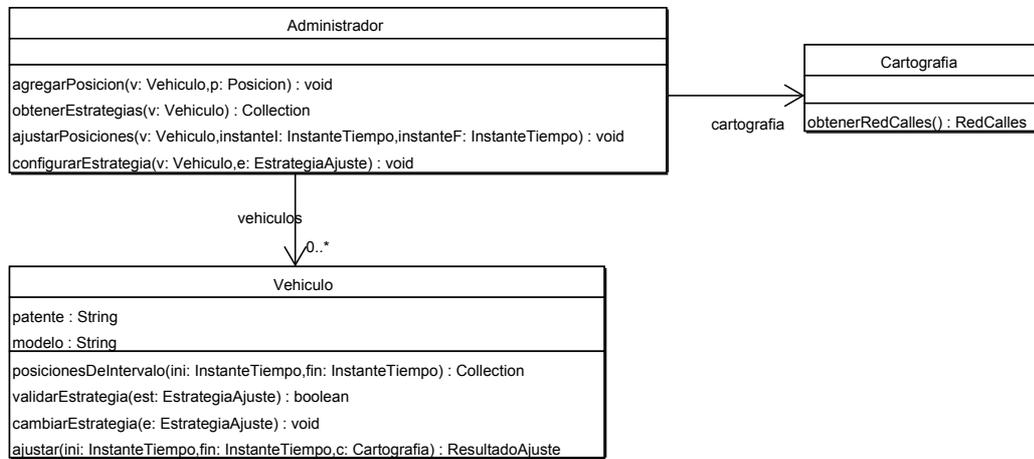


Figura 6.19: Administrador

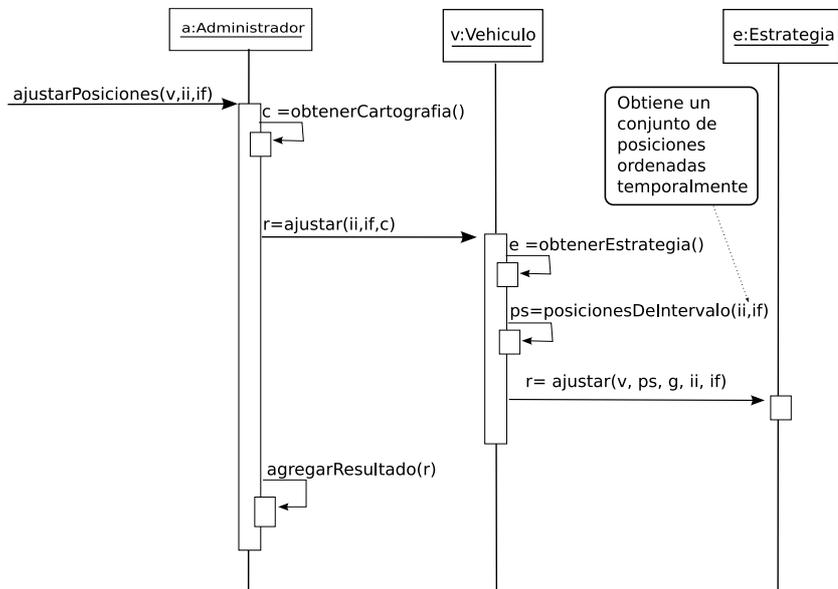


Figura 6.20: Invocación del método de ajuste

6. ALMA

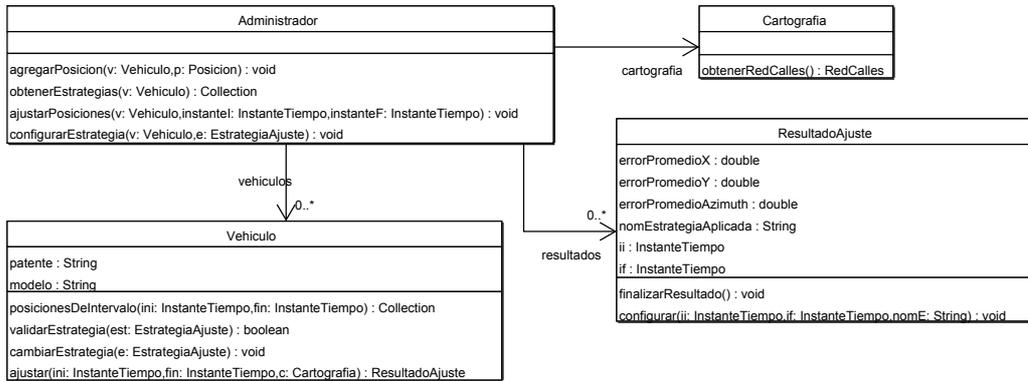


Figura 6.21: Administrador con Resultados

anterior), luego de obtener el conjunto de posiciones estimadas pertenecientes al intervalo de tiempo solicitado. La clase *Administrador* conoce además un conjunto de resultados de ajuste con el fin de mantener resultados históricos. Esta información puede ser usada, entre otras cosas, para el análisis de performance de las estrategias de ajuste y eventualmente para la calibración de los parámetros mencionados en la Sección 6.1 (ver Figura 6.21).

El modelo orientado a objetos resultante de la integración de los conceptos definidos en las secciones anteriores se visualizan en la Figura 6.22. Por legibilidad del modelo OO, se ha omitido el comportamiento de las clases.

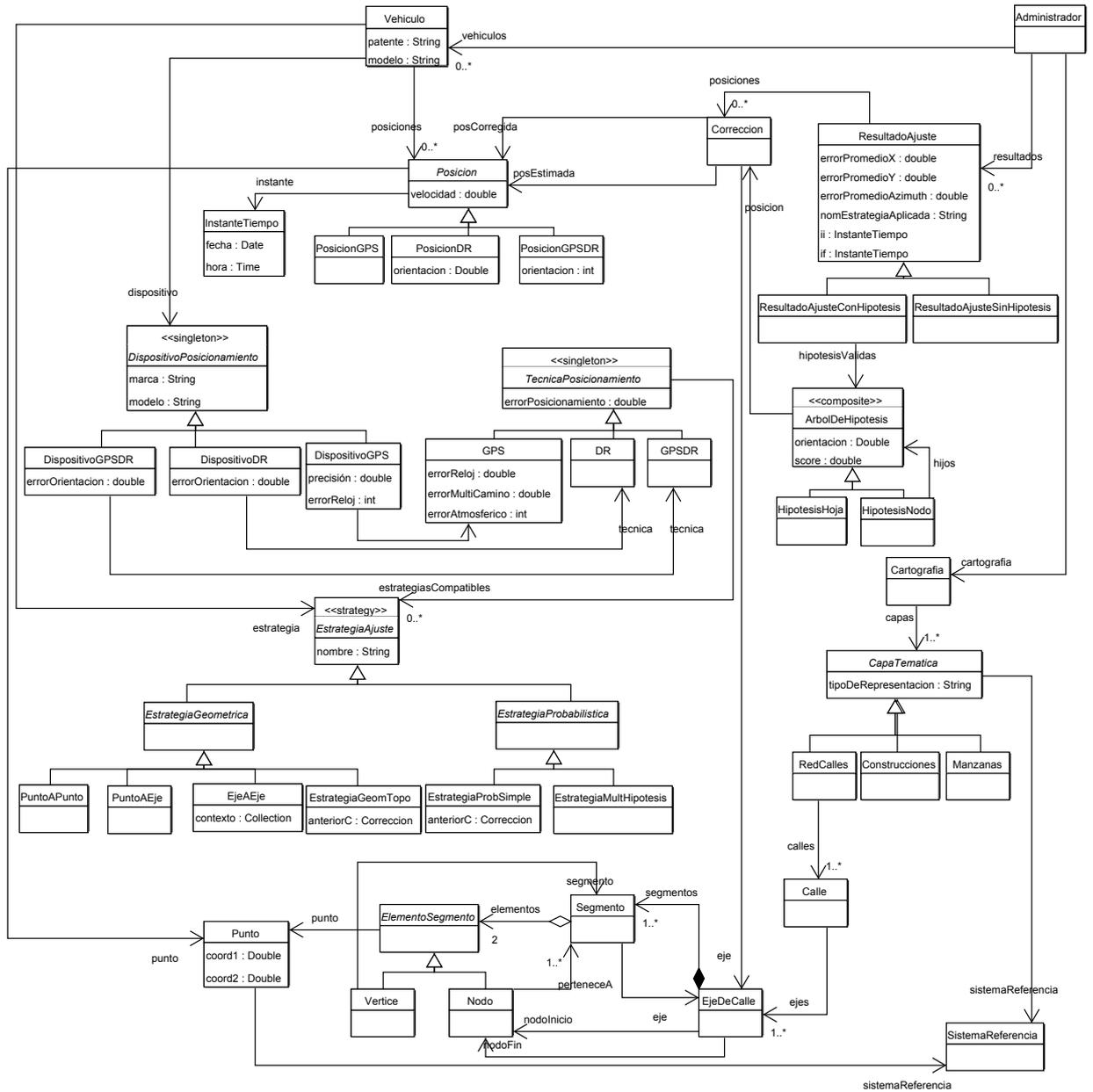


Figura 6.22: Modelo OO resultante

Capítulo 7

Conclusiones

En este capítulo se presentan conclusiones acerca de las estrategias de ajuste de posiciones y el modelo orientado a objetos propuesto. Se presentan además trabajos futuros.

7.1. Conclusiones

Como se mencionó en la Sección 1.3, las posiciones estimadas por un sistema de posicionamiento (descrito en el Capítulo 4), están sometidas a un cierto error de precisión introducido por la técnica de posicionamiento. Debido a este error, las posiciones estimadas correspondientes a un vehículo pueden estar desplazadas respecto de los ejes pertenecientes a una red de calles. Esto conduce a la necesidad de corresponder cada posición estimada con un eje de calle y posteriormente, asociarla con una posición sobre dicho eje, lo que se conoce como proceso de *Map Matching* (descrito en el Capítulo 5).

Se definió una arquitectura modular para implementar un sistema de ajuste de posiciones, aplicable a la solución de problemas en varias áreas, algunas de las cuales se han mencionado en el desarrollo del presente trabajo.

El modelo OO que se presenta en este trabajo abstrae la definición del módulo de *Procesamiento de Posiciones* de la arquitectura propuesta.

Se pueden numerar las siguientes ventajas sobre la solución propuesta:

- La jerarquía de estrategia de ajuste es escalable y define una familia de algoritmos los cuales pueden ser intercambiables entre si y utilizados de manera independiente de acuerdo a las características del dominio.
- Nuevas estrategias pueden ser incorporadas al modelo OO propuesto ampliando la jerarquía de estrategias. Además, la implementación del

método `ajustar()` permite que las diferentes estrategias concretas consideren, eventualmente, diferentes combinaciones de capas temáticas para realizar el proceso de ajuste. Esto se logra mediante la colaboración con una instancia de la clase *Cartografia*.

- Se permite configurar dinámicamente estrategias de ajuste a fin de realizar diferentes pruebas, analizar resultados y determinar la estrategia mas apropiada para una dominio dado.
- La jeraquía de la clase *ResultadoAjuste* propuesta permite representar nuevos resultados en caso de que nuevas estregias conserven información adicional para su posterior análisis. Como política de medición de errores del proceso de ajuste en esta clase se consideró el cálculo del promedio de los errores respecto al eje X, al eje Y, y la orientación. El promedio de los errores se considera un estimador aceptable para los errores de posicionamiento, sin embargo, otros estimadores podrían ser considerados.
- Se podrían incorporar al modelo nuevas técnicas de posicionamiento, ya que este concepto se ha desacoplado en la clase *TecnicaPosicionamiento*
- Nuevos dispositivos pueden ser considerados para la estimación de posiciones ya se este concepto ha sido desacoplado mediante la clase *DispositivoPosicionamiento*
- Las estrategias propuestas utilizan para el ajuste la capa *RedDeCalles*, sin embargo, nuevas estrategias podrían utilizar otras capas, ya que al método de ajuste, llega una instancia de la clase *Cartografia*, desde la cual se puede acceder a sus capas temáticas.
- La arquitectura resulta extensible y permite plantear consideraciones futuras que se agreguen modularmente a ella.

En esta versión del modelo se ha omitido la implementación de la funcionalidad del módulo de *Generación de Resultados*, sin embargo se presenta un mecanismo de conexión con una posible implementación de este módulo. El mantenimiento de resultados históricos por parte de la clase *Administrador* y la descripción de los errores considerados en el proceso de ajuste mediante la clase *ResultadoAjuste* constituyen este mecanismo de conexión.

En cuanto a la utilización del modelo propuesto, se requiere que antes de llevar a cabo el proceso de ajuste, se realice la vinculación entre las técnicas de posicionamiento y las estrategias de ajuste compatibles de acuerdo a lo

descrito en la Sección 6.2.3.

7.2. Trabajos futuros

Las estrategias aquí propuestas emplean solamente información topológica de la capa temática *RedCalles* para la corrección de posiciones. Otras estrategias podrían emplear además información del sentido de circulación de las calles al momento de seleccionar ejes candidatos para el proceso de ajuste. Además podrían utilizar otras capas temáticas para dicho proceso. Por ejemplo, considerar la capa temática de *Edificaciones* permitiría determinar, entre otras cosas, cuando un vehículo circula dentro de un estacionamiento. Esta nueva capa y otras mas, serán analizadas para la incorporación al trabajo.

La representación propuesta para la red de calles no contempla la superposición de calles, es decir, calles que vistas en un plano se intersectan en al menos un punto, pero en el espacio tridimensional, ésto no sucede. Por ejemplo, una calle que atraviesa un túnel por dentro y otra calle que lo atraviesa por encima. Estas calles se superponen en el espacio pero no existe conexión entre ellas. Esto constituye un punto a analizar e incorporar en la representación de la capa temática red de calles, para lo cual se deberán contemplar operaciones espaciales.

Por otro lado, el proceso de ajuste ha sido presentado mediante la invocación explícita del método `ajustar()`. Una posible ampliación podría contemplar el desarrollo de una capa de aplicación que invoque a intervalos periódicos de tiempo dicho método de modo de automatizar el proceso de ajuste.

Es posible incorporar a la arquitectura propuesta, un *módulo de evaluación de estrategias de ajuste* para analizar la performance de estrategias en cuanto a tiempo de respuesta y precisión obtenida. En particular, este módulo podría ser aplicado sobre la implementación de las estrategias de ajuste presentadas en [Dalponte 2005]. Un posible mecanismo de evaluación podría consistir de las siguientes etapas:

- definir un conjunto de posiciones correctas (*pc*), es decir, posiciones coincidentes con algún eje de calle perteneciente a la red,

- aplicarles a cada posición perteneciente al conjunto pc un desplazamiento aleatorio,
- ajustar el conjunto pc con una estrategia determinada,
- calcular la tasa de error determinado por el ajuste.

Finalmente, la evaluación de la estrategia de ajuste consiste del análisis de las tasas de error obtenidas en la última etapa del mecanismo anterior.

La manera en la que se define el conjunto de posiciones correctas y el mecanismo de desplazamiento que se aplica, determinan una política de evaluación particular.

Bibliografía

- [Abascal 2001] La Interacción persona-ordenador, Dispositivos. J. Abascal, N. Garay. Universidad del País Vasco. 2001.
- [Andersson2004] Vehicle Positioning with Map Matching Using Integration of a Dead Reckoning System and GPS. Andersson David, Fjellström Johan. 2004.
- [Alexandroff 1961] Elementary concepts of topology. Dover, New York. 1961.
- [Aranda 2003] Un sistema de medida para ensayos en entornos abiertos con modelos a escala de buques de alta velocidad. J. Aranda Almansa, J. M. Díaz Martínez, R. Muñoz Mansilla. 2003.
- [Aronoff 1995] Geographic Information Systems: A Management Perspective. Stan Aronoff. 1995
- [Bernstein 1996] An introduction to Map Matching for Personal Navigation Assistants. David Bernstein y Alain Kornhauser.
- [Dalponte 2005] Estrategias de ajuste de posiciones a mapas digitales. M. Dalponte, A. Literas. 2005.
- [Dana 1999] Coordinate Systems Overview. Peter H. Dana. 1999.
- [Dana 2003] Geodetic Datum Overview. Peter H. Dana. 2003.
- [Del Cogliano 2001] Geodesia y GPS. Curso de Actualización. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas. UNLP. D. Del Cogliano y R. Perdonó

-
- [Dey 2000] Providing Architectural Support for Building Context-Aware Applications. Georgia Institute of Technology. Phd. Thesis. November 2000.
- [Fontaine 2004] Improving the effectiveness of traffic monitoring based on Wireless Location Technology. Fontaine, Michael D, Smith Brian L. 2004.
- [Fowler1997] UML gota a gota. M. Fowler, K. Scott. 1997.
- [Frank] Language issues for GIS. A. U. Frank, D. M. Mark.
- [Gamma 1994] Design Patterns. Elements of reusable object-oriented software. E. Gamma, R. Helm, R. Johnson, J. Vlissides. 1994
- [Gonzalez 1996] Estimación de la Posición de un Robot Móvil. J. González Jiménez, A. Ollero Baturone. Universidad de Málaga. 1996.
- [King 1998] Inertial Navigation - Forty Years of Evolution. A. D. King. 1998.
- [Lewis 2005] Building a Multinational Global Navigation Satellite System. An Initial Look. R. Lewis, M. Kennedy, E. Ghashghai, G. Bitko. 2005.
- [Llitas 2000] Sistemas de referencias para aplicaciones SIG's. A. Llitas, S. Gordillo. 2000.
- [Longley 1991] Geographic Information Systems. Longley Paul, Goodchild Michel, Maguire David y Rhind David. 1991
- [Longley 2000] Geographic Information Systems and Science. Longley Paul, Goodchild Michel, Maguire David y Rhind David. 2000.
- [Marchal 2004] Efficient map-matching of large GPS datasets - Test on a speed monitoring experiment in Zürich. F. Marchal, J. Hackney y K.W. Axhausen. 2004.
- [McHarg 1969] Design with Nature. Ian McHarg, 1969.

Bibliografía

- [Najjar 2002] A Road Reduction Method using Multi-Criteria Fusion. M. E. El Najjar y Ph. Bonnifait. 2002.
- [Najjar 2003] A Roadmap Matching Method for precise Vehicle Localization using Belief Theory and Kalman Filtering. M. E. El Najjar y Ph. Bonnifait. 2003.
- [NCDOT 2001] Public Transportation Division, State of North Carolina Department of Transportation. <http://www.ncdot.org/transit/transitnet/>. Copyright 2001.
- [Ochieng 2003] Map-Matching in Complex Urban Road Networks. W.Y Ochieng, M. Quddus, R.B. Noland. Center for Transportation Studies, Imperial College, London. 2003.
- [Open Gis Consortium] The OpenGis Specification Model. Topic 2: Spatial Reference Systems. Revision 3
- [Peng 2003] Internet GIS Distributed Geographic Information Services for the Internet and Wireless Networks. Zhong-Ren Peng y Ming-Hsiang Tsou. 2003.
- [PSAS] Portland State Aerospace Society (PSAS)
- [Pozo-Ruz 2000] Localización de vehículos: Fusión de medidas GPS y odometría. A. Pozo-Ruz, M. C. García Alegre, A. Ribeiro, L. García, D. Guinea, F. Sandoval. 2000.
- [Ramirez-Fernandez] Integración GPS/INS: Conceptos y Experimentos. A. Ramírez González, J. Fernández Rubio. Universidad Politécnica de Cataluña.
- [Roumeliotis 1997] An Extended Kalman Filter for frequent local and infrequent global sensor data fusion. S.I Roumeliotis, A. Bekey. University of Southern California. 1997.
- [Rupnik 2004] Mobile Applications Strategic Planning. Rok Rupnik, Marjan Krisper. 2004.
- [Sanchez 2005] Control de vehículos espaciales. R. Sánchez Peña, R. J. Alonso. Universidad Politécnica de Catalunya, España - CONAE, Argentina. 2005.

-
- [Schiller 2004] Location-Based Services. Jochen Schiller, Agn s Voisard. 2004
- [Smith 1987] Requirements and principles for the implementation and construction of large scale geographic information systems. Smith T. R, Menon S., Staer J. L., Estes J. E.
- [Taylor 1999] Virtual Differential GPS & Road Reduction Filtering by Map Matching. G. Taylor, G. Blewitt. 1999.
- [Thompson 2003] Integrating PDA, GPS and GIS technologies for Mobile Traffic Data Acquisition and Traffic Data Analysis. Thompson Elisabet. 2003
- [Tomlin 1983] Digital cartographic modeling techniques in Environmental Planning. Tomlin C. D. Universidad de Yale. 1983
- [Tsunami 2004] 2004 Indian Ocean Earthquake. http://en.wikipedia.org/wiki/2004_Indian_Ocean_earthquake
- [Voser] Coordinate Reference System Management within GIS. A Perspective. Stefan A. Voser.
- [Voser-MapRef] MapRef. An Introduction to Coordinate Reference Systems. Stefan A. Voser
- [Zhang 2003] The relationship among Vehicle Positioning Performance, Map Quality, And Sensitivities And Feasibilities Of Map-Matching Algorithms. X. Zhang, Q. Wang, D. Wan. 2003.
- [Zhou 2005] A three-step General Map Matching Method in the GIS ENvironment: Travel/Transportation Study Perspective.2005.

Apéndice A

Cálculos de geometría

Definición A.1 (Proyección perpendicular):

La proyección perpendicular (o proyección **punto a segmento**) de un punto $p_0 = (x_0, y_0)$ a un segmento \overline{AB} , denotada $proy(p_0, \overline{AB})$, se define como el punto $p' = (x', y')$ sobre el segmento que tiene la menor distancia al punto p . Es decir, el punto $p' = (x', y')$ es el punto donde se intersecta \overline{AB} y la recta que sale de p_0 formando un ángulo recto con \overline{AB} , denotada $\overline{p_0p'}$

Sea $A = (x_A, y_A)$ y $B = (x_B, y_B)$ entonces la ecuación de \overline{AB} es:

$$y - y_A = m(x - x_A), \text{ donde } m = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \quad (\text{A.1})$$

Sabiendo que, si dos rectas que son ortogonales, sus pendientes son opuestas, entonces la pendiente de la recta $\overline{p_0p'}$, denotada m' es:

$$m' = (-1)m \quad (\text{A.2})$$

Entonces, la ecuación de la recta $\overline{p_0p'}$ queda determinada por:

$$y' - y = m'(x' - x) \quad (\text{A.3})$$

El punto $p' = (x', y')$ es aquel que satisface al mismo tiempo las ecuaciones A.1 y A.3.

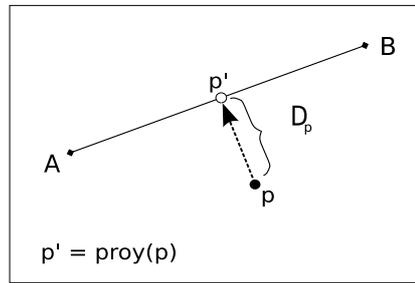


Figura A.1: Distancia perpendicular

Definición A.2 (Distancia perpendicular):

La función D_p calcula la distancia perpendicular entre un punto $r = (x, y)$ y un segmento \overline{AB} , y se define:

$$D_p(r, \overline{AB}) = \sqrt{\frac{[(y_A - y_B)x + (x_B - x_A)y + (x_A y_B - x_B y_A)]^2}{(y_A - y_B)^2 + (x_B - x_A)^2}} \quad (\text{A.4})$$

donde $A = (x_A, y_A)$ y $B = (x_B, y_B)$.

La figura A.1 ilustra el cálculo de la distancia perpendicular y el la proyección perpendicular.

Apéndice B

Vocabulario

Arquitectura Cliente-Servidor: Sistema distribuido entre múltiples procesadores donde hay clientes que solicitan servicios y servidores que los proporcionan.

Azimuth: Desplazamiento angular de una alineación con respecto al norte, generalmente en el sentido de las agujas del reloj.

Beacon: Radio-transmisor que emite una señal.

Cardán: Mecanismo de suspensión, consistente en dos círculos concéntricos cuyos ejes forman ángulo recto, que permite mantener la orientación de un eje de rotación en el espacio aunque su soporte se mueva.

Coordenada: Componente de una tupla de números escalares que se utilizan para representar la posición de un punto en el plano o en el espacio.

Eje Vial: Dícese de cada una de las porciones en las que se divide una calle.

Escala: Es la relación correspondiente entre una distancia en el mapa y la distancia correspondiente sobre la Tierra. Es la relación numérica de semejanza que hay entre una distancia horizontal en el plano y la distancia correspondiente sobre el terreno.

GPS:(Global Positioning System) (Sistema de Posicionamiento Global) Sistema que provee posiciones basadas en datos transmitidos desde una constelación de 24 satélites.

LAN:(Local Area Network) (Redes de Área Local) Es un sistema de comunicación entre computadoras que permite compartir información,

con la característica de que la distancia entre las computadoras debe ser pequeña. Estas redes son usadas para la interconexión de computadores personales y estaciones de trabajo. Se caracterizan por: tamaño restringido, tecnología de transmisión (por lo general broadcast), alta velocidad y topología. Un típico ejemplo de este tipo de redes es la Intranet.

Marco de Referencia: Contexto con respecto al cual se realiza una medición.

Modelo Raster: Consiste de una aproximación para representar información geográfica. En este modelo los objetos del mundo real son representados empleando puntos, líneas o polígonos. La posición de cada objeto se define mediante un sistema de referencia.

Modelo Vector: Consiste de una aproximación para representar información geográfica. En este modelo el espacio se divide en celdas regulares (generalmente en cuadrados). La posición de un objeto en este modelo se define por la fila, columna de la celda que lo contiene.

Poliedro: Cuerpo limitado por polígonos planos.

Red Wireless: Referido a comunicaciones inalámbricas, en las que no se utiliza un medio de propagación físico, sino la modulación de ondas electromagnéticas, radiaciones o medios ópticos. Estas se propagan por el espacio vacío sin medio físico que comunique cada uno de los extremos de la transmisión.

Siniestro: En el contrato de seguro, concreción del riesgo cubierto en dicho contrato y que determina el nacimiento de la prestación del asegurador.

Apéndice C

Notación usada en el trabajo

A continuación se explican las convenciones de notación utilizadas en este trabajo:

- []: Referencia bibliográfica detallada en el apartado denominado 'Bibliografía'
- \diamond : Palabra cuyo significado es ampliado en el Apéndice B