

# Modelado de Carreteras para la Simulación de Conducción

Salvador Bayarri, Ignacio Pareja, Inmaculada Coma y Marcos Fernández  
Departamento de Informática y Electrónica. Universidad de Valencia. España.  
Salvador.Bayarri@uv.es

## Resumen

Los autores presentan una extensión de anteriores herramientas de modelado de bases de datos para simulación de conducción, incluyendo las especificaciones del trazado real de carreteras basadas en información independiente para la planta, el alzado y el perfil. Se explica la representación de esta información en una estructura de datos adecuada, la generación de tiras poligonales y la organización de esta información en una estructura jerárquica compatible con la visualización en tiempo real. Se discute igualmente, cuál puede ser el interfaz de edición adecuado para manipular interactivamente estos diseños por medio de puntos de control. El sistema de generación de estructuras visuales ha sido utilizado para crear los escenarios tridimensionales de varias aplicaciones de simulación de conducción.

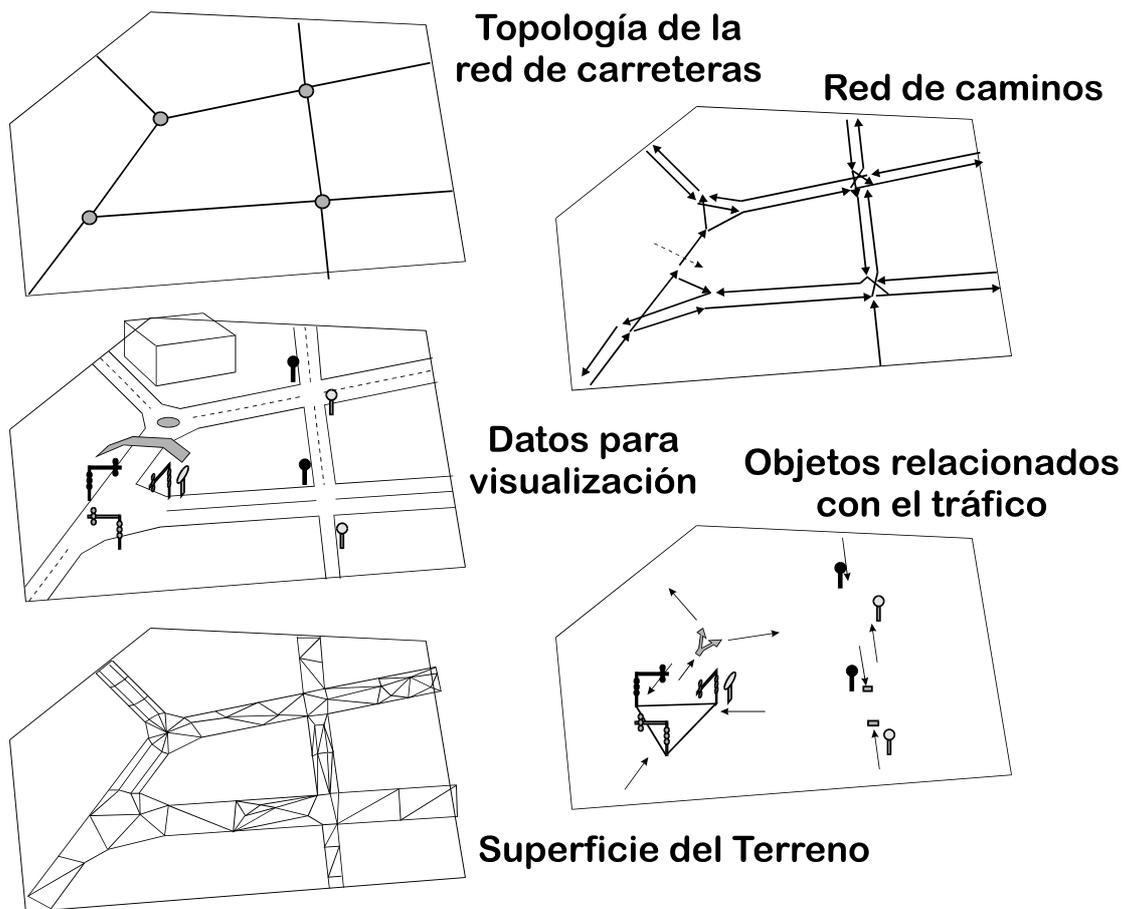
## Introducción

Las aplicaciones de la simulación de conducción están recibiendo cada vez más atención desde los puntos de vista de la investigación de su aplicación. Buena prueba de ello es la aparición en los últimos años de secciones especializadas dentro de los congresos tradicionales sobre simulación (ITEC -*International Training Equipment Conference*-, RTS -*Real Time Systems*-) y de seminarios y congresos propios como el DSC (*Driving Simulation Conference*). A este desarrollo ha contribuido la disminución de los costes de los equipos gráficos, plataformas móviles y otros componentes, pero también el avance en las técnicas de representación de los escenarios y el cálculo dinámico de movimientos y del tráfico, aspectos que hacen a la simulación de conducción más compleja que otros tipos de simulación, como la de vuelo [1].

Uno de los aspectos donde se ha avanzado grandemente, pero que todavía plantea desafíos importantes, es el de la generación de los datos referentes al escenario donde se va a desarrollar la simulación, incluyendo las carreteras, los elementos directamente relacionados con ellas (semáforos, señales de tráfico) y otros simplemente decorativos (edificios, terreno circundante). La generación de todos los datos necesarios es una tarea compleja, puesto que se trata de componentes heterogéneos que, sin embargo, deben compartir una estructura básica común y están ligados por multitud de relaciones. Por esta razón se llamó a este tipo de estructura *base de datos correlacionada* [2]. Como puede verse en la figura 1, sobre un esqueleto lógico basado en las relaciones topológicas debemos añadir datos para la visualización del escenario (basados en descripciones poligonales de los objetos), una descripción detallada de las superficies por las que se vayan a mover los vehículos, los caminos que pueden servir de referencia

para la simulación del tráfico, y además cómo se relaciona la red de carreteras con otros objetos que influyen en la conducta del tráfico.

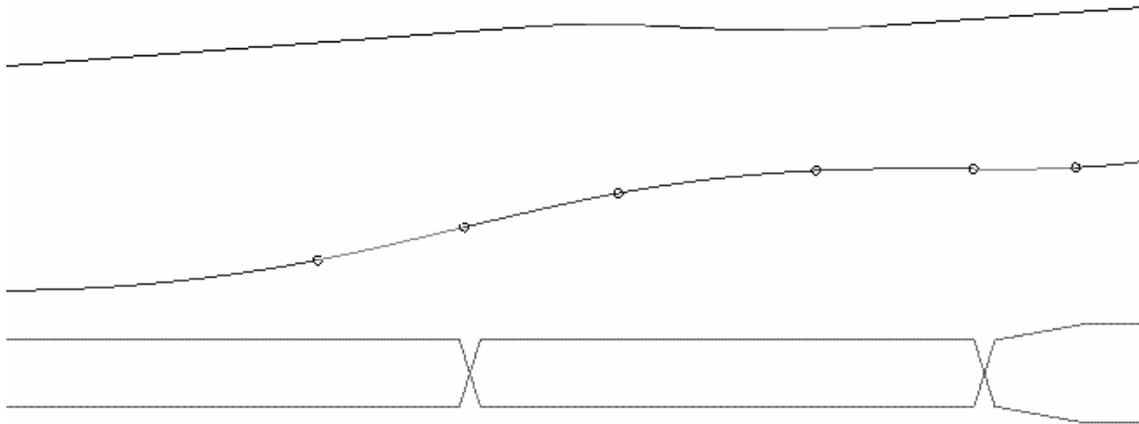
No existe actualmente ningún programa de modelado comercial que permita crear satisfactoriamente todos los componentes de esta estructura de datos. Los autores han desarrollado en anteriores trabajos aportaciones a la representación del entorno urbano [3] y al modelado de redes de carreteras para generar automáticamente bases de datos correlacionadas incluyendo características como la segmentación o paginación automática del fichero de datos [4]. Sin embargo en estos trabajos previos las carreteras se modelaban utilizando curvas de uso común en gráficos (Splines, NURBS), pero que no respondían a las especificaciones reales de los ingenieros de caminos. Más recientemente, se planteó con la empresa AUMAR (Autopistas del Mare Nostrum) un proyecto para simular por ordenador la conducción por un tramo de más de cien kilómetros de la Autopista del Mediterráneo (A-7), para lo que se requería modelar una gran estructura de datos que se correspondiera de la forma más real posible con el trazado de esta autopista de peaje. Los programas de diseño que utilizan los ingenieros no permiten crear ficheros de datos para la simulación visual, y los programas de modelado existentes (ver, por ejemplo, [5]) tampoco respondían a las especificaciones complejas que nos planteaba la autopista real, y que pueden obtenerse de documentos oficiales como [6, 7], así que decidimos extender las posibilidades de nuestras propias herramientas de modelado para incluir estas especificaciones.



*Figura 1: Diferentes 'niveles' de información en la estructura de datos correlacionada utilizada en simulación de conducción*

## Descripción básica de las carreteras

La descripción de la carretera que vamos a utilizar se basa en separar la información sobre la forma del *eje o línea central* y la forma de la *sección transversal* en cada punto de este eje. A su vez, el eje viene determinado por tres tipos de información independientes (ver figura 2): la forma de la *planta* (cómo varía la curvatura suponiendo que la carretera es plana), la forma del *perfil vertical* (cómo varía la altura en función de la longitud recorrida en la planta) y el valor del *peralte* o inclinación transversal, que puede ser diferente para ambos lados de la calzada.



*Figura 2: Los tres diagramas que definen la forma de un tramo de carretera. De arriba a abajo: perfil vertical, planta y peraltes, tras haber sido procesados a partir del fichero de datos*

Nuestro objetivo es descomponer toda esta información en secuencias de puntos, o lo que es equivalente, en una secuencia de segmentos, y en algunos atributos asociados a esos segmentos. Como puede verse en la figura 2, los tres diagramas y los puntos que definen cada uno de los segmentos de planta, perfil y peralte, son completamente independientes entre sí. El no considerar esta independencia es un error común en muchos programas de diseño de carreteras, que por simplicidad de la estructura de datos y del interfaz gráfico para la edición hacen coincidir los puntos definitorios de las tres secuencias, lo que los hace insuficientes para representar vías reales.

Debemos de tener en cuenta que disponemos de dos sistemas de coordenadas claramente diferenciados para referirnos a puntos de la carretera. Uno es el sistema de tres coordenadas espaciales cartesianas  $x, y, z$ . En nuestra discusión supondremos que  $z$  es el eje vertical. Por otra parte, tenemos un sistema bidimensional local que utiliza como coordenadas la longitud recorrida a lo largo del eje (que se suele llamar punto kilométrico o *PK*, pero que nosotros abreviaremos como  $l$ ), más el desplazamiento lateral o distancia de un punto sobre la superficie de la carretera al eje (magnitud que abreviaremos como  $d$ ).

Los *segmentos de planta* vendrán definidos por su longitud medida en PK y por una serie de atributos que determinan su forma. Estos atributos, como veremos, permitirán hallar las coordenadas  $x, y$  en función de  $l, d$ . Si se estudian las construcciones

utilizadas por los ingenieros de caminos, se concluye que los segmentos pueden ser de estos tipos:

Segmento recto: su curvatura es nula.

Segmento de arco de circunferencia: viene definido por un *radio* de curvatura constante, más un signo que indique si la curva se produce a la derecha o a la izquierda tomando como referencia la dirección en que  $l$  se incrementa.

Segmento espiral o clotoide: se trata del más complejo. Estos segmentos se utilizan como transición entre una recta y un arco o entre dos arcos de diferente radio. Para facilitar la conducción se caracterizan por un incremento lineal de la curvatura, o lo que es lo mismo del inverso del radio de giro. Por esta razón, habrá que definir el valor inicial y final de la curvatura, que coincidirá con la de los segmentos adyacentes. En ingeniería se suele utilizar el parámetro  $A = \sqrt{RL}$  que en el caso de las espirales de transición arco-recta se interpreta tomando  $R$  como el radio del arco y  $L$  como la longitud de la espiral.

Esta descripción, basada en puntos que nos darían pares (*curvatura*,  $l$ ), da lugar a una representación analítica de la planta [8], que permitirá un interfaz de diseño basado en puntos de control.

Los ***segmentos de perfil*** son rectas en un diagrama ( $z$ ,  $l$ ), cuyas conexiones (cambios de rasante) se suavizan por medio de lo que se llama un *acuerdo parabólico*. En nuestra descripción se darán los puntos que definen los segmentos de recta más un atributo que indicará en qué grado se va a suavizar su conexión. Los ingenieros suelen utilizar el parámetro  $K_v = \text{longitud del acuerdo/incremento de pendiente}$ , pero nosotros utilizaremos de forma equivalente la longitud del tramo de acuerdo parabólico, puesto que nos permitirá controlar gráficamente la curva en el interfaz.

Por último, los ***segmentos de peralte*** vendrán definidos por puntos en un diagrama que nos dará el valor de la inclinación en función de  $l$  para la parte derecha e izquierda de la calzada de manera independiente.

La otra parte, independiente, en la descripción de la carretera, es la especificación de la ***sección transversal***, que también vamos a efectuar por medio de segmentos rectos. El problema que se plantea es el de reflejar el comportamiento complejo que tiene la sección a lo largo del eje según el valor variable de los peraltes. Así, mientras unos segmentos de la sección siempre permanecerán con una posición relativa fija respecto al eje y una inclinación absoluta constante, otros dependerán del valor del peralte y de la posición de otros segmentos.

Por esta razón se ha diseñado una estructura de relaciones entre los segmentos que permite expresar con flexibilidad sus interdependencias, que básicamente se resumen en los siguientes tipos:

Posición invariante: la posición del segmento no cambia respecto al eje central (este es el caso del centro de la mediana que separa las dos calzadas).

Traslación relativa: la posición del segmento se calcula efectuando una traslación desde un punto de otro segmento que se habrá evaluado antes (esto sucede, por ejemplo, con la berma y el talud, que son trozos de desmonte fuera del arcén).

Giro absoluto: el segmento gira, según el valor del peralte, alrededor de un punto fijo. (Este es el caso de la parte principal de la calzada).

Giro relativo: el segmento gira lo que indica el peralte, pero respecto a un punto de otro segmento.

Definido por dos puntos: el segmento se traza uniendo dos puntos de otros segmentos que han sido evaluados previamente.

Además de esta descripción básica de la carretera se añaden otros dos tipos de objetos: los objetos de *tipo intervalo* (que cubren un tramo de la carretera entre dos valores de PK, por ejemplo una bionda o protección lateral) y los objetos de *tipo puntual* que se sitúan en un punto cuya coordenada  $l$  se especifica (por ejemplo, una señal de tráfico o un semáforo). A su vez, la colocación de estos objetos en el espacio depende de la evaluación de la sección transversal, por lo que en su definición se utiliza un mecanismo de referencia a los segmentos de la sección equivalente al que hemos visto.

### **Generación de la representación poligonal**

La representación analítica del eje y la sección proporciona una descripción exacta de la superficie de la carretera, pero no puede utilizarse directamente para la visualización en tiempo real. Por ello es necesario generar una representación basada en polígonos y, como veremos en el siguiente apartado, organizarla jerárquicamente. Para poder generar los polígonos correspondientes a la vía tendremos que escoger puntos a lo largo del eje longitudinal y unir todos los segmentos de sección transversal<sup>1</sup> formando tiras de triángulos o cuadriláteros (*strips*).

Conviene generar solamente el mínimo número de polígonos necesario para que la apariencia de la carretera sea lo suficientemente suave. Para ello introducimos una función de muestreo adaptativo que generará puntos a lo largo del eje, de manera que su separación se adapte a la variación de la curvatura. Permitiendo así mayor detalle donde sea necesario para dar suavidad a la representación visual. Este muestreo adaptativo puede controlarse mediante tres umbrales independientes: la curvatura máxima permitida para la planta, la curvatura del perfil vertical y la variación del peralte.

El algoritmo procede como una iteración por aproximación sucesiva: partiendo del punto inicial de la carretera se escoge un punto a una cierta distancia  $r$ . Si este punto no supera los umbrales de curvatura admitidos, se sigue avanzando de nuevo una distancia  $r$ . Por contra, si se supera algún umbral de curvatura, se reduce a la mitad el valor de la distancia de búsqueda  $r$  y se vuelve al punto anterior. El proceso continúa hasta que  $r$  se reduce por debajo de un cierto valor de error.

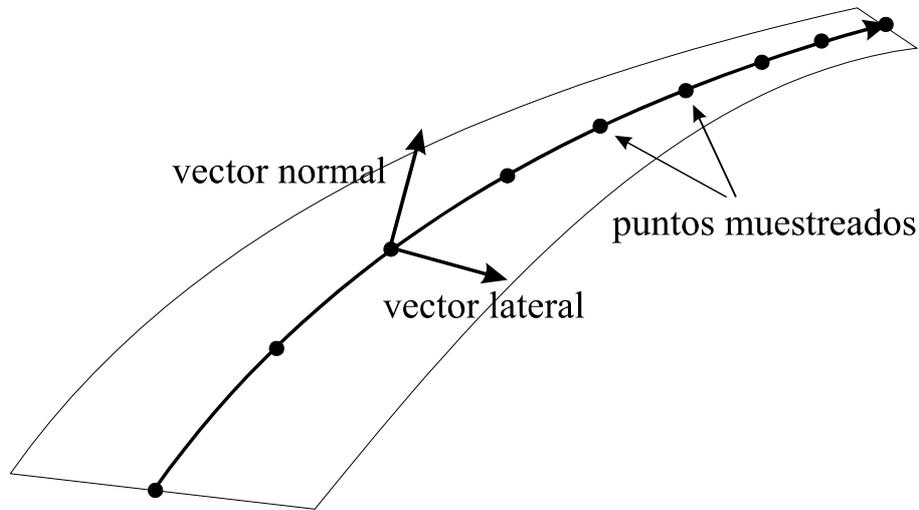
A partir de los valores sucesivos de  $l$ , la función de muestreo generará una lista de puntos para cada segmento de planta<sup>2</sup> que incluirán información sobre la posición  $x,y,z$

---

<sup>1</sup> En realidad el proceso es más complicado, porque involucra también la consideración de los objetos de tipo intervalo, que generan puntos de muestreo adicionales, que deben insertarse en el conjunto de puntos total.

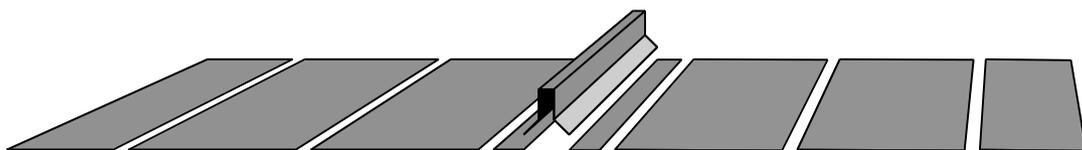
<sup>2</sup> Se ha elegido arbitrariamente el segmento de planta como el objeto que va a centralizar la información geométrica global de cada trozo de la carretera.

y también el vector normal y lateral (ver figura 3). Esta información se habrá obtenido en el proceso de comprobación de los umbrales de curvatura para el punto recurriendo a funciones de evaluación de las tres secuencias que definen el eje.

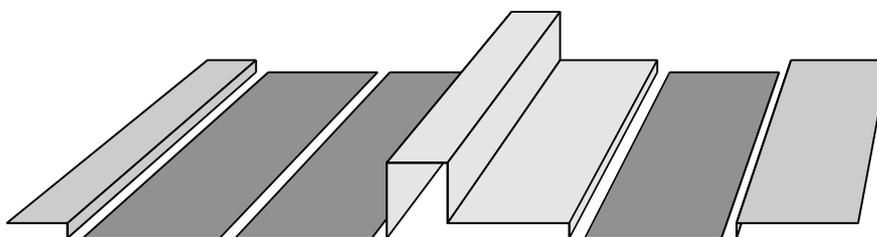


*Figura 3: Cálculo de puntos muestreados sobre un segmento de carretera con información sobre posición 3D, vector normal y lateral.*

A continuación, para poder generar la estructura poligonal, se utilizará la definición de la sección transversal (ver ejemplos en la figura 4), que deberá ser evaluada para cada punto muestreado teniendo en cuenta el valor del vector lateral y las relaciones de interdependencia especificadas entre sus segmentos. De esta manera, la repetición de los puntos inicial y final de cada segmento de la sección lateral para los distintos puntos muestreados dará lugar a una malla poligonal como la que se ve en la figura 5.

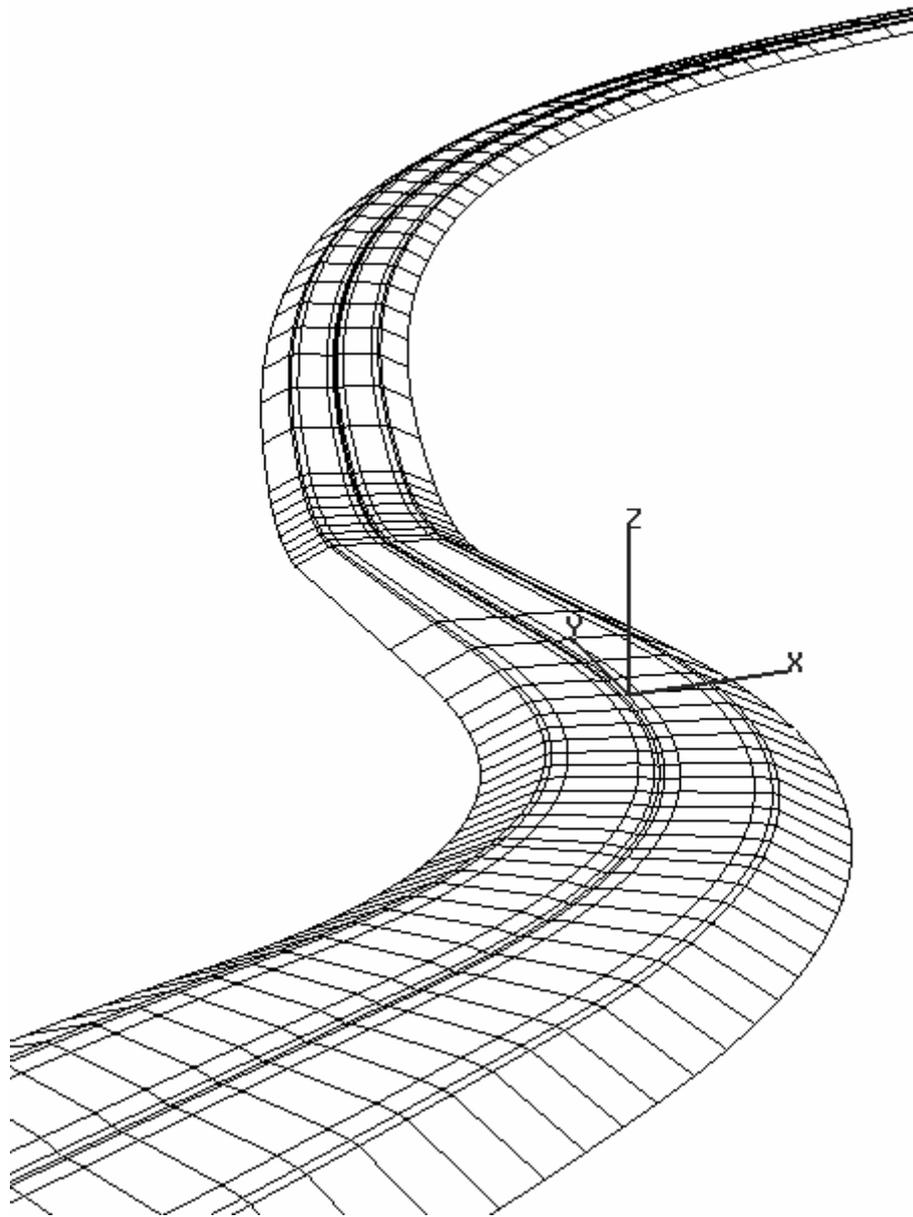


Ej. Sección Vía Interurbana



Ej. Sección Vía Urbana

*Figura 4: Ejemplo de definición de secciones transversales*



*Figura 5: Resultado de generar las tiras de polígonos correspondientes a una sección repetida a lo largo de los puntos de muestra*

El único cálculo que resulta problemático en este proceso de evaluación de puntos a partir de su coordenada  $l$  es la parte correspondiente a las espirales o clotoides. Si suponemos que estamos en una espiral de transición entre una recta y un arco de circunferencia a la izquierda, y asignamos como posición inicial (la que estaría en contacto con la recta el valor  $x,y = (0,0)$ , y una tangente inicial de valor  $(1,0)$ , entonces la espiral viene dada por:

$$x = A\sqrt{\pi} \int_0^t \cos(\pi \cdot u^2 / 2) du$$

$$y = A\sqrt{\pi} \int_0^t \text{sen}(\pi \cdot u^2 / 2) du$$

donde  $A$  es el parametro de la espiral y  $t = \frac{l}{A\sqrt{\pi}}$

Como puede verse se trata de una curva integral que no puede parametrizarse, lo que hace que su evaluación repetida para diferentes valores de  $l$  deba hacerse mediante integración acumulativa. Puesto que en el método de muestreo se van probando diferentes valores de  $l$  haciendo aumentar y disminuir esta variable, y además necesitaremos un sistema de evaluación rápido para ser utilizado durante la ejecución de la simulación<sup>3</sup>, se ha adoptado la solución de precomputar el valor de estas integrales para una secuencia de puntos fijos en cada espiral, y utilizar estos valores cuando haya que calcular puntos intermedios, lo que evita comenzar la integración siempre con  $t=0$ .

### **Estructura de datos para visualización**

Debido a nuestro interés en representar visualmente en tiempo real la escena simulada que contiene a las carreteras, no solamente tenemos que calcular los polígonos, sino asignarles vectores normales que permitan su iluminación, propiedades materiales y texturas. También habrá que organizarlos debidamente en una estructura jerárquica [9] y, a ser posible, utilizar algún mecanismo para la selección de niveles de detalle, de manera que solamente representemos con texturas y un gran número de polígonos aquellas partes de la carretera que se encuentran más cercanas. En nuestra implementación estamos generando tres niveles de detalle diferentes. Cuando los objetos se encuentran más lejos que una cierta distancia, ya no se dibujan. Este mecanismo de selección es el proporcionado por la librería gráfica IRIS Performer, que se utiliza en la ejecución de la simulación.

Además, para facilitar la selección del nivel de detalle y homogeneizar el tamaño de los objetos, sería conveniente descomponer la carretera en trozos del mismo tamaño. A estos trozos los llamaremos *subsegmentos*. Cada detalle del subsegmento contendrá tiras poligonales correspondientes a los diferentes segmentos de la sección de la carretera, que tendrán diferentes propiedades (material, textura). La figura 6 resume cuál es la estructura resultante para la parte visual de la estructura de datos. En esta figura se muestra también la forma de añadir los objetos puntuales estableciendo una conexión o ensamblado con un fichero externo donde está descrito el objeto (por ejemplo, un señal), y aplicándole una transformación de coordenadas para colocarlo en la posición y orientación deseada dentro de la escena.

Toda esta estructura visual es guardada en un fichero de datos con un formato propio desarrollado por los autores. A la hora de efectuar la visualización se dispone de un

---

<sup>3</sup> En concreto, se requiere hacer esta evaluación para calcular la posición y orientación exacta de los vehículos sobre la superficie de la carretera.

módulo que convierte este fichero en una estructura utilizable por la librería estándar para simulación IRIS Performer.

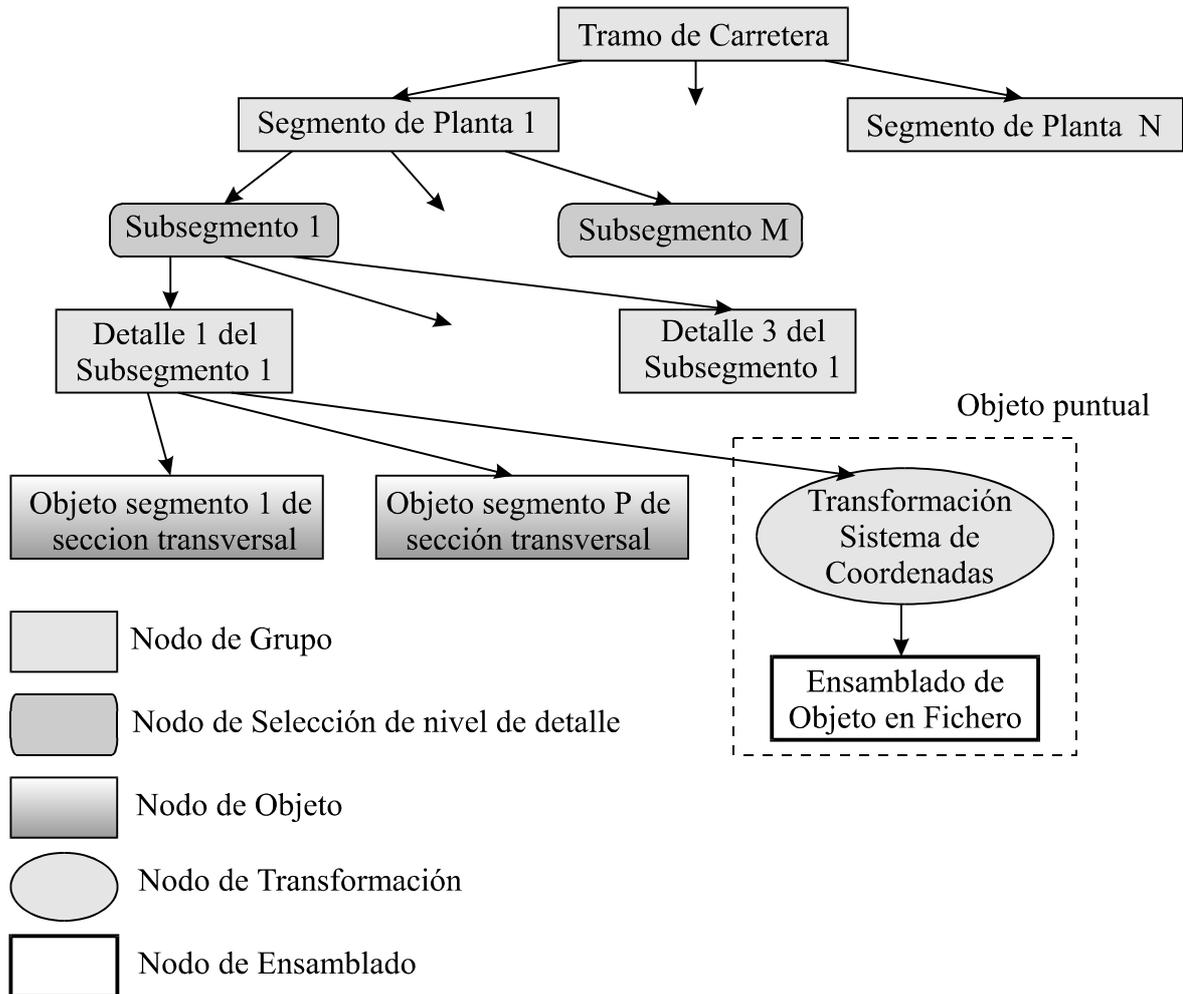


Figura 6: Esquema de la estructura de datos visual

### Interfaz gráfico para manipular trazados de carreteras

Una vez desarrolladas las funciones para generar la estructura visual de un tramo de carretera se tiene solucionado el problema del modelado del escenario para ciertas aplicaciones en las que la carretera está claramente definida de antemano, por ejemplo, cuando se trata de simular un trazado real cuyos datos son conocidos (caso del proyecto de modelado de la autopista A-7). Sin embargo otras aplicaciones requieren una edición manual de la carretera hasta obtener el resultado deseado. Ya hemos comentado que los autores habían construido previamente algunas herramientas de diseño interactivo de carreteras que cumplían esta función. La tarea que se plantea ahora es permitir la integración en esas herramientas existentes de las nuevas funciones para carreteras con especificación realista.

El problema que se plantea es doble: por una parte hallar el mínimo conjunto de puntos de control necesarios para especificar la estructura de segmentos que hemos presentado,

y por otra parte dotarlos de uno o más grados de libertad, pero de manera que no se produzcan efectos indeseables (trazados imposibles debidos a singularidades en las combinaciones de parámetros). La propuesta de puntos de control puede verse en la figura 7, salvo los puntos para controlar el peralte, que no se muestran.

Puesto que las espirales siempre aparecen como transición entre rectas y arcos, o entre dos arcos, para construir la planta se utilizarían dos elementos compuestos básicos que facilitarían la manipulación por medio de puntos de control. Uno sería una combinación *recta/espiral\_entrada/arco/espiral\_salida/recta* como se ve en la figura 7, donde podrían suprimirse opcionalmente los segmentos de espiral y los segmentos de recta. El otro elemento básico constaría de una combinación *arco/espiral/arco* y no se podría eliminar ninguno de sus elementos. Con estas dos combinaciones básicas es posible reproducir cualquier trazado que cumpla las especificaciones de ingeniería.

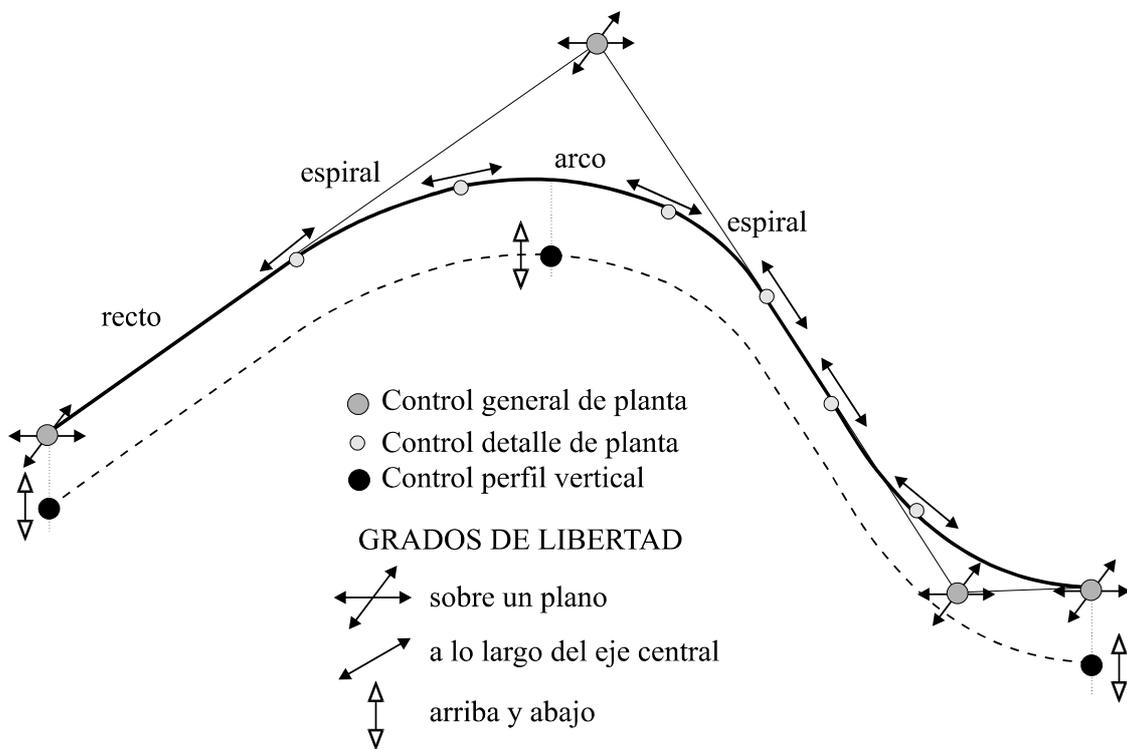


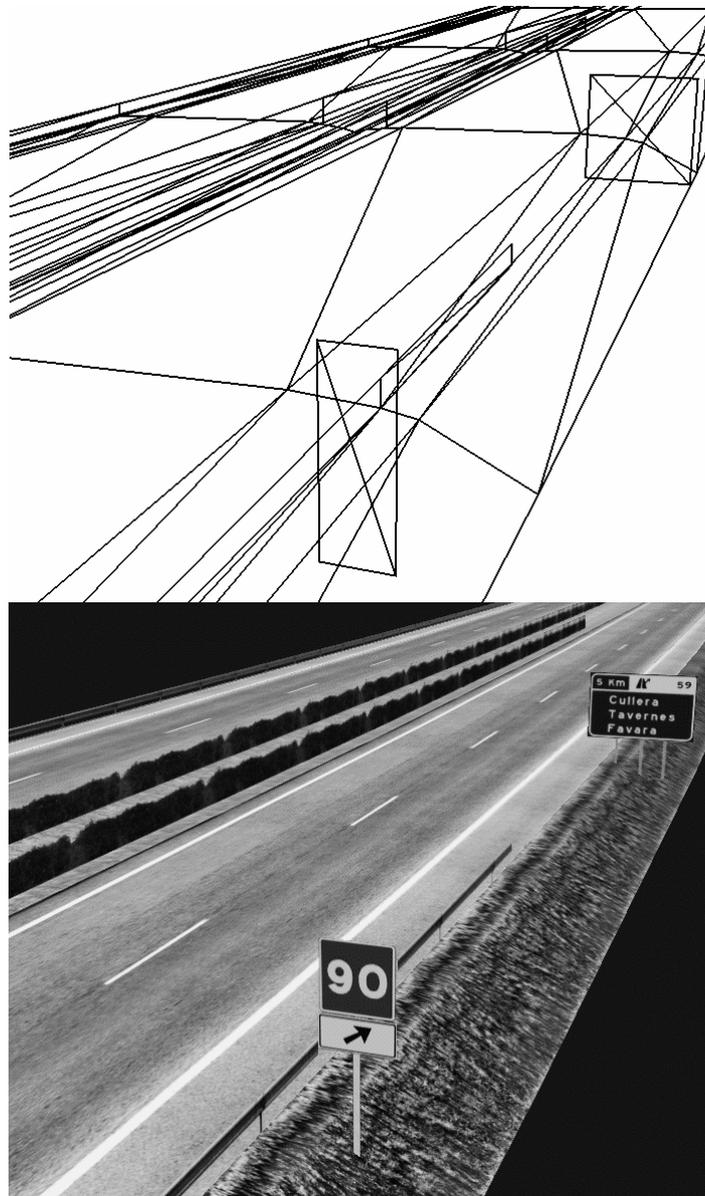
Figura 7: Conjunto de puntos de control para el diseño interactivo

La forma de solventar el segundo problema del interfaz, la inclusión de las restricciones de los parámetros descargando al diseñador de la tarea de su comprobación<sup>4</sup>, es permitir que los puntos de control se muevan solamente cuando dar lugar a una situación permitida. En caso de que al mover un punto se fuera a producir una combinación prohibida de los parámetros, el punto se quedaría en su posición inicial. Puede también darse la opción al usuario de que solicite la ayuda de funciones automáticas para intentar hacer modificaciones locales de otros parámetros para llegar a una situación compatible con sus especificaciones.

<sup>4</sup> Estas restricciones afectan, sobre todo, a los segmentos de planta.

## Aplicaciones

Como hemos mencionado, el principal objetivo de esta investigación era conseguir una forma eficiente de crear un escenario tridimensional para el trazado de la autopista A-7 gestionada por la empresa AUMAR. En la figura 8 puede verse un ejemplo del resultado una vez aplicadas texturas y añadidos ciertos objetos puntuales. La idea de utilizar estas funciones de modelado para la evaluación de infraestructuras viarias desde el punto de vista funcional y de seguridad vial se continúa actualmente en un proyecto conjunto con el Traffic Research Centre de la Universidad de Groningen (Holanda). Este tipo de herramienta de modelado se está también utilizando para diseñar escenarios de conducción en el proyecto SIVAS (Sistema de Formación Vial Asistido por Simulación), en el que se ha desarrollado un sistema para que los profesores de autoescuelas muestren a los alumnos de forma interactiva situaciones de conducción con interés didáctico (ver [10]). Una visión de una de estas situaciones puede verse en la figura 9.



*Figura 8: Vista del modelo de un tramo de la autopista A-7*



*Figura 9: Vista de uno de los escenarios utilizados en el proyecto SIVAS*

## **Referencias**

- [1] S. Bayarri y M. Fernández. "Virtual Reality in Driving Simulation". Encyclopaedia of Science and Technology, 1997. (aceptado para publicación).
- [2] D. Evans. "Ground vehicle database modelling". Driving Simulation Conference en RTS'94. 12 Enero 1994. Paris.
- [3] S. Bayarri, M. Fernández y M. Pérez. "Virtual Reality in Driving Simulation". Communications of the ACM, May 1996.
- [4] S. Bayarri et al. "Segmented database and dynamic management algorithms for combined driving simulation". International Training Equipment Conference ITEC'96. La Haya, 1996.
- [5] J.P. Colinot y J.J. Toumazet. "Evariste: genesis of a road databases editor". Driving Simulation Conference '97. Lyon, 8-9 Septiembre, 1997. Ed. Teknea. France. ISBN: 2-87717-063-2.
- [6] "A Policy on Geometric Design of Highways and Streets". Washington DC. American Association of State Highway and Transportation Officials, 1990.
- [7] "INTERFASE: Technical Guide on Road Safety for Interurban Roads". Federación Europea de Seguridad Vial ERSF, 1996.
- [8] B.E. Artz. "An Analytical Road Segment Terrain Database for Driving Simulation". DCS'95. 12-13 Septiembre 1995. ISBN 2-87717-051-9. Ed. Teknea, 1995.
- [9] L. del Pino. "Realidad Virtual". Ed. Paraninfo, 1995.
- [10] S. Bayarri et al. "An Instructional Aid System for Driving Schools Based on Visual Simulation". Aceptado para su publicación en International Training Equipment Conference ITEC '98. Lausana, Suiza.