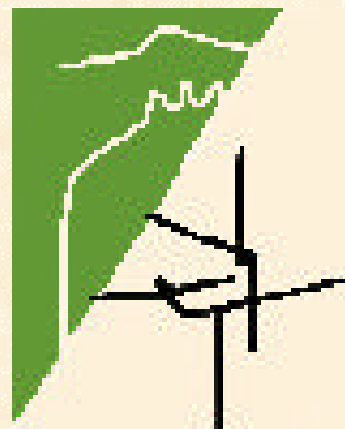


UNIVERSIDAD DE GRANADA  
DEPARTAMENTO DE EDUCACIÓN FÍSICA  
Y DEPORTIVA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA  
ACTIVIDAD FÍSICA Y DEL DEPORTE



**ANÁLISIS BIOMECÁNICO DE LA  
TÉCNICA DEL VIRAJE DE SLALOM  
EN EL ESQUÍ ALPINO**

**AUTOR**

**PABLO J. GÓMEZ LÓPEZ**

**DIRECTORES**

**DR. MARCOS GUTIÉRREZ DÁVILA.**

**DR. VICTOR MANUEL SOTO HERMOSO.**

UNIVERSIDAD DE GRANADA  
DEPARTAMENTO DE EDUCACIÓN FÍSICA Y  
DEPORTIVA  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ACTIVIDAD FÍSICA  
Y DEL DEPORTE



**ANÁLISIS BIOMECÁNICO DE LA  
TÉCNICA DEL VIRAJE DE SLALOM  
EN EL ESQUÍ ALPINO**

AUTOR

PABLO J. GÓMEZ LÓPEZ

DIRECTORES

DR. MARCOS GUTIÉRREZ DÁVILA.

DR. VICTOR MANUEL SOTO HERMOSO.

TESIS DOCTORAL

**ANÁLISIS BIOMECÁNICO  
DE LA TÉCNICA DEL VIRAJE  
DE SLALOM EN EL ESQUÍ ALPINO**

AUTOR

PABLO J. GÓMEZ LÓPEZ

DIRECTORES

DR. MARCOS GUTIÉRREZ DÁVILA.  
DR. VICTOR MANUEL SOTO  
HERMOSO.

PROGRAMA

ACTIVIDAD FÍSICA Y SALUD

DEPARTAMENTOS

DTO. EDUCACIÓN FÍSICA Y  
DEPORTIVA  
DTO. ENFERMERÍA

UNIVERSIDAD DE GRANADA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA  
ACTIVIDAD FÍSICA Y DEL DEPORTE

JUNIO 2002

## CONFORMIDAD DEL DEPARTAMENTO

**DEPARTAMENTO:** EDUCACIÓN FÍSICA Y DEPORTIVA.

**PROGRAMA DE DOCTORADO:** ACTIVIDAD FÍSICA Y SALUD

D. **LUIS JAVIER CHIROSA RIOS** Secretario de este Departamento:

**CERTIFICO:** Que este Departamento, en su reunión del día 13 de Junio de 2002 ha dado su conformidad para la presentación de la Tesis Doctoral de D. PABLO J. GÓMEZ LÓPEZ

**TITULO DE LA TESIS:** *ANALISIS BIOMECANICO DEL VIRAJE DE SLALOM EN EL ESQUI ALPINO*

**DIRECTORES:** DR. MARCOS GUTIÉRREZ DÁVILA.  
DR. VICTOR MANUEL SOTO HERMOSO

TUTOR:

Y para que conste a los efectos pertinentes en la Comisión de Doctorado, expido la presente con el Vº Bº del Director de este Departamento a 13 de Junio de 2002.

Vº. Bº.

EL SECRETARIO,

Fdo.

Fdo.

Sello del Departamento

EXCMO. SR. PRESIDENTE DE LA COMISION DE DOCTORADO DE  
ESTA UNIVERSIDAD

## INFORME DE LOS DIRECTORES DE TESIS

Dr. Marcos Gutiérrez Dávila, Profesor Titular de Biomecánica de la Actividad Física y el Dr. Víctor Manuel Soto Hermoso, Profesor Titular de Biomecánica del Movimiento Humano, ambos de la Universidad de Granada y pertenecientes al Departamento de Educación Física y Deportiva, y directores de la Tesis : “Análisis biomecánico de la técnica de viraje del Slalom en el esquí alpino”, de la que es autor D. Pablo J. Gómez López

### **AUTORIZAN**

La presentación de la referida Tesis para su defensa y mantenimiento de acuerdo con lo previsto en el RD 185/1985 de 23 de Enero.

**INFORMANDO** que la presente Tesis Doctoral ha sido realizada por el doctorando Pablo J. Gómez López en el Laboratorio de Análisis del Movimiento Humano de la Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte de la Universidad de Granada, y que cumple los requisitos necesarios de calidad y originalidad para su defensa.

Y para que, expedimos conste el presente en Granada el 13 de Junio de 2002.

Fdo.: Dr. Marcos Gutiérrez Dávila

Fdo.: Dr. Víctor Manuel Soto Hermoso

*A mis padres, por su apoyo.*

*A Isabel, por su compañía.*

*A mi hijo Pablo, por su comprensión.*

## AGRADECIMIENTOS

Han sido muchas las personas e instituciones que de una manera u otra han contribuido en el proceso de realización de esta Tesis y quisiera aprovechar esta oportunidad para dejar constancia de mi agradecimiento más sincero.

En primer lugar, quisiera expresar mi gratitud a mis directores de Tesis por su colaboración y seguimiento desde el inicio de este trabajo y por el apoyo, seguridad y confianza que han depositado en mí durante la elaboración del mismo.

A D. Marcos Gutiérrez Dávila, por su inestimable y eficaz colaboración en el área de la biomecánica de la actividad física, por su capacidad de trabajo y sus numerosas apreciaciones que han permitido finalizar esta Tesis, por su contribución en los apartados de resultados y discusión, por el tiempo que me ha dedicado y por su valiosa amistad.

A D. Víctor Manuel Soto Hermoso, por su apreciada cooperación en el área de la biomecánica del movimiento humano, por el desarrollo del programa informático, por su inmejorable predisposición en todo momento, por su estrecha colaboración en la filmación, digitalización y computerización de los datos, por su contribución en el apartado del método y en los inicios de este estudio, y por su paciencia.

A D. Francisco García López, por su estrecha colaboración en la filmación del evento y apoyo logístico.

A mis compañeros del Departamento de Educación Física y Deportiva, por manifestarme su apoyo diario y por crear un ambiente de trabajo y compañerismo que han hecho agradable mi inicio en el campo de la investigación.

A Cetursa Sierra Nevada y al Comité Organizador del Campeonato del Mundo de Esquí Alpino en Sierra Nevada 1996 por concederme su autorización para realizar la filmación y poder ubicarme en la pista de competición, y a todos aquellos que durante los días que duró la filmación se acercaron a interesarse y a ofrecerse para ayudarme.

Por último, me gustaría terminar este apartado realizando un agradecimiento especial a aquellas personas que con su cariño y confianza me han apoyado y animado en la realización de esta investigación, tanto en los momentos alegres como en los amargos, a mis padres y mis hermanos Antonio y Pilar, a mi mujer Isabel y a mi hijo Pablo a los cuales les doy las gracias por haber estado a mi lado, y a todos mis amigos.



Índice	6
Capítulo 1: Introducción.	9
1. Introducción.	10
1.1. Objetivos	14
1.1.1. Objetivos generales.	14
1.1.2. Objetivos específicos.	15
Capítulo 2: Estudio de la técnica de viraje del Slalom.	16
2. Estudio de la técnica de viraje del Slalom.	17
2.1. El esquí alpino de competición.	18
2.2. Consideraciones iniciales acerca del Slalom.	18
2.3. La técnica del Slalom.	21
2.4. Estudio y análisis del viraje en el Slalom.	49
2.5. Tipos de virajes.	68
2.6. La estructuración del viraje de Slalom en fases de movimiento.	77
2.6.1. Fase de iniciación.	84
2.6.2. Fase de conducción.	87
Capítulo 3: Método.	90
3. Método.	91
3.1. Características generales del método.	91
3.1.1. Sujetos.	94
3.1.2. Material y Métodos.	98
3.1.2.1. Técnicas de registro.	98
3.1.2.2. Las técnicas fotogramétricas tridimensionales.	101
3.1.2.3. Modelo biomecánico del esquiador.	113

---

3.1.2.3. Modelo biomecánico del esquiador.	113
3.1.2.4. Parámetros Inerciales del esquiador.	114
3.1.2.5. Sistema de referencia.	118
3.1.2.6. Material de registro.	120
3.1.2.7. Procedimiento.	125
3.1.2.8. Variables de estudio.	134
3.1.2.8.1. Determinación de tramos en el viraje para el análisis.	134
3.1.2.8.2. Determinación del CG del sistema.	134
3.1.2.8.3. Variables Temporales.	140
3.1.2.8.4. Variables relativas a posiciones espaciales.	143
3.1.2.8.5. Variables relativas a las velocidades relacionadas.	144
<b>Capítulo 4: Resultados.</b>	<b>146</b>
4. Resultados.	147
4.1. Resultados análisis individual viraje en Slalom sujetos hombres (SH)	148
4.1.1. Análisis temporal en sujetos hombres (SH).	148
4.1.2. Análisis individual de SH1	152
4.1.3. Análisis individual de SH2	163
4.1.4. Análisis individual de SH3	170
4.1.5. Análisis de las trayectorias en sujetos hombres (SH)	178
4.2. Resultados análisis viraje en Slalom en sujetos damas (SD).	180
4.2.1. Relativos al análisis temporal.	180
4.2.2. Relativos al análisis de las trayectorias realizadas	182
4.2.3. Relativos al análisis de las velocidades	184

---

4.2.3.1. Análisis velocidad media del centro de gravedad (CG).	184
4.2.3.1.1 Análisis descriptivo.	184
4.2.3.1.2 Análisis inferencial	190
4.2.3.2. Análisis velocidad media extremo anterior del pie externo o punta de la bota externa (BI)	192
4.2.4. Relativas al análisis de las posiciones espaciales.	197
<b>Capítulo 5: Discusión.</b>	<b>201</b>
5. Discusión	202
5.1. Discusión de los resultados en la muestra de hombres analizada	203
5.2. Discusión de los resultados en la muestra de damas analizada	210
<b>Capítulo 6: Conclusiones y perspectivas de futuro.</b>	<b>215</b>
6. Conclusiones y perspectivas de futuro.	216
<b>Capítulo 7: Referencias Bibliográficas.</b>	<b>221</b>
7. Referencias bibliográficas.	222
<b>Anexos: Listado de Figuras y Tablas.</b>	<b>234</b>
Capítulo 2. Listado de Figuras y Tablas	235
Capítulo 3. Listado de Figuras y Tablas	240
Capítulo 4. Listado de Figuras y Tablas	242
Capítulo 5. Listado de Figuras	247

---

CAPITULO 1  
INTRODUCCIÓN

## **1. Introducción**

La Biomecánica es una perspectiva científica orientada a establecer los principios y métodos de aplicación mecánica al estudio de las estructuras y fundamentos de los sistemas biológicos. Por tanto, podemos decir que es una rama de la ciencia que estudia las relaciones mecánicas de los seres vivos (Soto, 1995). En el esquí alpino se estudia un caso aplicado muy particular de la misma, las relaciones mecánicas en el hombre y su interacción con un medio: la nieve. Por tanto es importante considerar al esquiador como un sistema complejo (Gautier, 1991) compuesto de deportista más esquís más botas y bastones, donde el individuo se enfrenta a un triple problema: *a)* en primer lugar, para esquiar es necesario utilizar un material que nos va a permitir deslizarnos sobre la nieve y que presenta unas dimensiones excepcionales en cuanto a su longitud como son los esquís; *b)* en segundo lugar, el deportista con esquís, que denominaremos a partir de ahora como esquiador, debe de mantener una posición en movimiento que debe adaptar continuamente a las irregularidades del terreno y a los cambios de velocidad, para aplicar las fuerzas necesarias que le permitan mantenerse en equilibrio; y *c)* por último, el esquiador debe dirigir sus esquís en función de la trayectoria deseada, lo que implicará realizar cambios de sentido y, consecuentemente, aplicar fuerzas para realizarlos .

El hecho de esquiar no necesitaría de un análisis tan profundo si no estuviera acompañado de la competición deportiva, lo que obliga a optimizar los medios para desplazarse por la nieve. La Biomecánica incide directamente en los aspectos relativos a la técnica, intentando mejorarla y adecuarla a las capacidades individuales por medio de la búsqueda de un modelo ideal ante un medio no estable o fluctuante (Antón, et al., 1989). Junto a la condición física, la técnica es el factor más importante que determina el resultado deportivo siendo, normalmente, lo primero que el deportista aprende (Arellano, 1992).

En la actualidad podríamos decir que la biomecánica del esquí se encuentra en la fase de comprensión del movimiento deportivo (investigación básica). Esta fase se caracteriza por la realización de mediciones, registros, filmaciones o evaluaciones de esquiadores de diversos niveles, cuantificando las diferencias, o bien se miden factores que podrían correlacionarse con un buen resultado en una prueba determinada. Por ejemplo, las relacionadas con concentraciones máximas de lactato en sangre (11 mmol/l), en intervalos cortos de esfuerzo en slalom, encontrando una correlación alta entre la concentración de lactato en sangre y el rendimiento obtenido en la prueba (Klinger et al., 1996) o la relación existente entre la velocidad media resultante de la punta de la bota en la dirección del movimiento en el momento de contacto con la puerta (Goodwin, 1993).

En opinión de Aucouturier (1985) parece ser que, tanto el adulto como el niño, manifiestan comportamientos similares en lo referente a las sensaciones producidas por el movimiento y las emociones al practicarlo. De esta forma cuando el individuo juega con el equilibrio, o trata de adoptar una posición en movimiento, o trata de evitar caerse, pone de manifiesto estas sensaciones, al afectar a la propioceptividad. Precisamente el deslizamiento sobre la nieve, propio del esquí alpino, provoca este tipo de sensaciones en las cuales se generan frecuentes cambios de situación a las cuales el individuo trata de adaptarse. Es esta capacidad de adaptación del esquiador a las características del medio sobre el cual se desenvuelve, la que determinará la eficacia de su desplazamiento, la superación de los problemas (desequilibrios) y la búsqueda de la trayectoria ideal que permita reducir el tiempo invertido en realizar un trayecto predeterminado. Estas serán las claves de su éxito en la competición.

La búsqueda de cuáles son esos factores, especialmente aquellos de tipo cinemático, que pueden estar implicados en la eficacia de este movimiento, son el

objetivo principal de esta tesis doctoral, para lo cual será imprescindible la utilización de técnicas fotogramétricas tridimensionales (3D) propias del ámbito de la Biomecánica Deportiva.

El estudio detallado de la técnica nos conducirá hacia la necesidad del análisis del movimiento desde una perspectiva científica basada en las áreas de apoyo al deporte. Dado que la ciencia que se dedica al estudio del movimiento humano y en concreto al análisis de técnica deportiva es la Biomecánica Deportiva, profundizaremos en las implicaciones metodológicas y tecnológicas que aporta esta ciencia para el análisis de los factores mecánicos interactuantes en el gesto del viraje en slalom realizado al pasar una puerta. Una mayor comprensión de este gesto es obtenida a partir del análisis de la investigación científica del ámbito de la biomecánica deportiva realizada sobre esta modalidad, especialmente aquellas aportaciones que utilizan técnicas fotogramétricas ya que serán las empleadas en este proyecto y a las cuales nos referiremos en el capítulo dedicado al método..

A modo de resumen, podemos decir que esta Tesis constituye la aplicación de la Biomecánica, como perspectiva científica, al ámbito del Esquí Alpino como objeto de estudio, profundizando en el estudio de un gesto conocido como el viraje desarrollado en la prueba de Slalom.. Para ello ha sido imprescindible la utilización de metodologías y técnicas propias de la biomecánica deportiva como son los métodos indirectos y las técnicas fotogramétricas tridimensionales. Gracias a ello se ha podido profundizar en el estudio de la técnica empleada por esquiadores de élite mundial masculino y femenino en la realización del gesto seleccionado.

La Tesis se ha adaptado a los apartados clásicos del informe científico, por lo tanto consta de siete capítulos claramente diferenciados; una introducción que constituye una justificación teórica de la implicación científica para el estudio del movimiento deportivo y el planteamiento de los objetivos del estudio, el análisis teórico de la técnica de viraje de Slalom en el esquí alpino, el método, los resultados, una discusión, las conclusiones y por último, las referencias bibliográficas utilizadas.

En la introducción se realiza un preámbulo que nos permitirá profundizar en el entorno sobre el cual se desarrolla la Tesis. El análisis del viraje en el Slalom, requiere que sean aplicadas metodologías rigurosas y precisas que permitan analizar la eficacia desde un punto de vista científico, para la cual se hace imprescindible la participación de la Biomecánica Deportiva. Asimismo se establecerán los objetivos del estudio.

El capítulo segundo, que constituye una prolongación de la parte introductoria, describirá la técnica del Slalom, su reglamento y el análisis del viraje de Slalom desde una perspectiva científica. Especialmente aquellas cuestiones que afectan a su técnica y más concretamente en su concepción biomecánica.

El capítulo tercero profundizará sobre los métodos y técnicas propios de la Biomecánica Deportiva, su aplicación al estudio de los parámetros cinemáticos implícitos en el desplazamiento empleado por el esquiador de slalom durante la ejecución de un viraje al pasar una puerta. Se analizarán las aportaciones científicas más relevantes realizadas en este ámbito, extrayendo aquellas conclusiones más significativas y relevantes que deban ser tenidas en cuenta en la elaboración de esta Tesis. Se comentarán los criterios de selección del gesto objeto de análisis, así como los de la muestra, detallando los parámetros inerciales requeridos para el modelado del cuerpo e implementos empleados por el esquiador. Y se describirán las técnicas fotogramétricas tridimensionales (3D), las cuales permiten que el gesto motivo de análisis sea filmado en condiciones competitivas (Campeonato del Mundo de Esquí Alpino de la disciplina de Slalom en Sierra Nevada), así como el proceso secuencial seguido en esta Tesis para el análisis del viraje. En este capítulo, se expondrán las variables objeto de estudio de esta Tesis y el procedimiento seguido.

En el capítulo cuarto, se expondrán los resultados. En primer lugar, los resultados obtenidos del estudio individual en sujetos hombres. Y en segundo lugar,



los resultados provenientes del estudio intersujetos en damas. El capítulo quinto lo dedicaremos a la discusión de estos resultados. El capítulo sexto expondrá las conclusiones derivadas del estudio y al establecimiento de futuras investigaciones relacionadas con las conclusiones obtenidas, y finalmente el capítulo séptimo mostrará la bibliografía utilizada para la realización de esta Tesis.

### ***1.1. Objetivos***

Antes de comenzar a definir los objetivos de la presente tesis, es conveniente decir que en líneas generales se pretende plantear un análisis biomecánico descriptivo de una habilidad deportiva en el esquí alpino. Por ello, los objetivos planteados a priori se centran más en el establecimiento de una metodología perfectamente contrastada y aplicada en el ámbito de la biomecánica deportiva, pero especificándola sobre las condiciones concretas de la modalidad a estudio: el viraje en el slalom. Por esta razón se han planteado dos objetivos generales que se han concretado en cuatro específicos.

#### ***1.1.1. Objetivos generales***

- a.* Analizar desde el punto de vista de la Biomecánica Deportiva la técnica individual empleada en la realización del cambio de dirección en la modalidad del slalom, utilizando para ello técnicas fotogramétricas tridimensionales de análisis de imágenes basadas en la utilización del vídeo como elemento de registro del movimiento.
- b.* Determinar los factores de eficacia y sus niveles de interacción en la consecución del máximo rendimiento en el gesto motivo de análisis, utilizando para ello los registros obtenidos por esquiadores y

esquiadoras participantes en el Campeonato del Mundo de Esquí Alpino de Sierra Nevada 1996.

### ***1.1.2. Objetivos específicos***

- a. Determinar el proceso metodológico fotogramétrico tridimensional más adecuado para realizar el análisis del viraje en Slalom.
- b. Desarrollar, construir y calibrar un sistema de referencia que permita el análisis tridimensional en un espacio de medianas dimensiones, que permita el análisis con cámaras estáticas del desplazamiento del esquiador durante la realización de un viraje.
- c. Estudiar y determinar cuáles son las fases de realización de un cambio de dirección en slalom, analizando segmento a segmento cuales son las implicaciones de eficacia, así como dilucidar qué diferencias puedan existir en la realización de ese mismo viraje en esquiadores de élite mundial. Esto permitirá deducir hasta que punto las adaptaciones individuales en la técnica utilizada pueden repercutir en el éxito deportivo obtenido.
- d. Averiguar si existen o no diferencias en la ejecución técnica empleada entre esquiadores masculinos y femeninos de una misma especialidad, estableciendo cuáles son esas diferencias.
- e. Realizar un estudio individualizado en hombres y transversal en damas de la técnica, obteniendo animaciones que simulen de forma realista el gesto realizado que concreten las diferencias individuales de la técnica.

## CAPITULO 2

# ESTUDIO DE LA TÉCNICA DE VIRAJE DEL SLALOM

## ***2. Estudio de la técnica de viraje del Slalom***

En este capítulo intentaremos fundamentar, desde el punto de vista teórico, la técnica de ejecución de un viraje en la disciplina del Slalom. Para ello, comenzaremos hablando del esquí de competición y sus disciplinas. Proseguiremos centrándonos en el Slalom, disciplina en la que hemos realizado nuestro estudio, exponiendo algunas consideraciones reglamentarias, en cuanto a la estructura de la carrera que nos van a servir para entender en qué consiste esta disciplina.

Posteriormente, describiremos la técnica de esta modalidad del esquí alpino, comenzando por definir el concepto de técnica deportiva y establecer algunas consideraciones a tener en cuenta en el análisis de la técnica, para continuar haciendo un breve recorrido histórico donde hablamos de la evolución de la técnica del esquí alpino y su consagración en la competición a lo largo de este último siglo. En este mismo apartado definiremos los principios de la técnica del slalom, teniendo en cuenta las opiniones de diferentes autores.

Seguidamente, analizamos cómo se produce el viraje en el Slalom, objeto del estudio presentado en esta Tesis Doctoral, justificándolo desde el punto de vista de la biomecánica. A partir de este exhaustivo análisis clasificamos diferentes tipos de viraje encontrados en la literatura, para conocer más detalles y características del tipo de cambio de dirección que se utiliza en esta modalidad.

Y finalizamos el capítulo, realizando una estructuración del viraje en fases para un mayor entendimiento de las acciones que el esquiador realiza para ejecutar un cambio de dirección.

### 2.1. El esquí alpino de competición

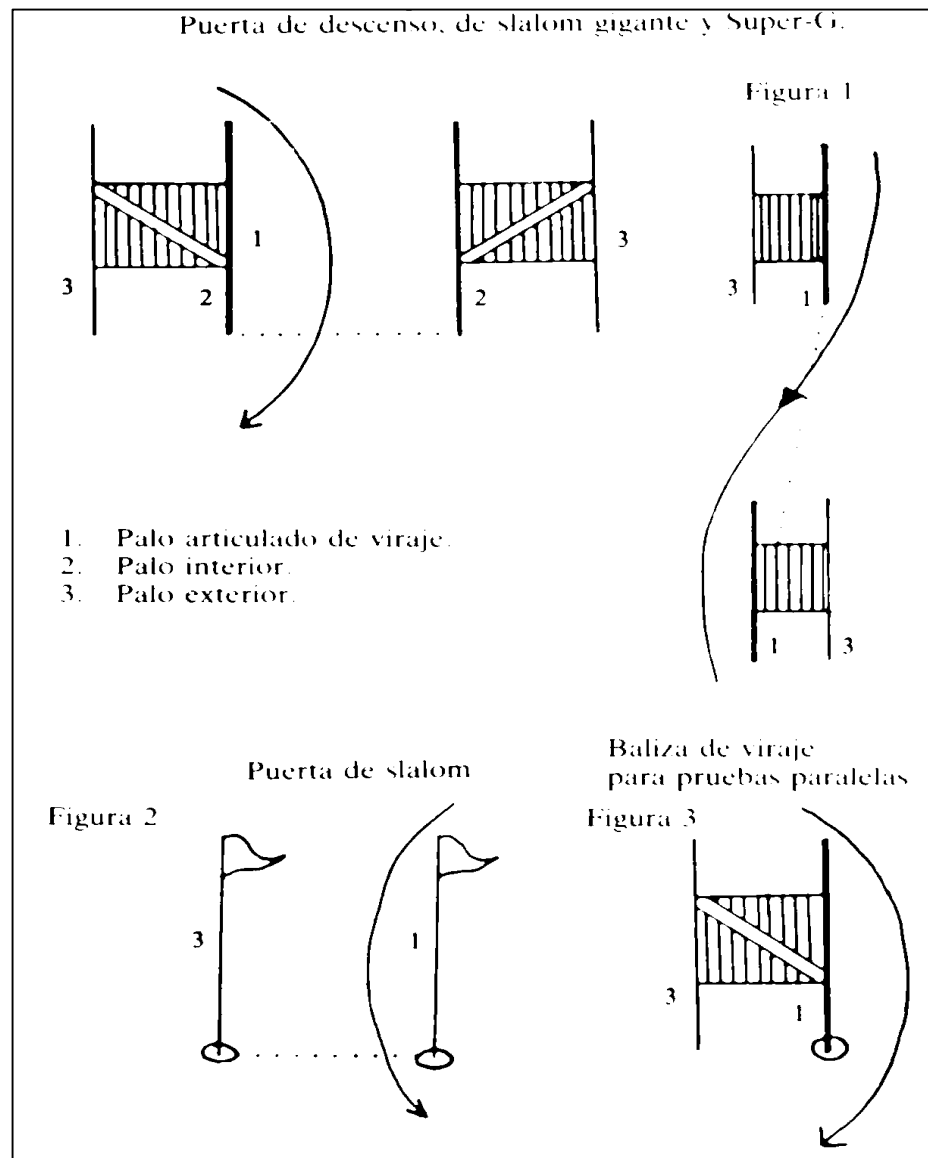
Para Arnaud (1991), el objetivo del esquí alpino de competición consiste en bajar un recorrido de principio a fin previamente establecido en base a un trayecto delimitado por un número de palos, en el mínimo tiempo posible. Estos palos o banderas constituyen lo que se denominan *puertas* y están formadas por dos o cuatro palos según la modalidad en la que nos encontremos, como podemos observar en la **Figura 2.1**.

Las pruebas alpinas están sujetas a unas normas muy precisas, tal y como podemos ver en la **Tabla 2.1**, y según establece la Federación Internacional de Esquí (FIS), en el artículo 203.2 del Libro IV de los Reglamentos de los Concursos Internacionales de Esquí (RIS, 1996, 2000) son: a) el *Descenso* (D), b) el *Slalom* (S), c) el *Slalom Gigante* (G), d) el *Super G* (SG), e) las competiciones paralelas, y f) la *combinada alpina*.

La disciplina alpina que hemos estudiado ha sido el Slalom, ya que es la especialidad en la que se realizan mayor número de cambios de dirección en un espacio delimitado, al haber mayor número de puertas (ver Tabla 2.1). La distancia existente entre puertas (comprendida entre 0.75 m, y 15 m), nos ha permitido analizar desde el punto de vista biomecánico, la técnica de ejecución de un cambio de dirección o *viraje*, en una parte concreta del trazado.

### 2.2. Consideraciones iniciales acerca del Slalom

El Slalom, se define como una prueba de habilidad, en la que se requiere un gran dominio técnico, y donde los participantes deben recorrer un trazado determinado por una serie de puertas, compuestas por dos palos: a) un *palo interior*,



**Figura 2.1.** Diferentes tipos de puertas en las disciplinas de esquí alpino según el RIS (1996, 2000).

**Tabla 2.1.** Principales pruebas alpinas y características técnicas (Gómez, 1996).

DISCIPLINA	SLALOM		GIGANTE		SUPERGIGANTE		DESCENSO	
	H	D	H	D	H	D	H	D
PRUEBA DE ESQUI ALPINO								
DESNIVEL EN M.								
MAX.	220	200	450	400	650	600	1100	800
MIN.	180	140	250	250	500	400	800	500
MIN. J.J.OO Y CTO. MUNDO	140	120	300	300		350	500	
Nº PUERTAS	52-78	42-68	12-15 % DESNIVEL		10 % DESNIVEL			
ANCHURA PUERTAS	4-6 M.		4-8 M.		6-8 M. 8-12.		8 M.MN.	
DISTANCIA ENTRE PALO DE VIRAJE	0.75 < d < 15 M.		10 M. MINIMO		25 M. MINIMO			
Nº MANGAS	2		2		1		1	
RECONOCIMIENTO	ASCENDIENDO		EN DESCENSO		EN DESCENSO		EN DESCENSO (*)	
SALIDA	INTERV.IRREGU.		INTERV.REGUL.		INTERV.REGUL.		INTERV.REGUL.	
					CASCO OBLIGAT.		CASCO OBLIGAT.	

(\*) RECONOCIMIENTO ESPECIAL

articulado en su base y flexible en su longitud o *palo de viraje* como el que podemos ver en la **Figura 2.2**, y *b*) un *palo exterior*, rígido denominado *palo exterior*. En la **Figura 2.3**, se puede observar una *puerta de slalom* y los palos que la forman. En la **Figura 2.4**, podemos ver diferentes tipos de *puertas de Slalom*, las combinaciones que se emplean en el trazado del Slalom, así como los tipos de puertas más frecuentes, la distancia entre puertas permitida y la anchura entre palos de una misma puerta.

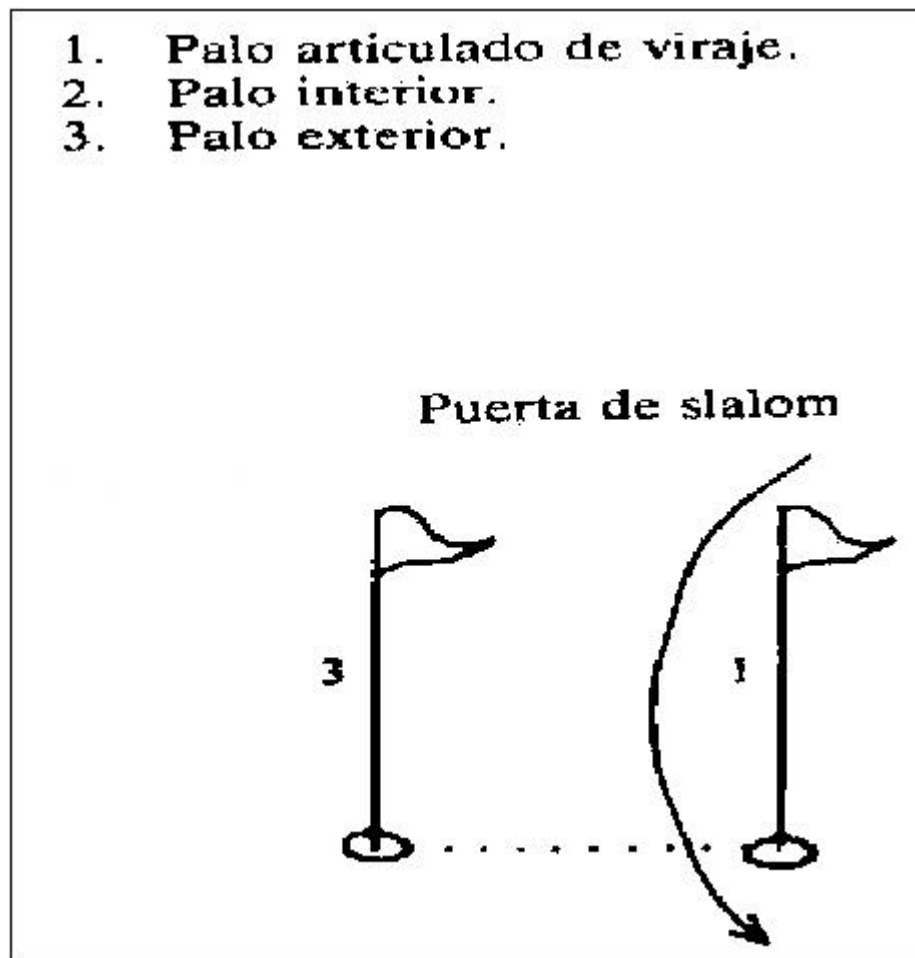
El trazado que debe de bajar el esquiador, tiene que alternar los colores rojo y azul (art., 801.2.2, del RIS, 1996, 2000), y los palos han de estar dispuestos de acuerdo a la especial visión de la persona encargada de colocarlos en la nieve o *trazador*, siguiendo las disposiciones del artículo 803 del R.I.S, (1996, 2000), apartados 1, 2, 3, y 4.

Una puerta ha sido pasada correctamente cuando la parte delantera de los esquí, denominada *espátula* y los dos pies del competidor han cruzado la línea de puerta (art., 661.4.1 del RIS, 1996, 2000). La línea de puerta es la línea recta imaginaria más corta que une los palos que forman una puerta de Slalom (art. 661.4.1.2. del RIS, 1996, 2000). En la Figura 2.3, podemos apreciar la línea de paso de tipo punteado.

### **2.3. La técnica del Slalom**

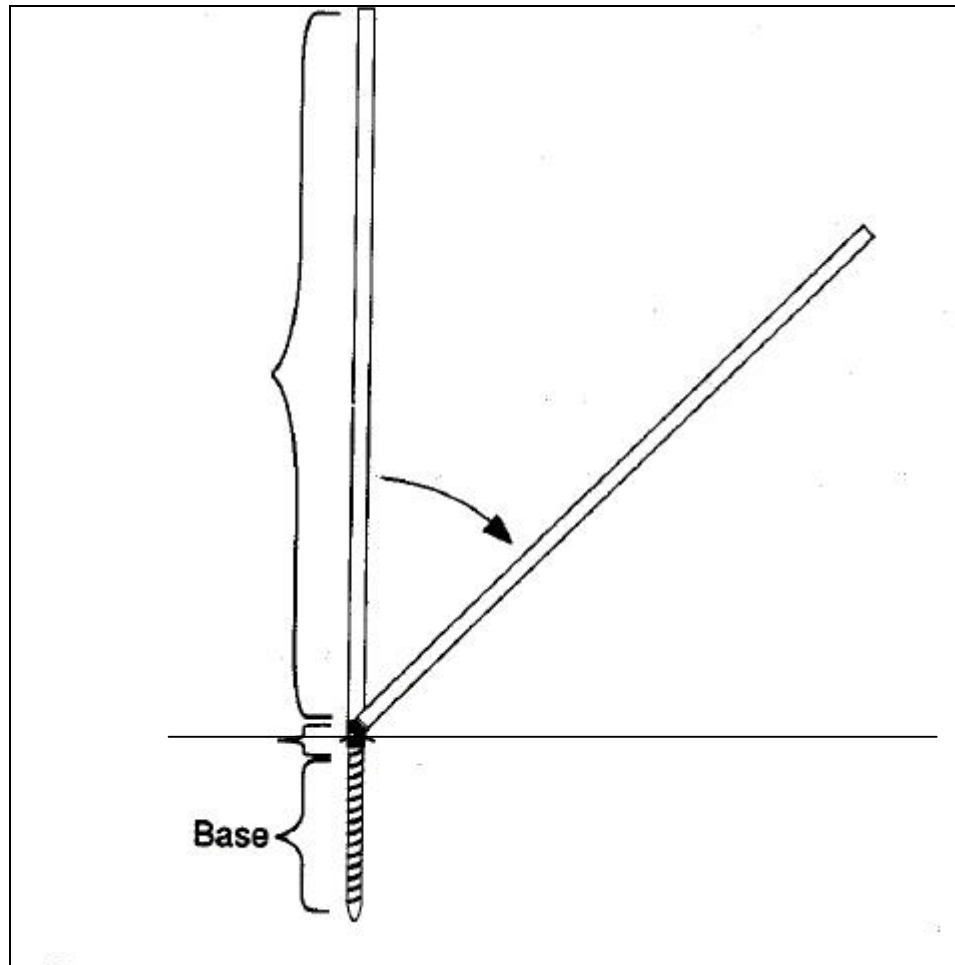
Antón et al (1989), y más tarde Chevalier y Schori (1995), coinciden en afirmar que la técnica deportiva es el procedimiento más racional de la práctica a través del cual se realiza una tarea motriz de la forma más apropiada y ergonómica posible. Además, establecen que la técnica de una disciplina deportiva corresponde a





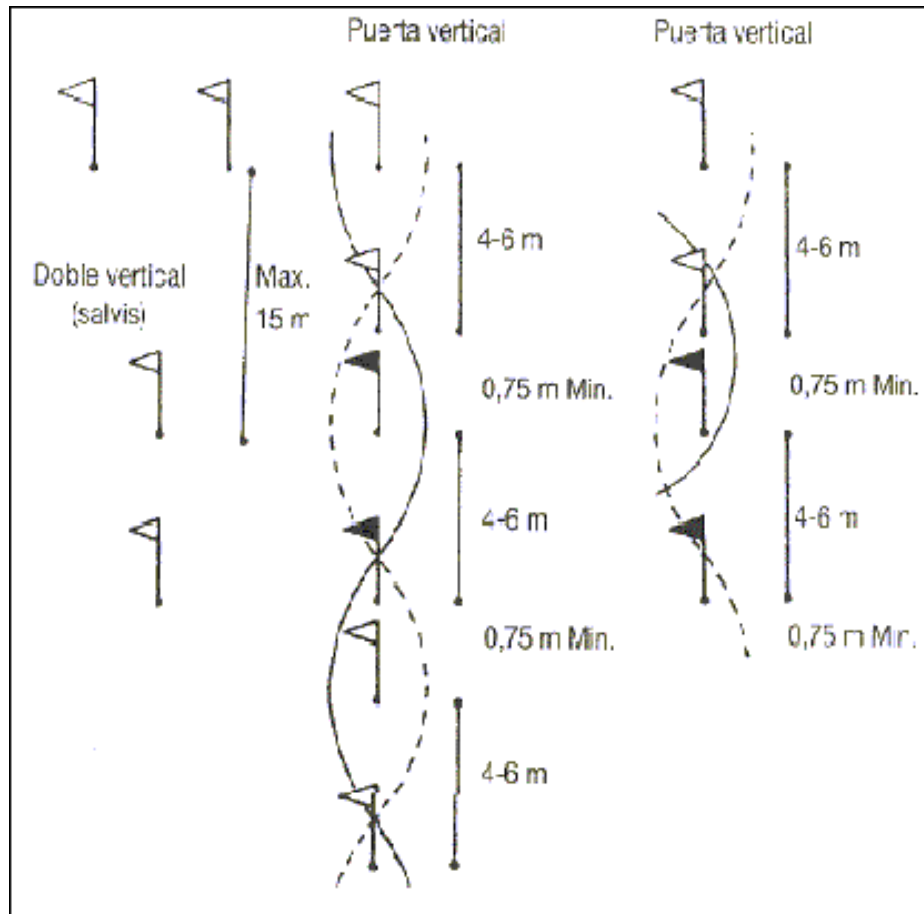
**Figura 2.3.** Palos que componen una puerta de Slalom. (RIS, 1996, 2000).

---



**Figura 2.2.** Palo articulado y flexible en su base. La base del palo debe estar bajo la superficie de la nieve.

---



**Figura 2.4.** Puertas, combinaciones de puertas, distancias entre puertas y anchura de puertas permitidas por el Reglamento de los concursos alpinos en Slalom (RIS, 1996, 2000)

un modelo motor individualizado ideal, susceptible de sufrir modificaciones en función de las exigencias y características individuales.

Rieder (1987), realiza las siguientes consideraciones a tener en cuenta en el estudio de la técnica: *a)* en primer lugar, apunta que la gama de técnicas deportivas dentro de una misma disciplina, aún en alto rendimiento, es muy amplia, sobre todo si se tienen en cuenta la gran variedad de técnicas individuales diferentes existentes a partir de un único patrón motriz; *b)* en segundo lugar, que una técnica individual poco estable, puede verse compensada por un alto nivel de condición física; y en tercer y último lugar, *c)* afirma que las técnicas individuales, incluso en alto rendimiento, no son estables, considerando que de cada diez intentos realizados, cinco difieren en su ejecución y afirma que parece imposible generar modelos de movimiento idénticos por una misma persona que desarrolla una misma tarea en varios intentos sucesivos.

Los estudios realizados por Mester (1997) acerca del tiempo de viraje y su relación con el tiempo total de la bajada así como las variaciones de velocidad encontradas en varias bajadas sobre un mismo trazado, con esquiadores de elite, pueden servirnos para justificar estas afirmaciones.

Pensamos que un análisis de la técnica de un viraje, con esquiadores de alto nivel como el que hemos realizado, tiene que tener en cuenta estos argumentos a la hora de plasmar los resultados. De ahí que el análisis de un mismo viraje en varios sujetos pueda ayudarnos para explicar cómo realizan determinados deportistas un viraje, cuáles pueden ser las diferencias de técnica individual entre ellos, qué criterios de eficacia mecánica han utilizado y cómo puede contribuir la técnica individual de cada sujeto en el rendimiento final.

Por otro lado, si el objetivo del entrenamiento de la técnica, es *la educación del comportamiento motor del deportista de acuerdo con las características objetivas y generales de la técnica deportiva, y teniendo en cuenta las particularidades de éste, para una realización eficaz del movimiento* (Grösser y Neumaier, 1986), podemos afirmar que la importancia de la técnica individual deportiva en el Slalom, reside en la realización eficaz del viraje.

En Slalom, se baja por un recorrido establecido en base a un reglamento, en el mínimo tiempo posible. Como en todos los deportes que luchan contra el tiempo, la técnica, junto con la táctica y la preparación física, juegan un papel importante en la obtención del máximo rendimiento deportivo. Una buena técnica individual contribuirá a la obtención de un buen rendimiento final. De ahí que sea importante comenzar estudiando la técnica empleada en el Slalom para posteriormente analizar el viraje.

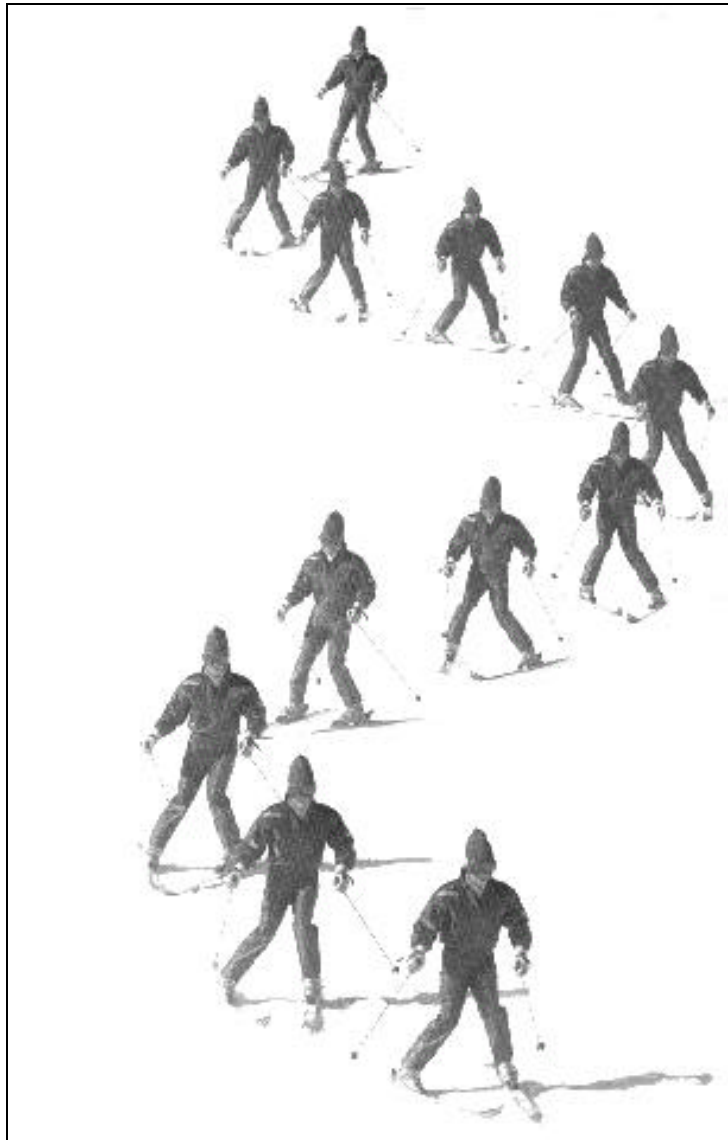
Krater y Marta (1992), afirman que el Slalom ha sido la disciplina del esquí alpino de competición que más ha visto modificada su técnica, gracias a la utilización de los palos articulados durante los últimos veinte años. Según la FIS (1991), esta modificación provocada por la utilización del palo articulado, pretende un aumento de la velocidad de bajada por el trazado, al ceñir la trayectoria de los esquís o *línea de bajada* más al palo interior o palo de viraje.

La evolución de la técnica del esquí alpino hacia formas competitivas tiene lugar en el primer cuarto de siglo. (Roldán, 1993; Krater y Marta, 1992; Fontana, 1982) que es cuando surgen las competiciones. La técnica que obtiene y obtenía el triunfo final es y ha sido la técnica a imitar. La competición en Slalom, surge como prueba popular y se convierte en olímpica a partir de 1924, año en el que se realizaron los primeros Juegos Olímpicos de Invierno, en Chamonix (Francia). Posteriormente en 1931, surgen los Campeonatos del Mundo de esquí alpino.

Hasta entonces, el esquí alpino ha ido evolucionando gracias a las aportaciones que tanto austriacos como franceses iban realizando a la técnica originada en Christianía, actual Oslo (Noruega), a mediados del S´ XVIII. Esta técnica, que podía utilizarse como medio para descender pendientes, es conocida como la *Técnica Christiania*. En la **Figura 2.5** podemos observar un cambio de dirección utilizando la técnica christiania.

Posteriormente, a finales del S´ XVIII, aparece un cambio de dirección consistente en mantener los esquís paralelos durante el encadenamiento de varias trayectorias curvas. Este cambio de dirección, que revolucionó la técnica, se denomina *viraje paralelo*, y es considerado por todos los autores consultados, entre los cuales destacamos, a Foster (1994, 1995), USSCA (1994), FIS (1991), Federación Española de Deportes de Invierno (FEDI)(1992), Arnaud, J.P. (1991), Asociación Suiza para el Esquí (1985), Bornat,P. (1991), D´Alessio, F. y Serafin, R. (1992), Díez, C. (1996), Federación Alemana para la enseñanza del esquí (1981), Gautier, G. (1991), como base de la técnica de competición actual. En la **Figura 2.6**, podemos observar un viraje paralelo. A partir de aquí, siempre que nos refiramos al viraje, estaremos hablando del viraje paralelo.

Básicamente, y siguiendo la opinión de Foster (1994), la descripción técnica del Slalom implica la realización de trayectorias del esquiador muy cercanas al palo de viraje, con una posición erguida, con el tronco orientado en todo momento hacia la pendiente, con los esquís separados a la anchura de las caderas y los brazos ligeramente adelantados y abiertos con los bastones en prolongación de los mismos. Esta posición de las extremidades superiores y de la parte superior del tronco pretende, compensar el movimiento del tren inferior.



**Figura 2.5.** Viraje en cuña utilizando la *Técnica Cristiana* (extraído de Foster, 1995).

---



**Figura 2.6.** *Viraje Paralelo* en el que se basa la técnica de competición analizada (extraído de Foster, 1995)

---



Gautier (1991), afirma que el esquiador tiene que dirigir los esquís hacia una trayectoria implantada y además, mantener el cuerpo en equilibrio durante todo el recorrido, lo que supone producir fuerzas y momentos de fuerzas que permiten al sistema mantener su sumatoria a cero.

Basándonos en esta descripción y en la de otros autores consultados en la bibliografía, podemos establecer los siguientes principios de la técnica del Slalom:

- a) El competidor en Slalom debe mantener en todo momento una posición equilibrada, centrada y alta (Gautier, 1991; Bornat, 1991; USSCA, 1994; FIS, 1991; Foster, 1994; Chevalier y Schori, 1995; la Federación alemana para la enseñanza del esquí, 1981; etc.).

En opinión de Jahn (1982), para que el esquiador mantenga una posición equilibrada, y pueda adaptarse continuamente a las irregularidades del terreno y a los cambios de velocidad, debe procurar mantener los esquís paralelos, aproximadamente a la anchura de las caderas, como podemos apreciar en la **Figura 2.7**. Estos autores afirman que, una mayor o menor separación de los esquís pueden acarrear problemas de equilibrio al tener que realizar más movimientos para la acción. Por otro lado, Fontana (1968) afirma que, aumentar o disminuir la separación entre los esquís esta directamente relacionado con la estabilidad y con las dimensiones de la base de sustentación o polígono regular que resulta de la proyección de los esquís sobre la nieve.

Para mantener una posición centrada, o estable según Roldán (1993), es necesario que la proyección del centro de gravedad (CG) se sitúe entre ambos esquís, sobre un punto intermedio entre la unión de los centros de presión (CP) de la planta de cada pie del esquiador situado en la base de sustentación del esquiador (Fontana, 1968). Gracias a la acción de las



**Figura 2.7.** Separación de los esquís a la anchura de caderas: Posición equilibrada en un viraje paralelo desde una visión frontal.

---

articulaciones de tobillo, rodillas, cadera, el esquiador puede adelantar, retrasar y desplazar lateralmente la proyección del CG, sobre los esquís por medio de los movimientos de extensión, flexión y rotación de las mismas. En la **Figura 2.8**, podemos apreciar esta característica del movimiento.

Por último, respecto a una posición más alta del corredor de Slalom con respecto a las de otras disciplinas, puede justificarse debido a que en esta disciplina, el esquiador lleva una trayectoria más directa y cercana al palo de viraje, ya que los palos de slalom pueden apartarse de la trayectoria del esquiador por medio de la acción de las extremidades superiores, como veremos posteriormente. En la **Figura 2.9**, podemos apreciar una posición medio-alta. Debido a que la distancia entre puertas oscila entre 0.75 y 15 metros, para mantener la velocidad de deslizamiento entre las puertas de slalom durante el trazado, es necesario no variar la posición del cuerpo realizando cualquier movimiento que comprometa la situación de equilibrio mencionada anteriormente o les haga perder un tiempo irrecuperable (FISI, 1991; Foster, 1995).

- b) El competidor en Slalom debe elegir la trayectoria hacia donde dirigir los esquís. (Gautier, 1991; Bornat, 1991).

En Slalom, como en el resto de disciplinas del esquí alpino de competición, la elección de trayectoria por parte del esquiador determina, en gran medida, el rendimiento en el cambio de dirección. (USSCA, 1994; Foster, 1995). Esta trayectoria teóricamente correcta, denominada como *línea ideal* en la terminología del esquí, podemos definirla como aquella trayectoria que permite al esquiador conservar la velocidad durante su bajada por el recorrido o incluso aumentarla sin que suponga alteraciones que perturben el estado de equilibrio



**Figura 2.8.** Proyección del CG sobre la base de sustentación: Posición centrada en un viraje paralelo desde una visión lateral.

---



**Figura 2.9.** Posición alta del esquiador acercándose al palo de viraje, vista desde una visión lateral.

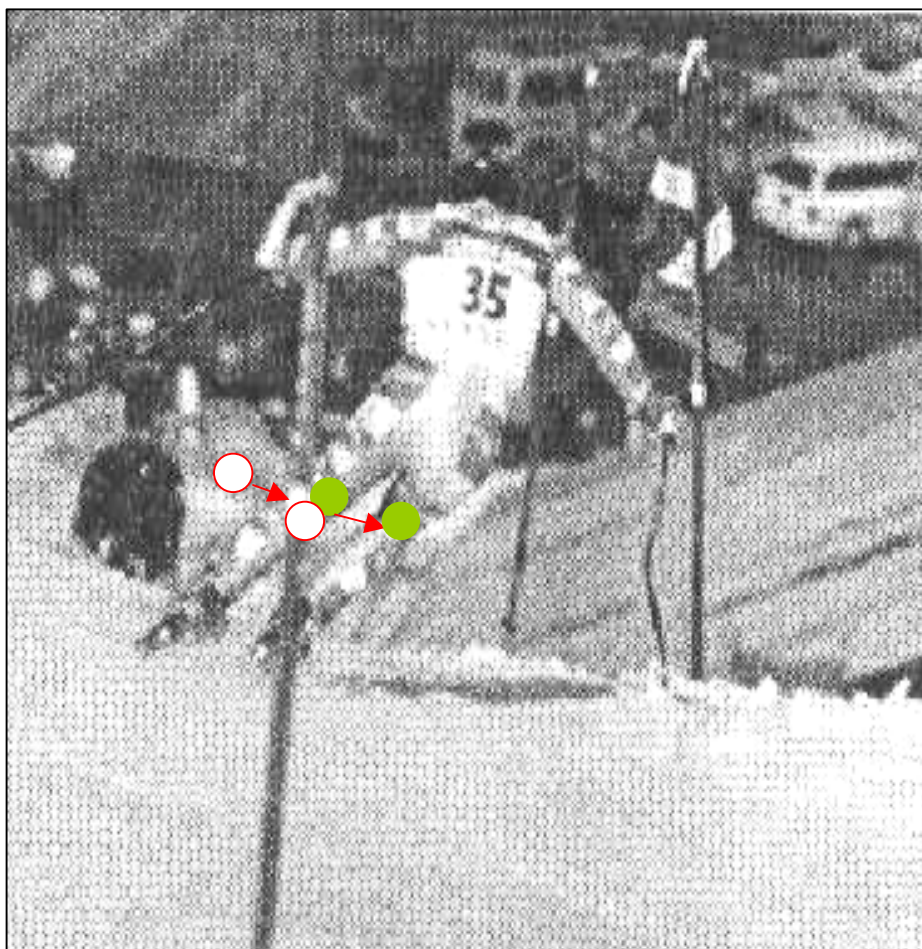
---

relativo del corredor. En opinión de Nachbauer (1987), aunque la importancia de la trayectoria correcta para el resultado de una competición es indiscutible, existen pocas investigaciones que estén relacionadas con la búsqueda de la línea ideal, situación que estudiaremos más tarde.

- c) El competidor en Slalom debe dominar la conducción del viraje (Federación alemana para la enseñanza del esquí, 1981; Gautier, 1991; Bornat, 1991; FIS, 1991; USSCA, 1994; Foster, 1995; Chevalier y Schori, 1995).

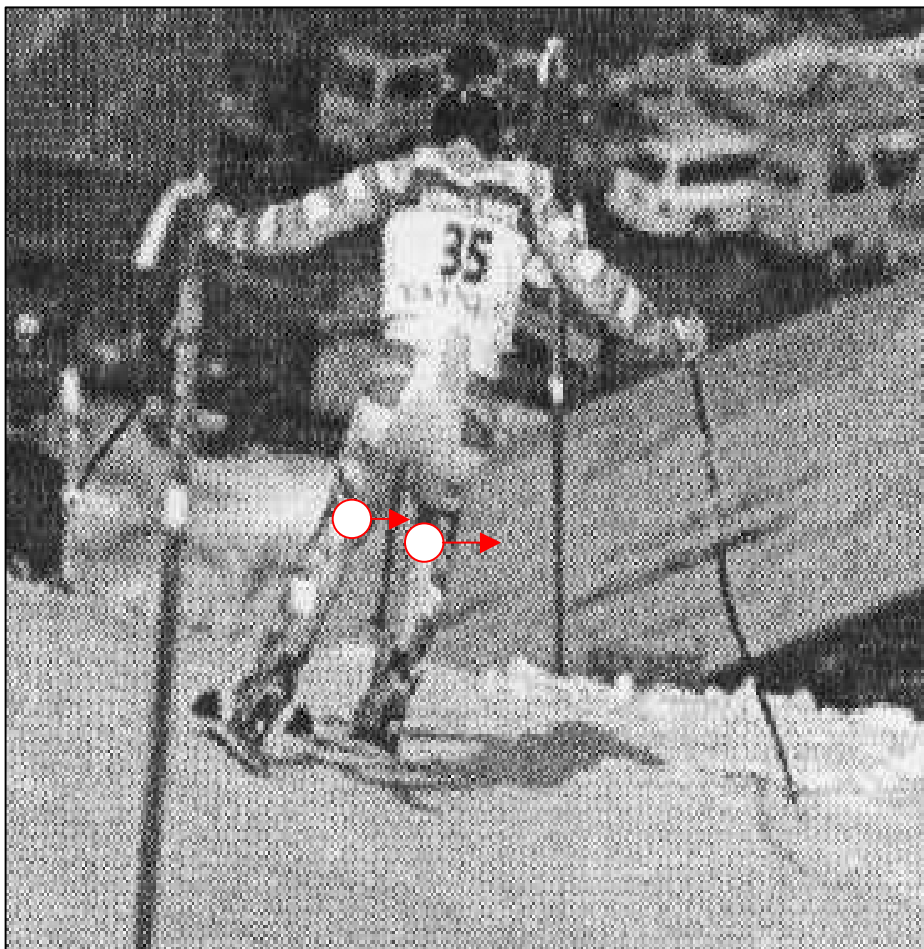
Es decir, dirigir los esquís hacia donde se quiere. En opinión de la USSCA (1994), las acciones de dirección y gobierno de los virajes se realizan gracias a la participación de las rodillas del esquiador. Según esto, podemos interpretar que las rodillas son las encargadas de dirigir los esquís hacia la trayectoria elegida como podemos ver en las **Figuras 2.10.a.** y **2.10.b.**, en un momento dado del viraje, y afirmar que la eficacia de un cambio de dirección en Slalom va depender enormemente de ésta acción.

Otro aspecto relacionado con los movimientos de conducción o dirección de los esquís, tiene que ver con los movimientos de toma de cantos que, en la terminología del esquí, se conoce como *cantear*. Para Roldán (1993), es sinónimo de conducción de los esquís, y ocurre cuando los esquís contactan con la nieve sobre los *cantos* o extremos metálicos existentes a ambos lados de las *suelas* de los esquís o superficies inferiores de deslizamiento en contacto con la nieve. Siguiendo a este autor, los esquís estarán canteados siempre que el eje transversal del esquí no esté paralelo al plano del terreno. La acción de cantear o *canteo* se puede producir bien por inclinación del esquiador hacia el interior de una curva, o bien por inclinación lateral de las rodillas o *angulación*. En las Figuras 2.10.a. y 2.10.b, podemos ver una angulación de rodillas para conducir y dirigir un viraje de Slalom. En la **Figura 2.11**, observamos el apoyo sobre los



**Figura 2.10.b.** Inclinación lateral de las rodillas hacia el interior de la curva y conducción en un viraje de Slalom ( adaptada de Chevalier y Schori, 1995).

---



**Figura 2.10.a.** Inclínación lateral de las rodillas para dirigir los esquís hacia la trayectoria deseada y conducción en un viraje de Slalom (adaptada de Chevalier y Schori, 1995).

---





**Figura 2.11.** Apoyo sobre cantos internos debido a la inclinación lateral de rodillas o angulación.

---

cantos interiores de los esquís en un viraje paralelo gracias a la angulación de las rodillas.

Podemos decir que la conducción del viraje está íntimamente relacionado con el canteo de los esquís y las acciones de dirección de los esquís. Desde el punto de vista biomecánico, un mayor canteo provoca mayor rozamiento o una mayor resistencia al deslizamiento lateral del esquí.

Creemos, que para conducir un viraje, es necesario: por un lado, dirigir los esquís hacia la trayectoria deseada; y por otro, que la conducción del viraje debe realizarse utilizando los cantos de los esquís. Y todo ello, gracias a la participación de las rodillas del esquiador: a) mediante los desplazamientos laterales de las rodillas en la dirección deseada, para inclinar al esquiador hacia el interior de la siguiente curva, según los americanos (USSCA, 1994; Foster, 1995); y b) las combinaciones de movimientos de extensión y flexión de piernas, para transferir el peso y realizar el cambio de cantos de un esquí a otro, según Chevalier y Schori, (1995) y Müller (1994).

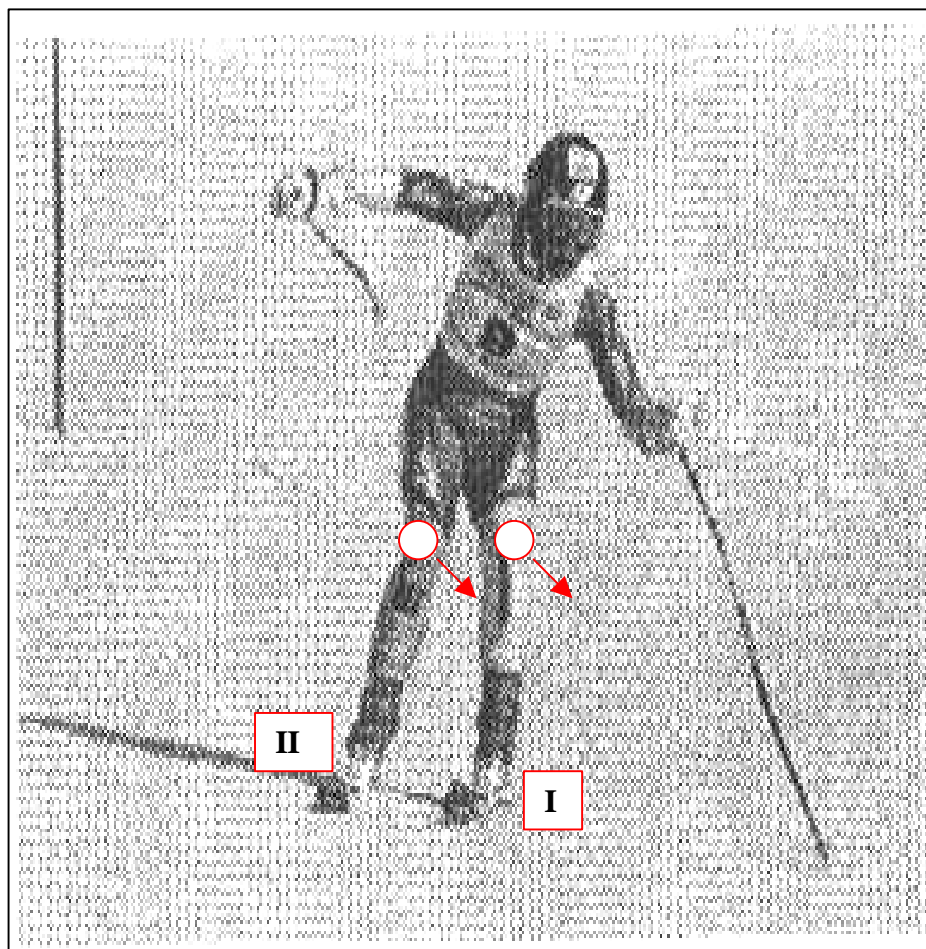
Chevalier y Schori (1995), denominan a estas combinaciones de movimientos *extensión-básculo-rotación* y *flexión-pivotación* y/o *pivotamento sobre los cantos*, respectivamente.

La extensión-básculo-rotación o el encadenamiento de virajes por extensión-flexión, es una combinación de movimientos para encadenar virajes, donde el esquiador transfiere el peso y cambia de cantos, de un esquí a otro, mediante una extensión de las rodillas, para orientar los esquís hacia la trayectoria deseada por medio de un desplazamiento lateral de rodillas hacia el interior de la siguiente curva. La flexión-pivotación o el encadenamiento de virajes por flexión-extensión de piernas, es una acción de movimientos,

en la que realiza la transferencia del peso y el cambio de cantos, de un esquí a otro, gracias a un movimiento de flexión de rodillas, junto con un desplazamiento lateral de las rodillas hacia el interior de la nueva curva. En las **Figuras 2.12** y **2.13**, podemos observar ambas combinaciones. La utilización de una combinación u otra depende de la pendiente, del tipo de trazado (abierto o cerrado, es decir, menos curva o más curva), la separación entre puertas y la inclinación de la pendiente.

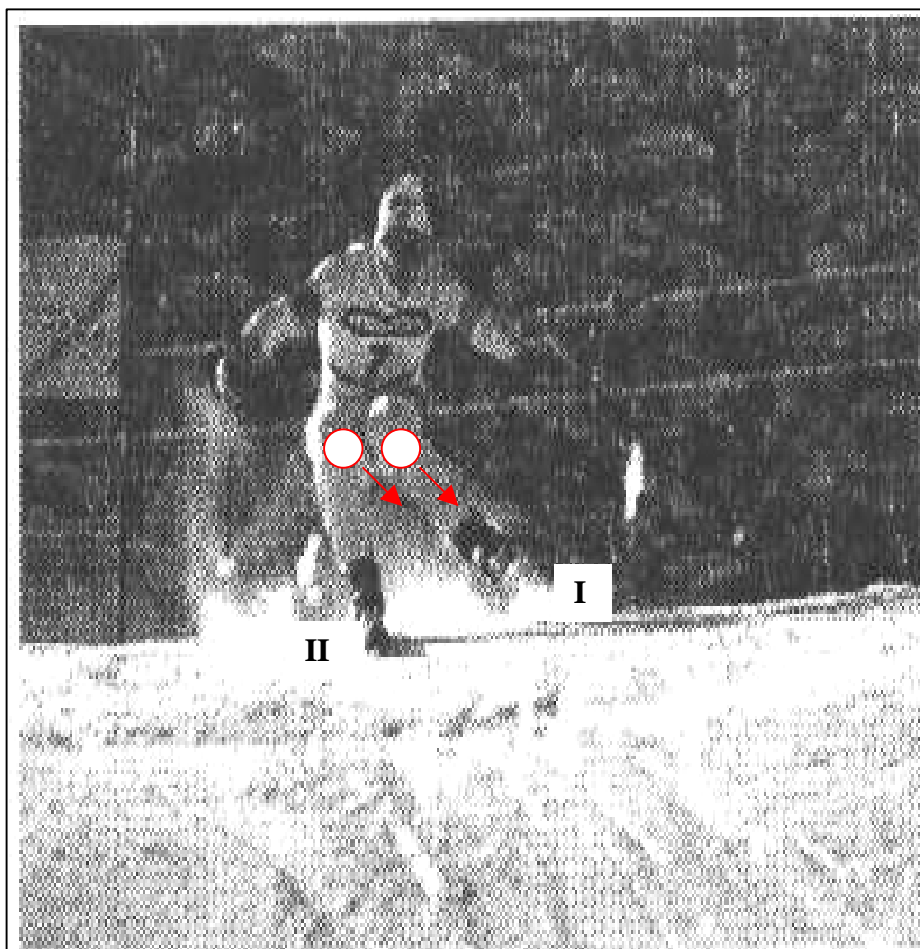
- d) El competidor en Slalom no debe alterar su posición al apartar los palos que encuentra en su recorrido por el trazado, ni mucho menos la ejecución de la trayectoria teóricamente ideal de los virajes (USSCA, 1994; Foster, 1995; FIS, 1991). Como consecuencia de llevar una trayectoria cercana al palo de viraje, el corredor aparta el palo de su camino utilizando alguna de las acciones técnicas que a continuación exponemos. La utilización de estas acciones en un momento determinado van a depender de la velocidad de paso entre las puertas, de las combinaciones o figuras, y de la parte del trazado donde se encuentre (FIS, 1991)

Una de las acciones técnicas que el esquiador utiliza para apartar el palo o *abatirlo* se basa en la acción del brazo más cercano al palo de viraje o *brazo interno*. Desde el punto de vista metodológico, antes de aprender a apartar el palo, se debe de aprender a esquiar entre los palos, sin que esto modifique la posición del esquiador. Por este motivo, el corredor experimentado aparta el palo con el brazo interno en situaciones del trazado de máxima velocidad, que el corredor puede encontrar al final de una pendiente, como consecuencia de un cambio de terreno, como sucede en las combinaciones de puertas que hemos presentado anteriormente (ver Figura 2.5).



**Figura 2.12.** Movimiento de extensión-basculo-rotación en un viraje. (adaptada de Chevalier y Schori, 1995). El esquiador extiende sus piernas al final de un viraje para *bascular* sobre los esquís planos, transferir el peso del esquí exterior del viraje anterior (**I**) al nuevo (**II**), cambiar de cantos y comenzar a inclinar lateralmente las rodillas y dirigir los esquís hacia el interior de la siguiente curva.

---



**Figura 2.13.** Movimiento de flexión-pivotación en un viraje. (adaptada de Chevalier y Schori, 1995). El esquiador flexiona sus piernas al final de un viraje para *pivotar* sobre los esquí planos, transferir el peso del esquí exterior del viraje anterior (I) al nuevo (II), cambiar de cantos y comenzar a inclinar lateralmente las rodillas y dirigir los esquíes hacia el interior de la siguiente curva.

---

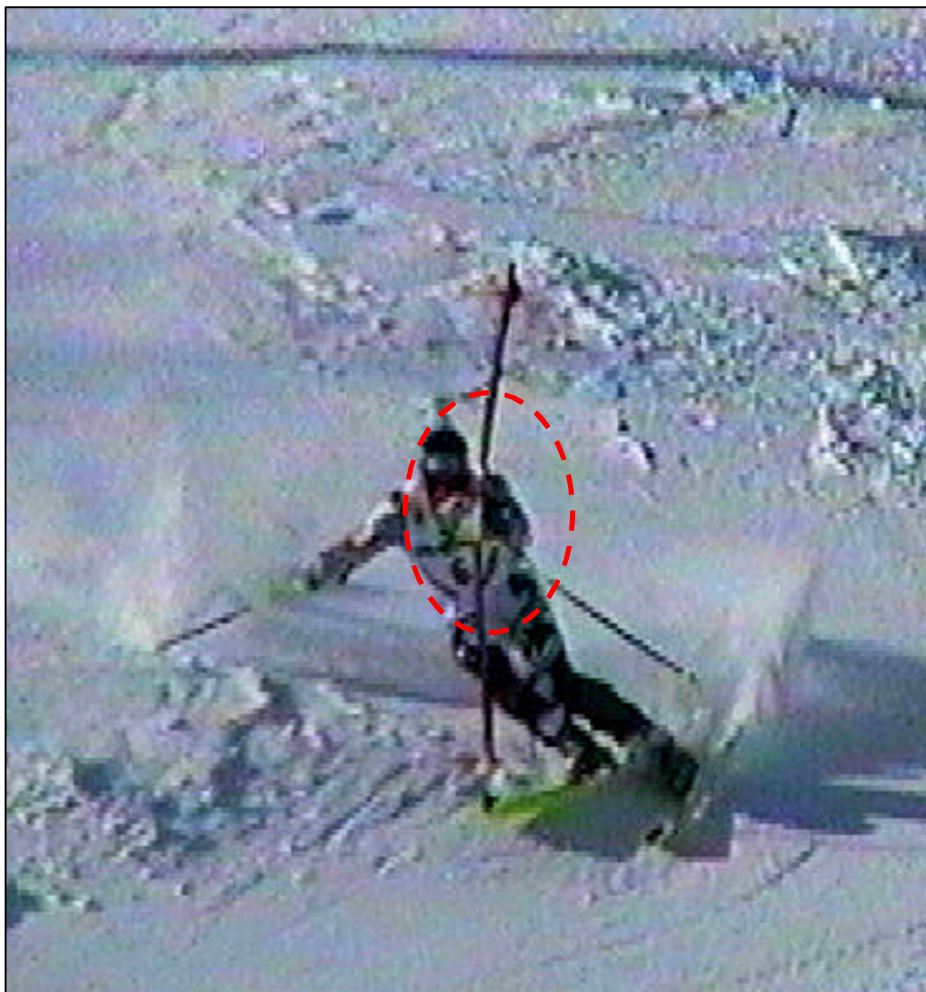
Para ello, el esquiador, cruza ligeramente el antebrazo por delante del cuerpo sin afectar a la parte superior del cuerpo, para contactar con el palo en un punto alto, ya que al ser flexibles en su base, se apartará fácilmente hacia donde no interfiera la trayectoria (Foster, 1995), gracias a que el momento de fuerza es mayor cuando la fuerza es aplicada en la parte alta del palo. El cuerpo en todo momento debe permanecer orientado hacia la pendiente.

Otra de las acciones técnicas, que a su vez es la más frecuente, la realiza con el brazo más alejado al palo de viraje o *brazo externo* (FISI, 1991). Se utiliza en aquellas situaciones del trazado donde la trayectoria curva es mayor, como sucede en una pendiente donde las puertas están muy cruzadas. En la **Figura 2.14**, podemos observar como uno de los sujetos analizados, utiliza el brazo interno para apartar el palo de su trayectoria en una visión frontal. En la **Figura 2.15**, el palo es apartado por la mano y/o antebrazo, del brazo externo, cruzándolo ligeramente por delante del pecho del esquiador.

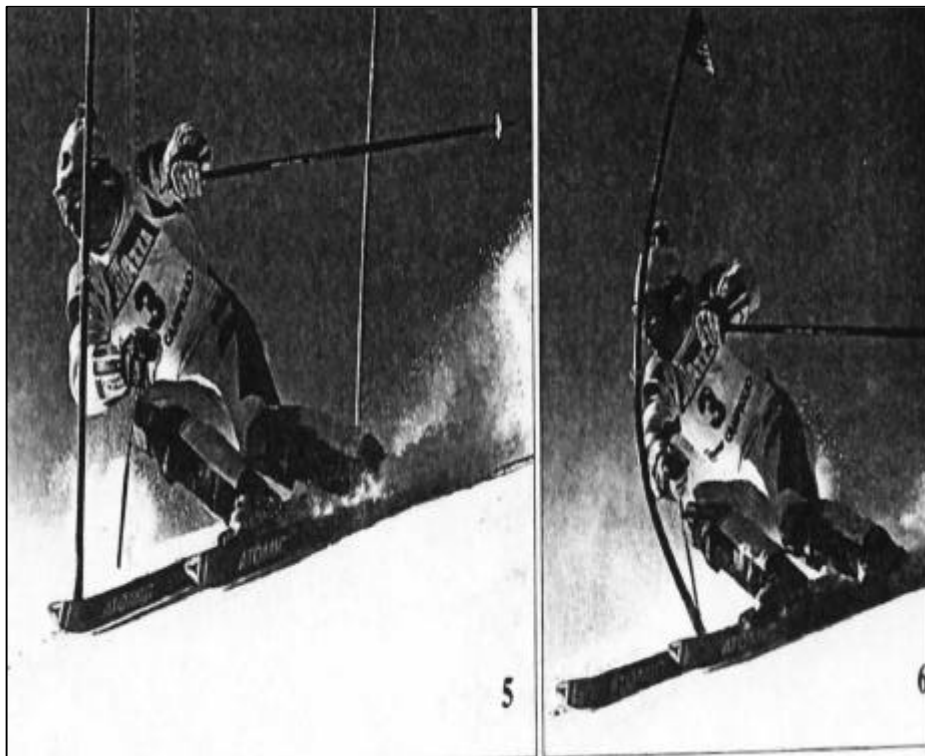
El corredor puede apartar el palo con sus piernas cuando está utilizando sus brazos para recuperar la posición alta con ayuda del apoyo de los bastones (Foster, 1995), como podemos ver en la **Figura 2.16**.

- e) El competidor en Slalom, al cambiar la trayectoria de los esquís, debe emplear el menor tiempo posible (Chevalier y Schori, 1995; Wedan, 1996; Díez, 1996; Müller, 1994).

Para conservar la velocidad, el cambio de trayectoria de los esquís debe de realizarse lo más rápido posible. Creemos que el emplear demasiado tiempo



**Figura 2.15.** Abatimiento del palo con el brazo exterior en un viraje de Slalom.



**Figura 2.14.** Abatimiento del palo con el brazo interior en un viraje de Slalom (fotos extraídas de la revista *Sciare*, 1989).





**Figura 2.16.** Abatimiento del palo con las extremidades inferiores (adaptado de Kratter y Marta, 1992).

---

en el cambio de trayectoria de los esquís puede frenar, retrasar la posición del esquiador, hacer perder la línea ideal, y aumentar el tiempo empleado en el recorrido. Este momento permite al esquiador transferir el peso de un esquí a otro (del esquí exterior del anterior viraje, al que se va a convertir en exterior en un nuevo viraje), para desencadenar el nuevo cambio de dirección, originado gracias a los movimientos de las rodillas descritos anteriormente; el cambio de cantos (relacionado con la acción de cantar, desde los cantos internos del esquí exterior del anterior viraje, a los cantos internos del nuevo esquí exterior en el siguiente viraje); y, dirigir los esquís hacia la nueva trayectoria a tomar.

- f) El competidor en Slalom, utiliza el bastón, en determinadas partes del trazado, para indicar el inicio de un nuevo cambio de dirección y para corregir una posición del esquiador (atrasada, desequilibrada y/o baja ya sea por pérdida del ritmo, pérdida de la trayectoria ideal, etc., en cuyo caso puede emplear ambos bastones). En la **Figura 2.17**, podemos observar como el esquiador clava el bastón para iniciar un nuevo viraje.

Además, puede emplearse para bloquear la rotación de la parte superior del cuerpo sobre su eje sagital, y transferir el momento angular del tronco a las extremidades inferiores (Müller, 1994), así como para buscar el ritmo de movimientos al bajar entre los palos (Foster, 1995). En aquellas partes del trazado donde la velocidad de paso es elevada, no se utilizan los bastones, con el propósito de no distorsionar la posición del corredor en su bajada entre los palos (FISI, 1991) y centrarse en la aplicación de la fuerza necesaria para producir el impulso que le permita cambiar su dirección



**Figura 2.17.** Apoyo del bastón izquierdo para iniciar el siguiente viraje, visto desde una visión frontal.

---

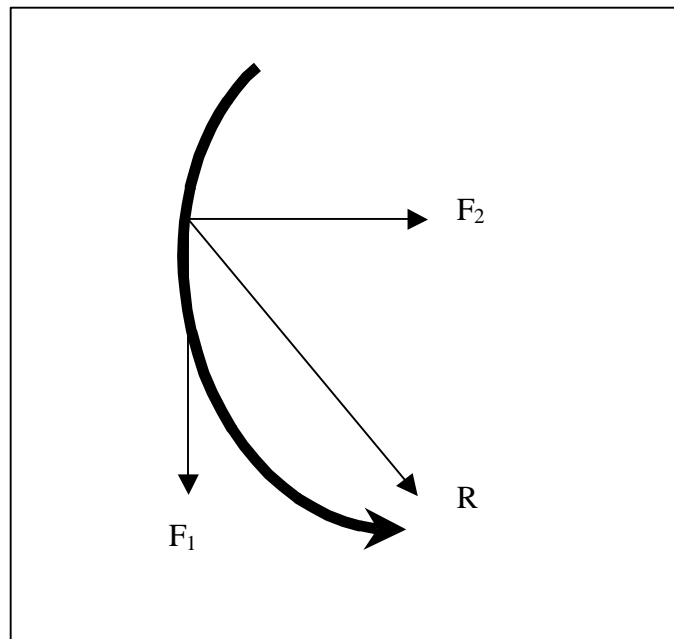
#### 2.4. Estudio y análisis del viraje en el Slalom

Fontana (1968) y Roldán (1993), definen el viraje como un cambio de dirección de la trayectoria rectilínea del esquiador a una trayectoria curvilínea, en el que los esquís se deslizan lateralmente sobre los cantos internos, describiendo una línea curva continua sobre la nieve.

En un primer análisis a esta definición, mencionamos un cambio de trayectoria rectilínea a curvilínea. Gutiérrez (1998), afirma que el desplazamiento circular de un cuerpo es posible gracias a la existencia de dos fuerzas, cada una de las cuales genera distintas aceleraciones. La justificación de esta afirmación podemos encontrarla en la primera ley de Newton. Según ésta, todo cuerpo al que se le aplica una fuerza ( $F_1$ ) tenderá a generar siempre un desplazamiento rectilíneo, a no ser que se genere una segunda fuerza, perpendicular a la dirección del movimiento previo ( $F_2$ ). El resultado final de combinar ambas fuerzas ( $R$ ), es lo que permite a un cuerpo realizar un desplazamiento de forma circular, como podemos ver en la **Figura 2. 18**.

En segundo lugar, mencionan que los esquís cambian de trayectoria rectilínea a curvilínea deslizándose sobre los cantos interiores. Los cantos son los extremos metálicos de la superficie de deslizamiento o suela del esquí. Cada esquí tiene dos cantos: uno interior, y otro exterior. Según Gutiérrez (1998), cuando un cuerpo se mueve a lo largo de una superficie que está en contacto con él, aparecerán unas fuerzas de rozamiento (fuerzas de rozamiento cinético) que se opondrán al deslizamiento de un cuerpo a través de una superficie.

Cuando el esquiador está bajando una pendiente, deslizándose sobre la nieve con los esquís paralelos y planos en dirección a la línea de la pendiente o al valle, la fuerza horizontal ( $P_1$ ) genera una fuerza horizontal opuesta al



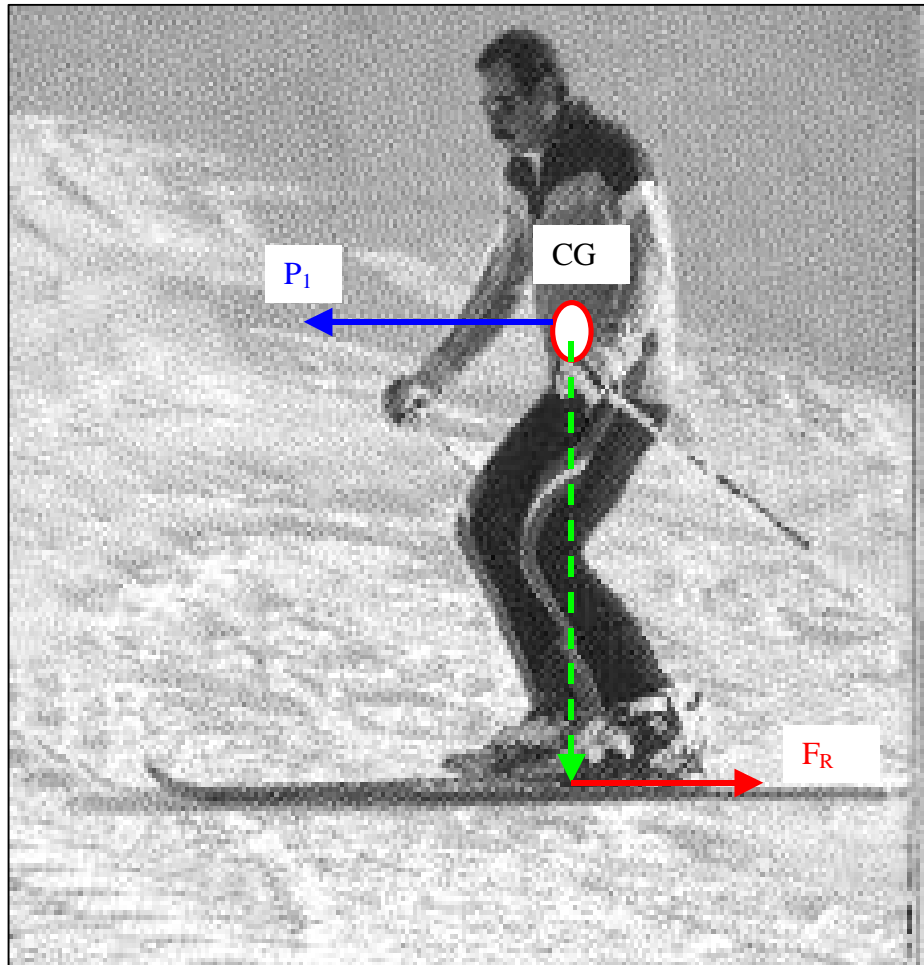
**Figura 2.18.** Fuerzas que originan un desplazamiento circular.

desplazamiento que se denomina fuerza de rozamiento cinético ( $F_R$ ), como podemos apreciar en la **Figura 2.19**. El esquiador podría seguir deslizándose sobre la nieve en línea recta, una vez finalizada la pendiente, hasta que llega un momento en que se detendría. En este caso la fuerza de rozamiento cinético sería mayor o igual a la fuerza horizontal.

En la **Figura 2.20**, se presentan las fuerzas que actúan sobre un esquiador que se desplaza a una cierta velocidad por una pendiente. Para su diagrama de fuerzas consideramos como sistema el esquiador más el equipamiento necesario para esquiar. Observamos que aparece la fuerza de la gravedad ( $P$ ), que puede descomponerse en sus dos componentes a lo largo de los ejes  $X_1$  y  $X_2$ , siendo  $P_1$  la fuerza que produce el desplazamiento en el eje  $X_1$  y  $P_2$ , perpendicular al plano de inclinación en el eje  $X_2$ . La resultante de las fuerzas normales externas ejercidas por el suelo es  $F_N$ . La fuerza resultante de la resistencia aerodinámica que se oponen al desplazamiento es  $F_A$  y la fuerza resultante producida por el deslizamiento es  $F_R$ .

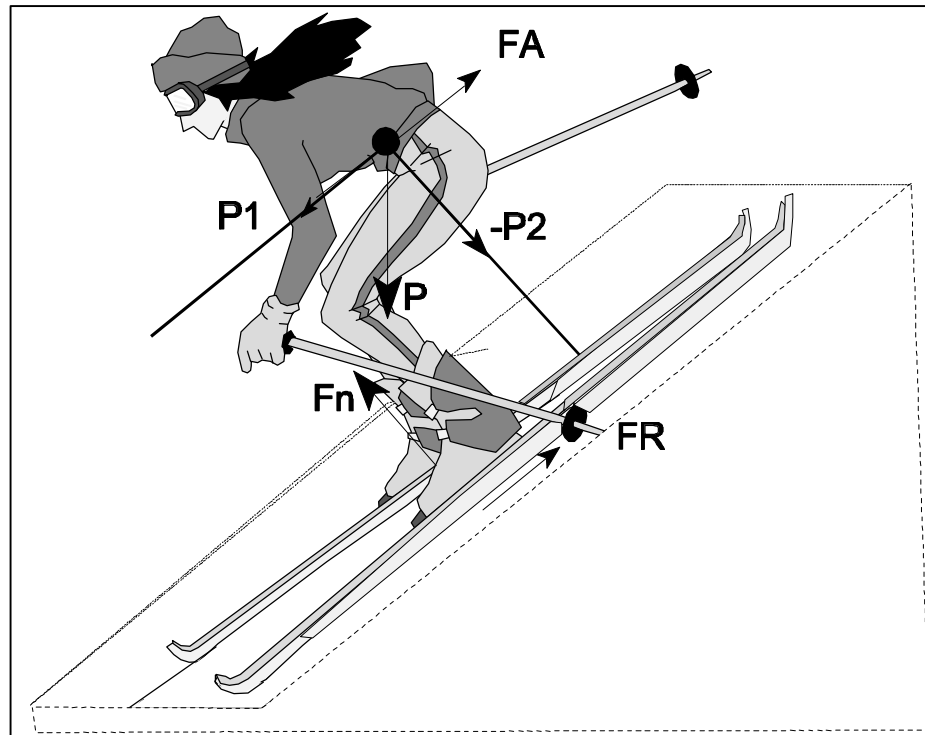
Cuando el esquiador pretende ir en una dirección perpendicular a la línea de la pendiente o valle, necesitará aumentar la fuerza de rozamiento cinético ( $F_R$ ) sobre los esquís, para conservar la dirección del movimiento. Para ello, inclina sus rodillas hacia el interior de la curva y aumenta la presión sobre los cantos interiores de los esquís. Si mantiene los esquís planos y no los apoya sobre los cantos interiores, la acción de la gravedad ( $P$ ) y su fuerza normal ( $F_N$ ), harían que el esquiador se deslizara lateralmente hacia el valle (dirección de la pendiente).

Del mismo modo, cuando realiza una trayectoria curva, el esquiador compensa las fuerzas internas y externas que actúan sobre él, para controlar la dirección y mantener el equilibrio dinámico en toda la curva. Por este motivo, el



**Figura 2.19.** Fuerzas horizontales que generan y se oponen al desplazamiento rectilíneo del esquiador sobre la nieve (adaptada de Roldán, 1993).

---



- P1.** Componente horizontal del peso del esquiador, en la dirección de deslizamiento.
- P2.** Componente vertical del peso del esquiador.
- P.** Peso del esquiador.
- F<sub>n</sub>.** Fuerza Normal.
- FR.** Fuerza de resistencia al deslizamiento.
- FA.** Fuerza de resistencia aerodinámica.

**Figura 2.20.** Fuerzas que actúan sobre un esquiador que se desplaza a una cierta velocidad por una pendiente (Gutiérrez, 1998).

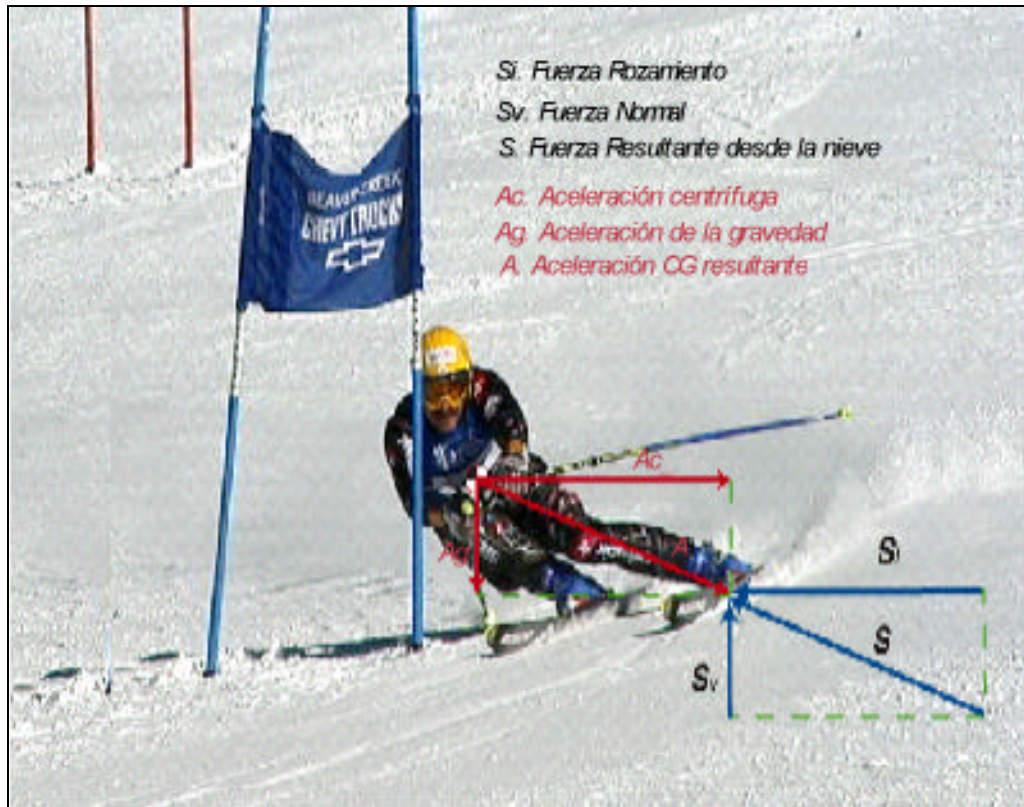


esquiador realiza la trayectoria curva apoyado sobre los cantos interiores, inclinando sus rodillas hacia el interior. En la **Figura 2.21**, observamos las algunas fuerzas que intervienen en un viraje paralelo y cómo el esquiador, aumentando el ángulo de canteo y la inclinación de las rodillas hacia el interior de la curva, consigue compensar la acción de las fuerzas externas que actúan sobre él al final del viraje.

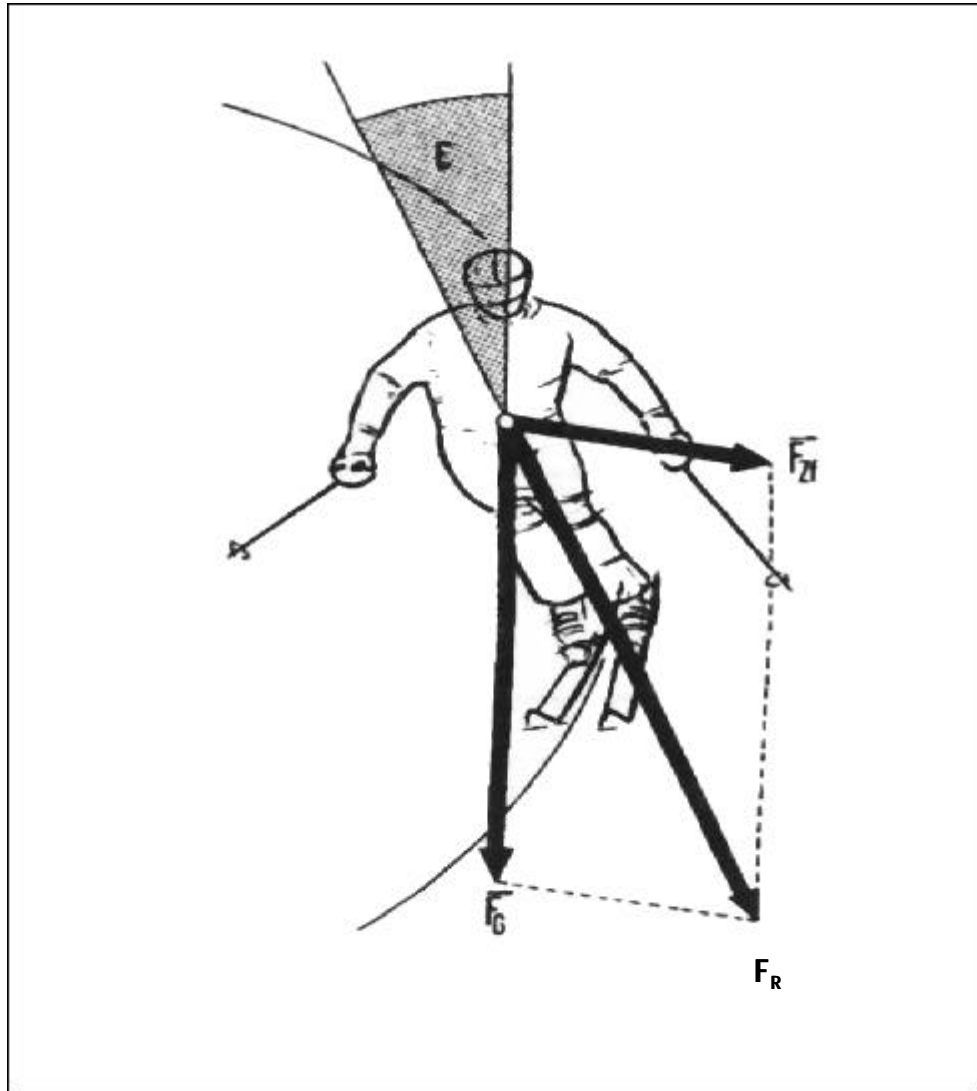
Según Chevalier y Schori (1995), el ángulo de la posición adoptada por el esquiador en un viraje ( $\delta$ ) depende, no sólo de la masa del esquiador, sino también de la velocidad, del radio de viraje, de la inclinación de la pendiente y del ángulo de la trayectoria. En la **Figura 2.22**, podemos observar la posición en equilibrio del esquiador en un viraje, tendente a inclinarse hacia el interior.

En cuanto a la distribución de la presión y la combinación de movimientos de extensión y flexión de las piernas del esquiador necesaria para el encadenamiento de virajes, Müller (1994), realizando un análisis biomecánico de diferentes tipos de virajes, observó la existencia de variación de la presión ejercida sobre la superficie al inicio de cada viraje. Según él, al inicio de cada viraje existe una disminución de la presión, seguida de un cambio de cantos (interiores del viraje anterior a interiores del nuevo viraje), la orientación de los esquís hacia la dirección deseada y un aumento final de la presión ejercida sobre la nieve.

De lo expuesto deducimos, que el esquiador, para encadenar virajes, aprovecha la disminución de la presión para cambiar de dirección. El esquiador para iniciar un cambio de dirección, consigue disminuir la presión ejercida sobre la nieve mediante movimientos de extensión y flexión de las caderas, rodillas y tobillos, aspecto en el que coinciden autores como Müller (1994), Roldán (1993), Fontana (1986), Foster (1995), FIS (1991). Así, cuando un esquiador



**Figura 2.21.** Fuerzas que intervienen en la realización de un viraje, provocada al apoyar los esquís sobre los cantos. Cuanto mayor es la inclinación del sistema al final de a curva, mayor  $A_c$  y  $S_i$ .

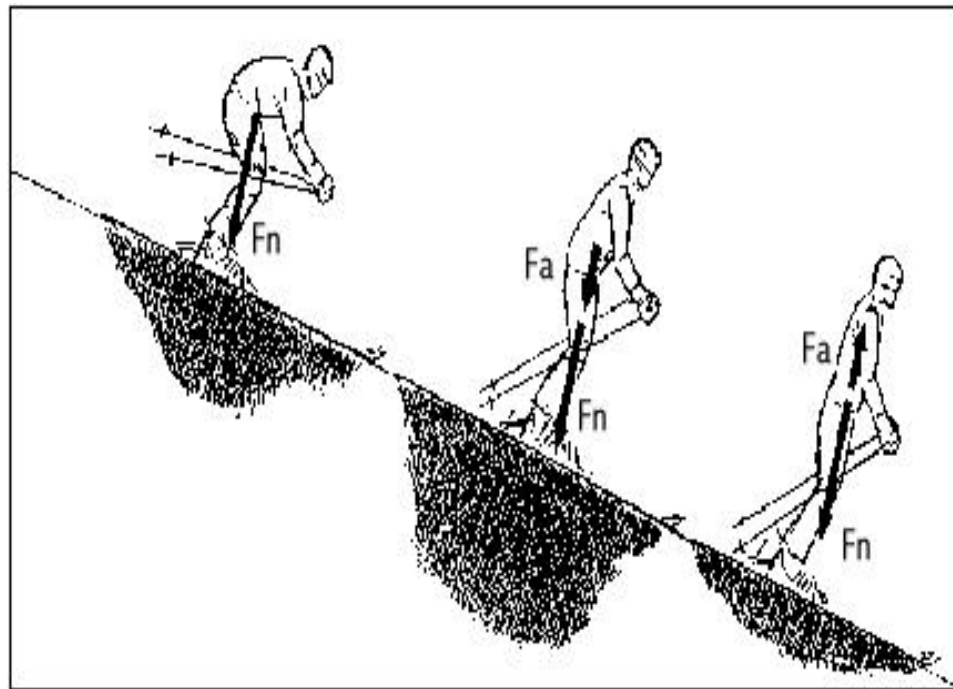


**Figura 2.22.** Posición en equilibrio del esquiador, ángulo de inclinación hacia el interior de la curva y resultante de las fuerzas que aplica el esquiador sobre los esquís, donde  $F_G$ . Fuerza gravedad,  $F_{zf}$ . Fuerza centrífuga,  $F_R$ . Fuerza resultante y  $d$ . Angulo inclinación. (adaptada de Chevalier y Schori, 1995).

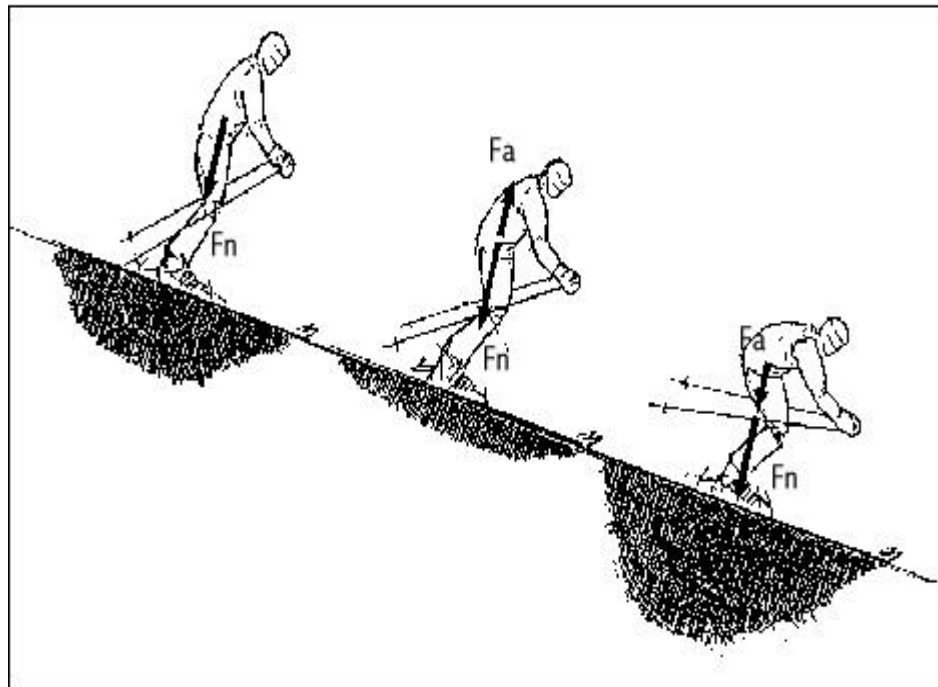
finaliza una extensión de las piernas, consigue obtener una disminución de la presión ejercida sobre la nieve, como podemos observar en la **Figura 2.23**. En un principio, y gracias a la aceleración ascendente del centro de gravedad del esquiador, aumentará la presión ejercida sobre la superficie, al originar una fuerza externa que aumenta la fuerza normal ( $F_N$ ). Pero al final del movimiento de extensión, el esquiador se ve obligado a frenar la aceleración del centro de gravedad del esquiador (si no despegaría del suelo), produciendo una aceleración descendente, que origina una fuerza externa ( $F_A$ ) en dirección del movimiento, que contrarresta la fuerza normal del esquiador, y reduce la presión que ejerce contra la nieve.

Cuando un esquiador realiza una flexión de las piernas, también puede conseguir una disminución de la presión sobre la superficie, tal y como podemos apreciar en la **Figura 2.24**. Al inicio, se produce una disminución de la presión ejercida sobre la nieve como consecuencia de la aceleración descendente del centro de gravedad del esquiador. Esto origina una fuerza externa, contraria al movimiento del esquiador ( $F_A$ ), que contrarresta la fuerza normal del deportista ( $F_N$ ). Seguidamente, el esquiador frena el movimiento de flexión, produciendo una aceleración ascendente del centro de gravedad que va a originar una fuerza externa al sistema en la dirección del movimiento, que aumentará la fuerza normal.

Cuando hablamos de encadenamiento de virajes, hemos de suponer que se alternan movimientos de extensión y/o flexión, para iniciar cada nuevo viraje. Si anteriormente hemos mencionado que tras la disminución de la presión ejercida sobre la nieve, el esquiador cambia de cantos, orienta los esquís hacia la nueva dirección y, finalmente aumenta la presión sobre los mismos, el esquiador tendrá que volver a su posición inicial para iniciar un nuevo viraje: bien por extensión, o por flexión. Este aumento final de la presión ejercida y de la fuerza



**Figura 2.23.** Disminución de la presión ejercida sobre la superficie al final de un movimiento de extensión de las piernas atendiendo a las fuerzas compresivas (adaptada de Müller, 1994), donde  $F_n$  es la fuerza normal y  $F_a$  es la fuerza que provoca la aceleración del CG.

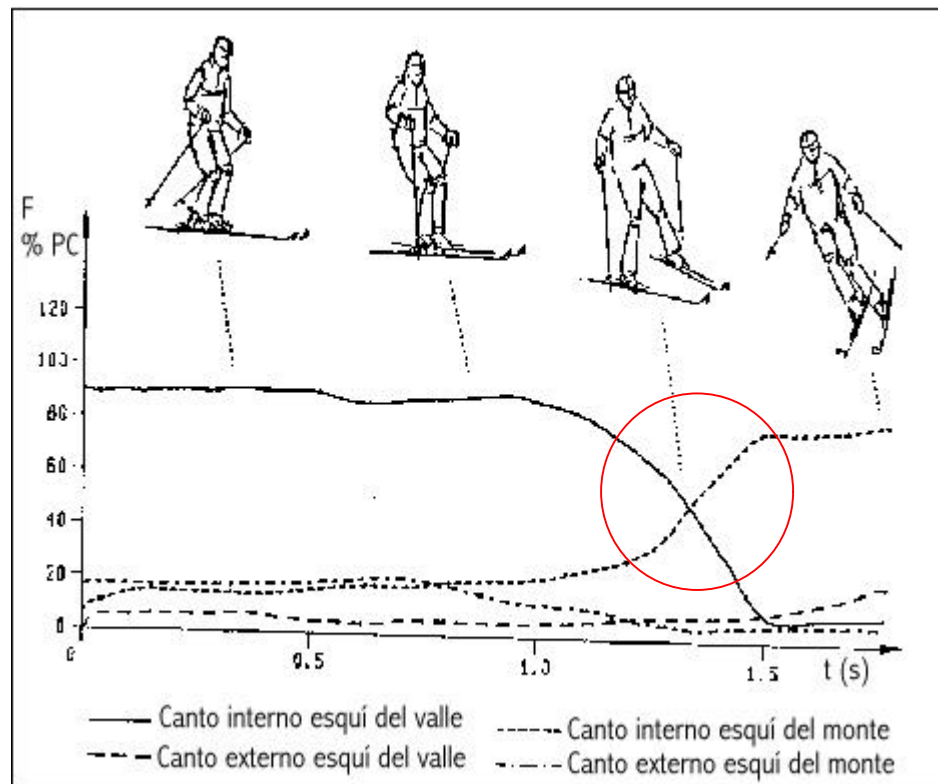


**Figura 2.24.** Disminución de la presión ejercida sobre la superficie al inicio de un movimiento de flexión de piernas atendiendo a las fuerzas compresivas (adaptada de Müller, 1994), donde  $F_n$  es la fuerza normal y  $F_a$  es la fuerza que provoca la aceleración del CG.

normal, le sirve para mantener la posición en equilibrio y compensar la acción de las fuerzas externas al sistema que le expulsarían hacia el exterior de la curva. Al mismo tiempo, le sirve para mantener la trayectoria curva apoyado sobre los cantos interiores de los esquís, que ofrecen resistencia al deslizamiento lateral.

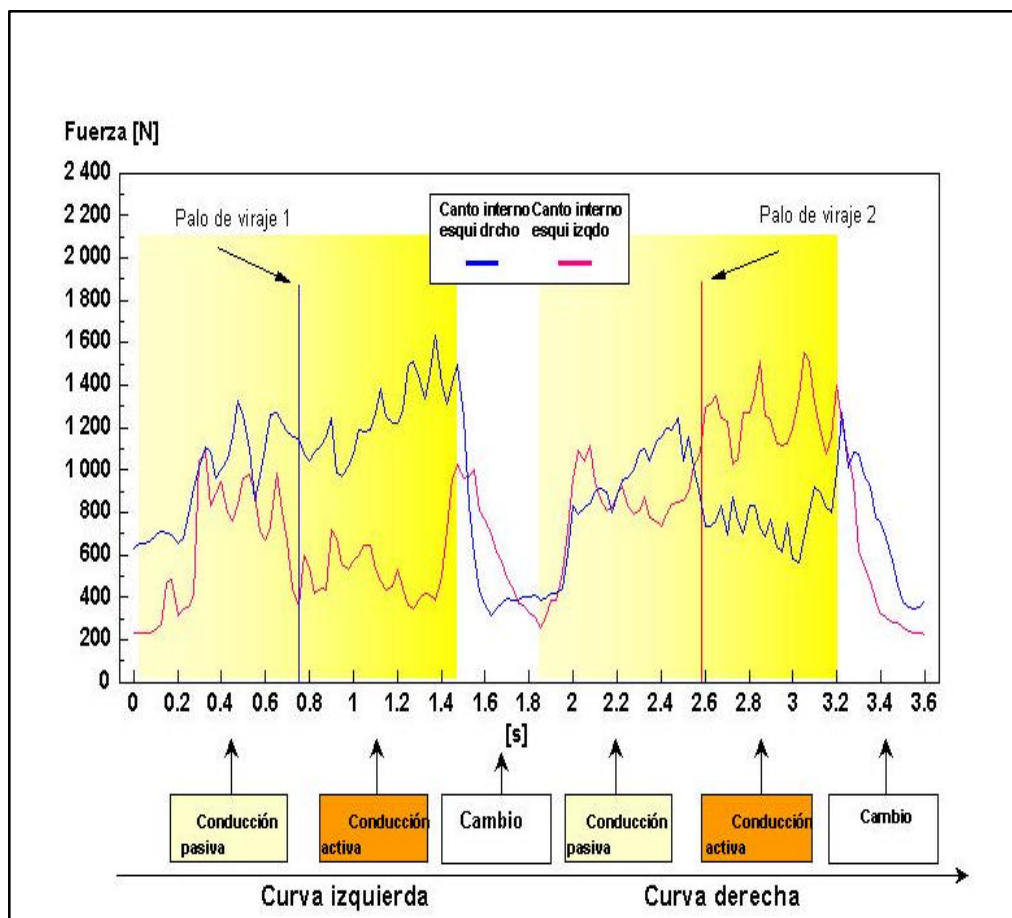
En la **Figura 2.25** podemos ver la presión ejercida sobre la nieve sobre ambos esquís en una sucesión de curvas. Podemos apreciar como durante el inicio de la curva hasta aproximadamente las dos primeras partes de ella, la presión que el esquiador ejerce sobre la nieve aumenta de forma progresiva en ambos esquís hasta llegar a la tercera y última parte donde la presión ejercida sobre el esquí exterior aumenta por encima de la ejercida por el esquí interior hasta que de nuevo disminuye para igualarse al esquí interior e iniciar la siguiente curva. Estudios recientes (Raschner et al., 1998), nos revelan como el lugar donde el esquiador realiza máxima presión dentro de la trayectoria curva se encuentra en la última parte de la curva, tal y como podemos observar en la **Figura 2.26**.

Deducimos de lo expuesto hasta ahora que el esquiador puede aumentar la presión sobre la nieve incrementando su fuerza normal. Este incremento se consigue cuando el esquiador termina el movimiento de flexión o inicia el movimiento de la extensión de las piernas (justo al final de cada viraje). Para aprovechar los cambios de aceleración del centro de gravedad del esquiador, causadas por los movimientos de extensión y flexión de las extremidades inferiores, y conseguir una disminución de la presión ejercida sobre la nieve para cambiar de dirección, el tiempo transcurrido entre el movimiento ascendente y descendente del centro de gravedad del esquiador debe ser reducido. Justificamos esta afirmación con el Teorema del Centro de Masas (Gutiérrez, 1998) y el Principio de Fuerza Inicial de Hochmuth (1967).



**Figura 2.25.** Distribución de la presión ejercida sobre los cantos de los esquís en un viraje iniciado desde el esquí del valle. (adaptado de Müller, 1994). El sector rojo muestra la transferencia de peso y el cambio de cantos del canto interior del esquí del valle al canto interno del esquí del monte.

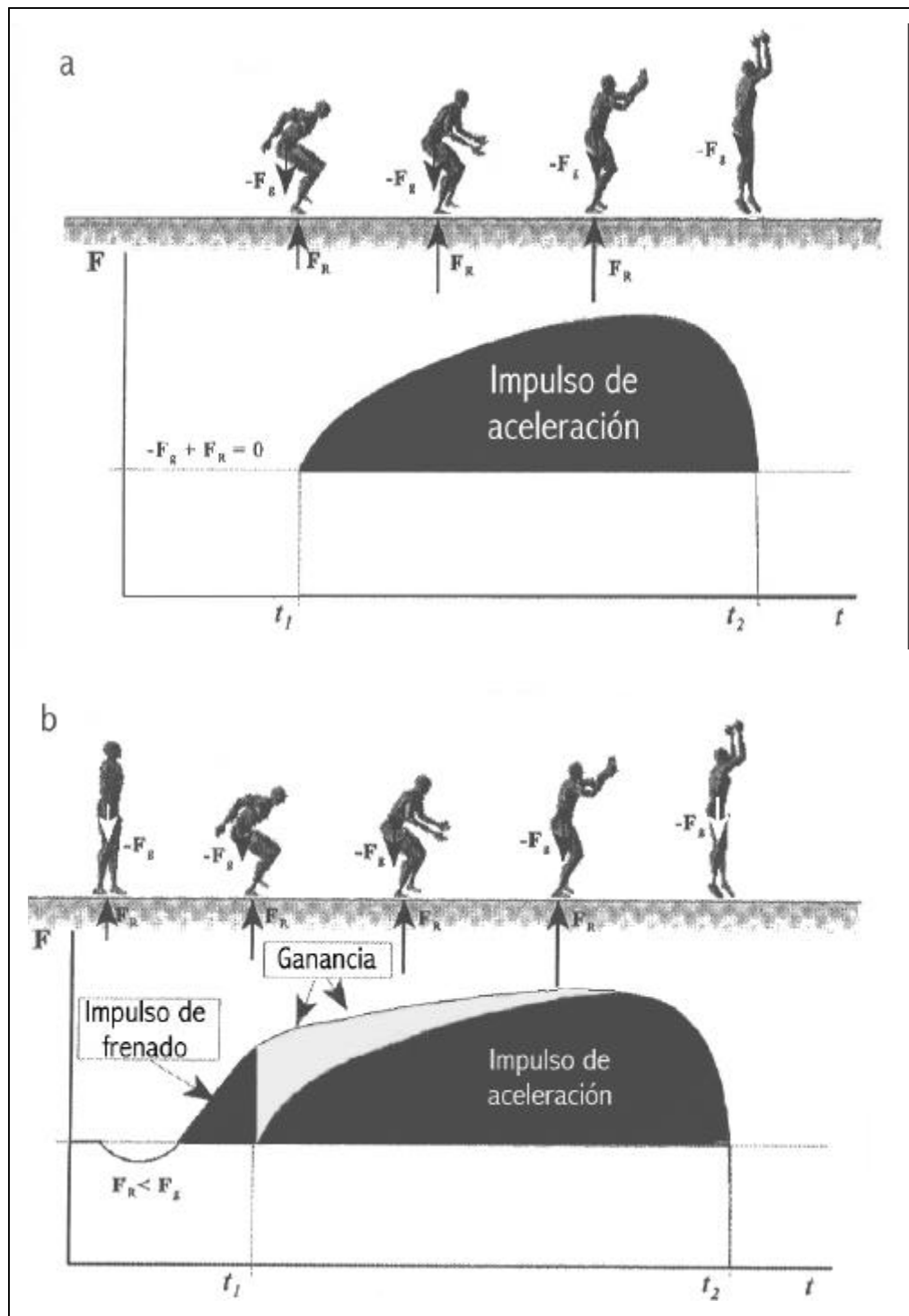




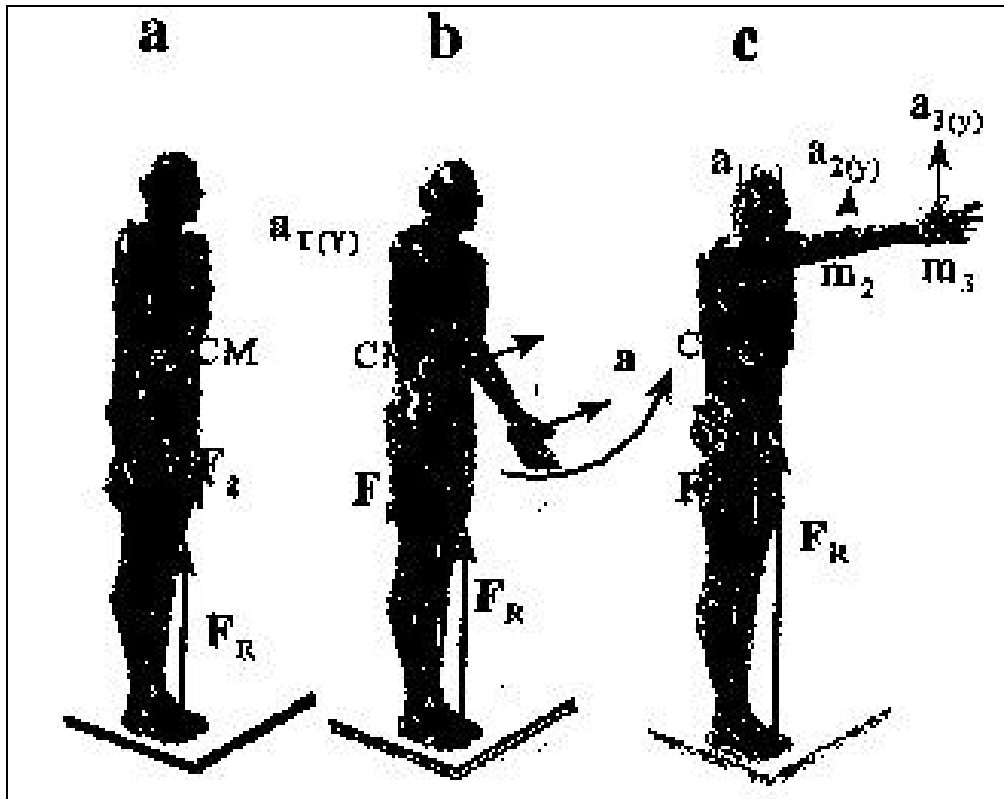
**Figura 2.26.** Distribución de la presión ejercida por el esquiador sobre los cantos de los esquís en un encadenamiento de curvas (adaptado de Raschner et al, 1998)

Cuando la gravedad es la misma en todo el sistema, el centro de gravedad (CG) es igual al centro de masas (CM) de un sistema cualquiera (Gutiérrez, 1998). Asimismo, la posición del CM de un sistema cualquiera depende de la posición que adoptan los segmentos que componen el sistema, lo que nos permite afirmar que cuando un sujeto desplaza uno de sus miembros superiores hacia arriba, partiendo desde una posición de equilibrio y en reposo con la que podemos observar en la **Figura 2.27 a**, su CM también se desplazará en la misma dirección y sentido. Para que éste cambie de posición ha tenido que acelerarse, como podemos observar en la **Figura 2.27 b** y, consecuentemente, esa aceleración la ha tenido que producir una fuerza externa al sistema, ya que las fuerzas internas se equilibran entre sí. Inicialmente la fuerza de reacción que actúa contra el sistema cuando este está en reposo, será sólo la de su peso, por lo que  $F_R = F_g$  (Figura 2.27 a). Cuando tenemos en cuenta la masa de los segmentos que se aceleran hacia arriba, así como las aceleraciones que cada uno de estos segmentos ocasiona (**Figura 2.27 c**), la fuerza resultante que actúa contra el sistema, tendrá que tener en cuenta la fuerza resultante que actúa sobre cada segmento desplazado.

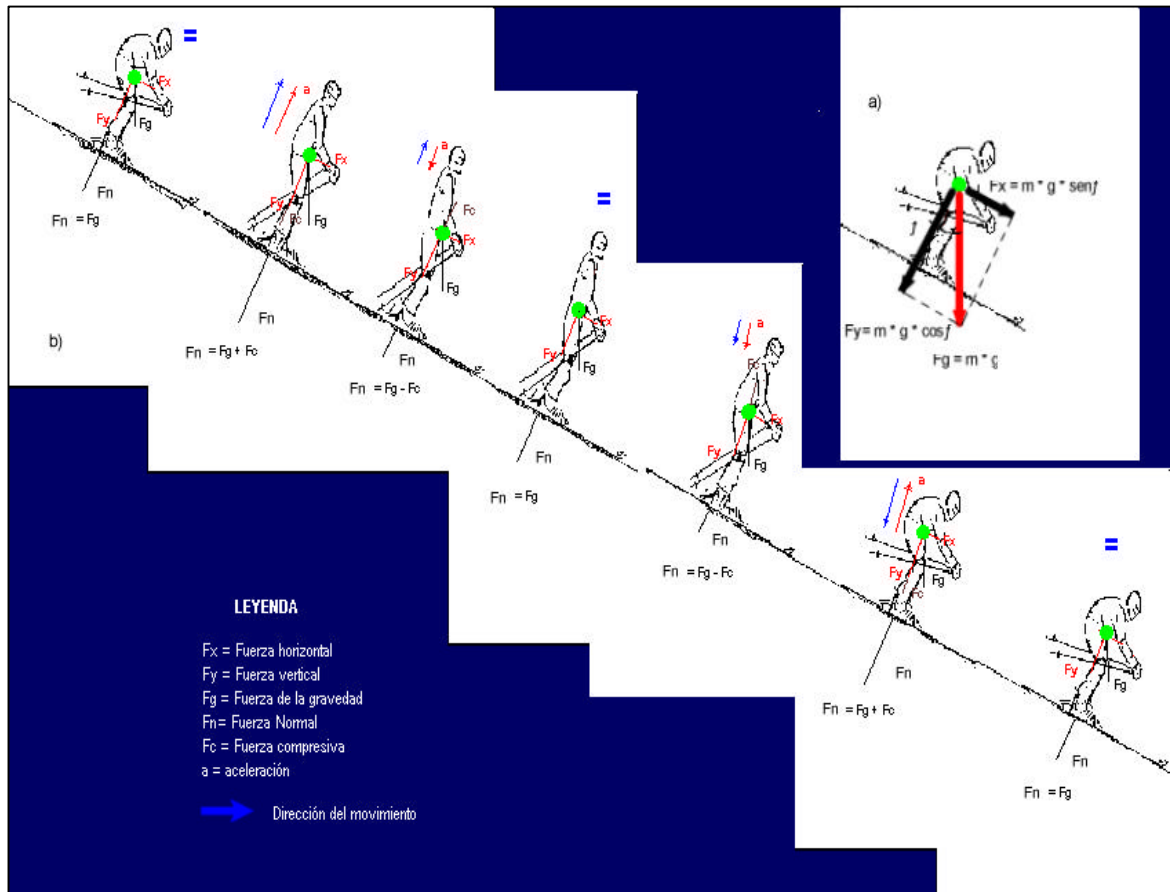
Si previamente al movimiento de extensión de todo el sistema, el esquiador realiza un movimiento de flexión (impulso de frenado) en un tiempo reducido, estamos en disposición de afirmar que la ganancia del impulso aún es mayor. Este incremento del impulso que desencadena el realizar un movimiento de flexión antes del movimiento de extensión y que, tiene por objetivo el aumento del impulso de la fuerza durante la fase de aceleración vertical del centro de gravedad, es lo que conocemos como el Principio de Fuerza Inicial de Hochmuth y podemos observarlo en las **Figuras 2.28 a y b**, en la realización de un salto vertical sin y con impulso previo. Y en la **Figura 2.29**, podemos observar el Teorema de Centro de Masas y el Principio de fuerza inicial de



**Figura 2.28.** Representación gráfica del impulso vertical de aceleración desarrollado durante un salto vertical sin (a) y con impulso previo (b), (adaptado de Gutiérrez, 1998) que explica el Principio de Fuerza Inicial de Hochmuth.



**Figura 2.27.** Representación gráfica del incremento de la fuerza externa resultante ( $F_R$ ), cuando se aceleran, en ese mismo sentido, ciertos segmentos que constituyen el sistema de estudio, según Teorema del Centro de Masas (Gutiérrez, 1998).



**Figura 2.29.** Detalle del diagrama de fuerza en un esquiador que se desliza por la pendiente (a) donde  $F_g$  es la fuerza de la gravedad;  $m$  es la masa del esquiador;  $g$  es la gravedad;  $F_y$  es la fuerza vertical;  $F_x$  es la fuerza horizontal y  $f$  es el ángulo de inclinación de la pista. Y Teorema del Centro de Masas adaptado a los movimientos y las aceleraciones que se producen en el deslizamiento del esquiador en dirección a la pendiente (b), donde  $F_g$  es la fuerza de la gravedad;  $F_y$  es la fuerza vertical;  $F_x$  es la fuerza horizontal;  $F_n$  es la fuerza de reacción normal, perpendicular al plano de la pendiente;  $F_c$  es la fuerza compresiva; y  $a$  es la aceleración que produce el movimiento.

Hochmuth adaptado a los movimientos que el esquiador realiza sobre su eje vertical.

La frecuencia de virajes en Slalom es mayor, con respecto a otras disciplinas del esquí alpino, debido principalmente a la menor distancia existente entre las puertas. Esta menor distancia, obliga al corredor a, acelerarse muy rápido entre los palos, y a, reducir el tiempo empleado en la realización del viraje. Hemos encontrado que el tiempo de los virajes puede oscilar entre 0.5 s., en Slalom y 1.5 s., en Slalom Gigante (Díez, 1996), para obtener finalmente un tiempo total de recorrido en Slalom, comprendido entre 45 a 60 s. (Klinger et al 1996).

Si tenemos en cuenta que el número de puertas del trazado en una carrera de Slalom puede oscilar entre 42 y 72, según dicta el reglamento (art. 801.2.4., del libro IV, RIS, 1996, 2000), y que en cada puerta el esquiador debe de realizar un viraje, podemos finalizar este análisis del viraje afirmando que la ejecución técnica individual y correcta, de cada uno de los virajes que el corredor debe realizar en su recorrido, puede determinar el rendimiento final.

En cuanto a la descripción de los factores que inciden en el rendimiento en el esquí alpino de competición, situación poco estudiada en las fuentes documentales existentes, hemos encontrado variables que, desde el punto de vista cinemático, parecen contribuir a la mejora de la eficacia de la técnica en Slalom en condiciones reales de competición (Forg-Rob y Nachbauer, 1988), entre las que destacamos: a) la distancia perpendicular desde la base de la puerta de slalom a la trayectoria del esquiador, b) la posición de la punta de la bota durante y en la dirección a la línea de la pendiente al final de la fase de conducción del viraje precedente (final del movimiento de flexión de las

piernas) y al inicio de la fase de transferencia del peso (inicio del movimiento de extensión de la pierna exterior).

Otras han sido: a) la velocidad tangencial resultante en dirección al movimiento y transversal de la punta de bota del esquiador correspondiente a su pierna exterior, b) la angulación de las articulaciones de rodilla y cadera de la pierna exterior durante el viraje, así como c) la velocidad lineal y angular de las articulaciones de la rodilla y la cadera de la pierna exterior de viraje (Goodwin,1993).

Estudios más recientes, han tenido en cuenta otras variables como: a) el desplazamiento angular de la articulación de la rodilla, b) el ángulo de inclinación del segmento correspondiente a la pierna del esquiador con respecto al plano de deslizamiento, c) el ángulo de los esquís con respecto a la dirección de movimiento, d) el ángulo de canteo de los esquís y e) la velocidad del CG (Raschner et all, 1996 y 1997).

Según lo expuesto, en esta Tesis profundizaremos en el estudio de la cinemática de las extremidades inferiores y concretamente de la pierna exterior, como factores que podrían determinar hipotéticamente el rendimiento en la disciplina del Slalom.

### ***2.5. Tipos de virajes***

Siguiendo a Foster (1995), el orden de los movimientos realizados por el esquiador, determina el tipo, la forma y la velocidad de los virajes. Basándonos en el análisis del viraje realizado en el apartado anterior, hemos encontrado diferentes tipos de virajes.

Fontana (1986) y Roldán (1993), distinguen entre *virajes alternativos* y *virajes simultáneos*, atendiendo a la secuencia temporal en la que se realizan los movimientos o acciones que realiza el esquiador para cambiar de dirección. Cuando estas acciones, las realizan al mismo tiempo, los denominan simultáneos. Cuando estas acciones se realizan unas seguidas de las otras, alternativos.

Estos, a su vez pueden ser *derrapados* y *cortados* si deslizan, o no, lateralmente sobre los cantos internos; *cortos*, *medios* y *amplios*, en función del radio de viraje; *deslizados* y *con salto* si mantienen, o no, el contacto de los esquís con el suelo; *al monte* o *al valle*, teniendo en cuenta su relación con la máxima pendiente, etc.

Foster (1995), menciona *virajes dinámicos* (dynamics turns) y *virajes step* (step turns), teniendo en cuenta como realizan el cambio de cantos y la transferencia del apoyo. Cuando estas acciones se realizan simultáneamente, se refieren a los dinámicos; y cuando las realizan consecutivamente, están hablando del viraje step. Mientras que el radio de viraje puede variar en ambos tipos, en los cambios de dirección step, la colocación del esquí del monte con respecto al del valle, en el momento de la transferencia del apoyo, puede variar la denominación de este viraje, independientemente del radio. Así, distinguen entre *virajes step paralelos* (parallel step turn), *convergentes* (converging step turns) y *divergentes* (diverging step turns), utilizando uno u otro en función de sí, se pretende acelerar, controlar la velocidad y/o corregir trayectoria de los esquís, respectivamente.

Chevalier y Schori (1996), diferencian entre virajes paralelos (*virage parallele*) y virajes con cambio de apoyo (*virage pedale*), atendiendo a los

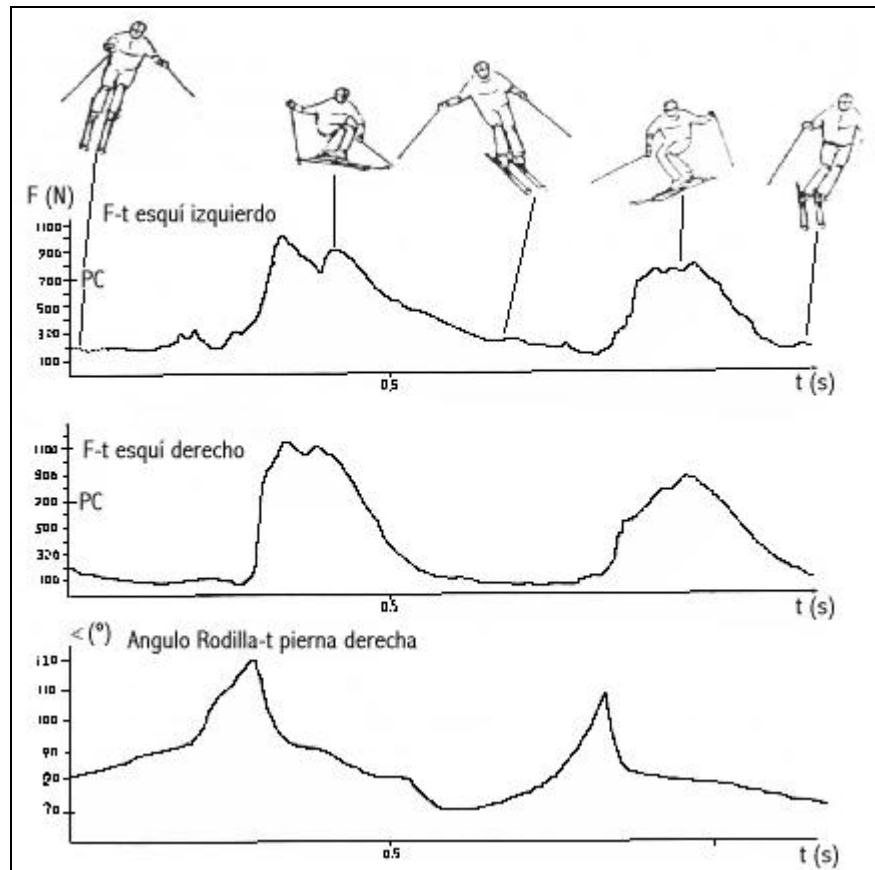


mismos criterios que el autor anterior. Los *paralelos* son simultáneos, coincidiendo con Fontana (1986) y Roldán (1993), y *dinámicos*, según Post Foster (1995). Y los *virajes con cambio de apoyo* son *alternativos*, según Fontana (1986) y Roldán (1993), y *step* según Post Foster (1995).

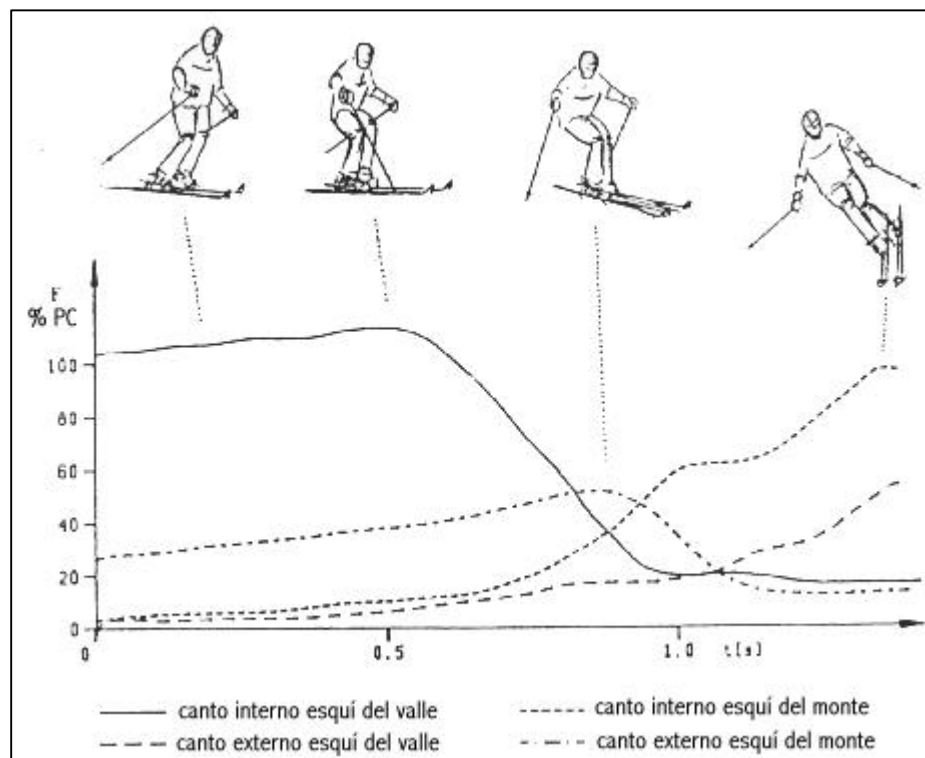
Y por último, Müller (1994), diferencia, dentro de los *virajes iniciados por un movimiento de extensión*, entre *virajes iniciados desde un esquí*, como el que podemos apreciar en la **Figura 2.30** (virajes alternativos, según autores anteriores), y *virajes iniciados desde ambos esquís* (virajes simultáneos y alternativos), como el de la **Figura 2.31** y **2.32**. Estos últimos a su vez, pueden dividirse en *virajes acíclicos* (predominantemente alternativos, Figura 2.29) y *cíclicos* (predominantemente simultáneos, como el de la Figura 2.30) en base a la existencia o no, de una trayectoria transversal a la línea de máxima pendiente que une dos virajes o *diagonal*.

Dentro de los *virajes iniciados por un movimiento de flexión*, diferencia entre *virajes en posición flexionada* para cualquier tipo de pista (como el de la **Figura 2.33**), *virajes en bañeras* (**Figura 2.34**), y *virajes en nieve profunda* (**Figura 2.35**).

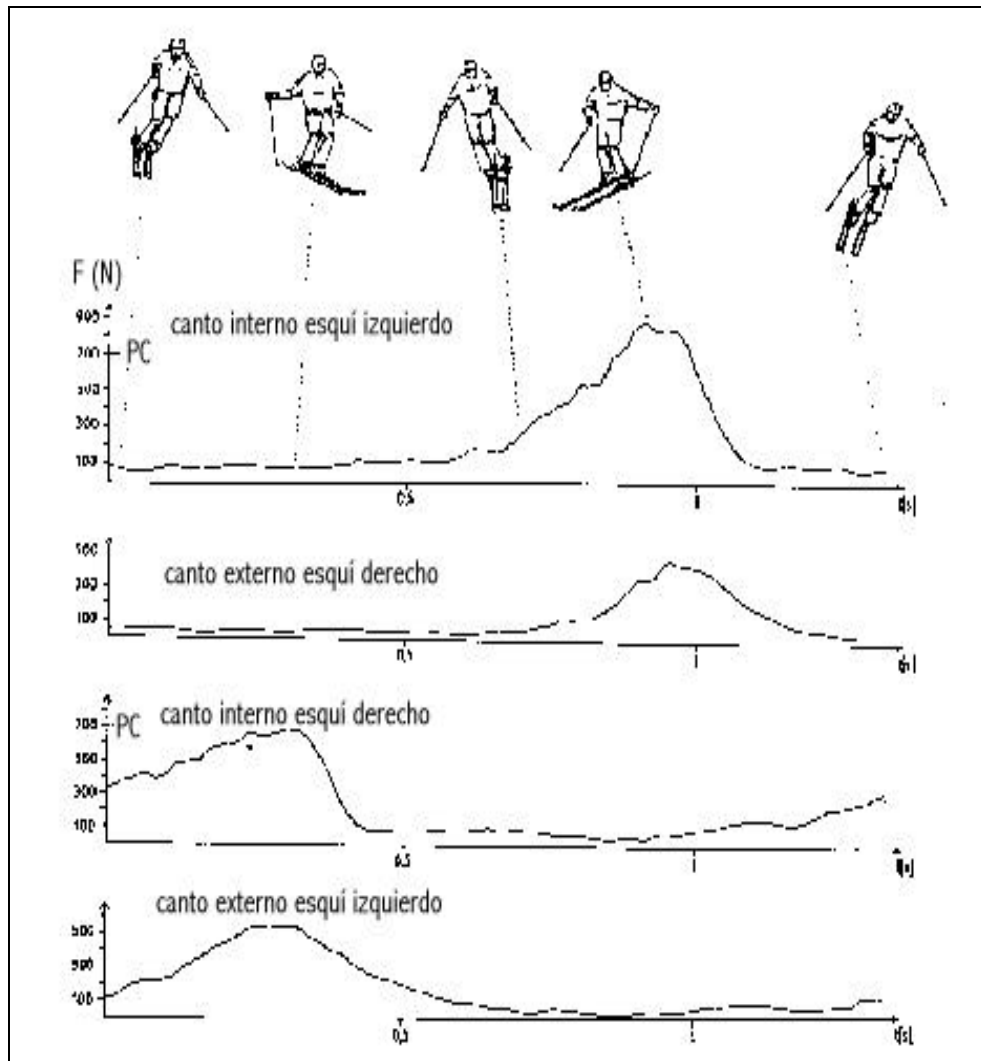
En resumen, y a modo de conclusión, podemos decir, que tras el estudio de diferentes tipos de virajes, creemos que el tipo de viraje que se emplea en Slalom, es un viraje corto (teniendo en cuenta el radio de viraje); deslizado (al realizarse en contacto con la nieve), cortado (ya que existe deslizamiento sobre los cantos interiores), predominantemente cíclico (al no existir diagonal en determinadas partes del trazado, ya que la distancia entre puertas no es fija); es un viraje que se inicia sobre ambos esquís (al disponer de poco tiempo entre las puertas para realizar demasiados movimientos); es un viraje que se inicia por un movimiento de extensión, simultáneo, paralelo y dinámico.



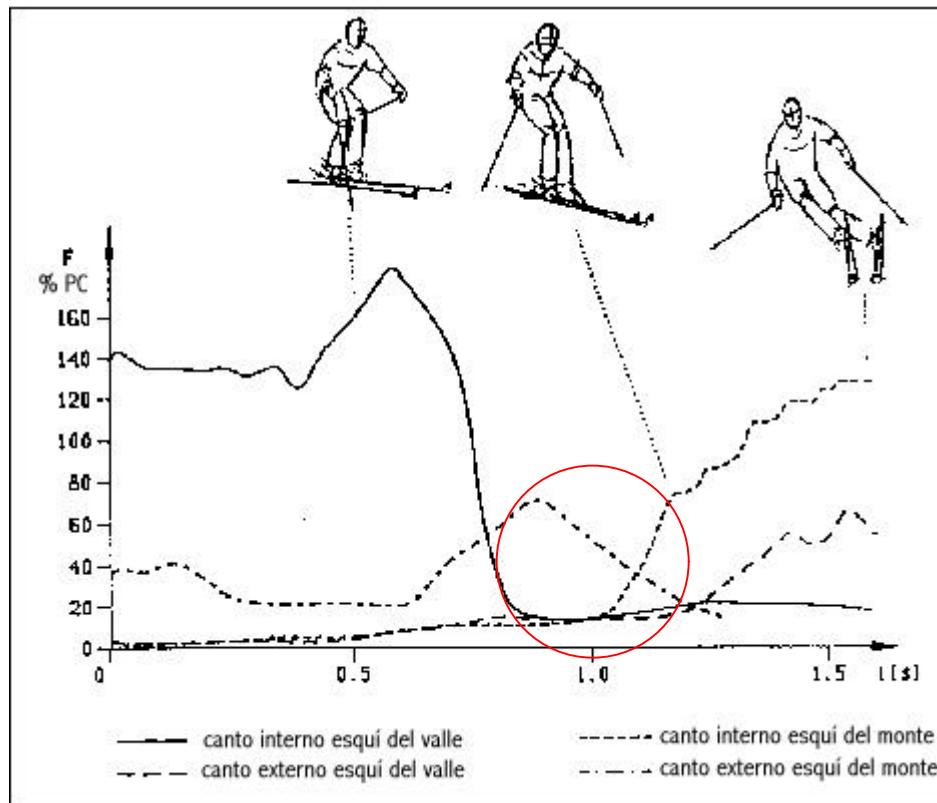
**Figura 2.34.** Iniciación de un viraje por movimiento de flexión de las rodillas entre bañeras (adaptado de Müller, 1994). También es un viraje paralelo, dinámico y simultaneo, al realizar la transferencia de peso y el cambio de cantos al mismo tiempo.



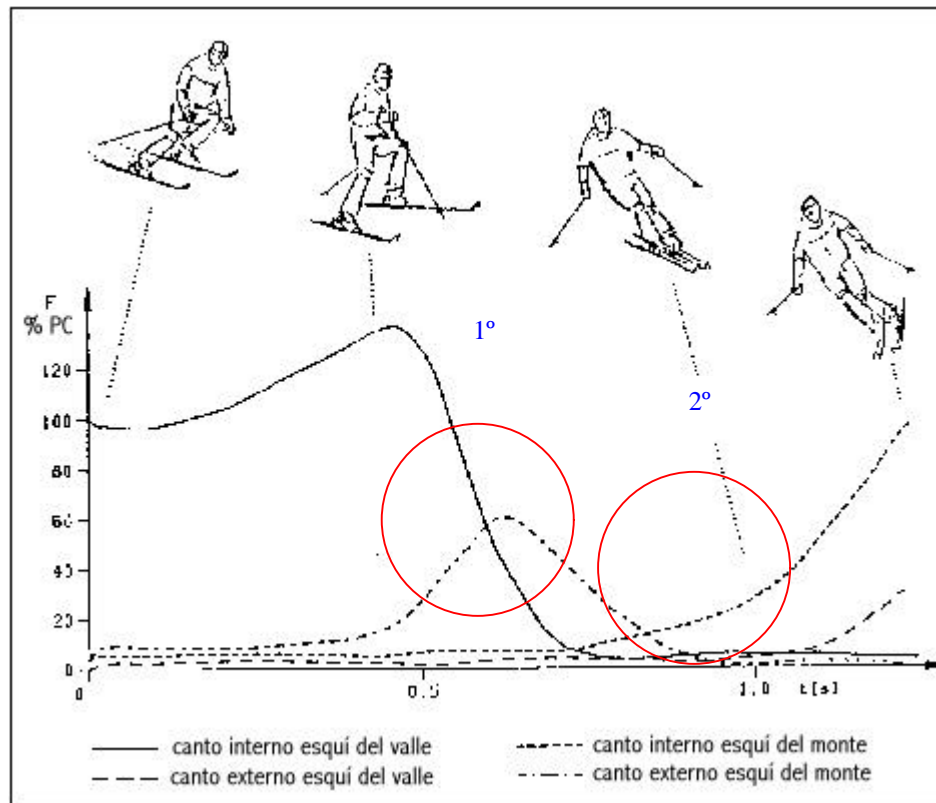
**Figura 2.33.** Iniciación de un viraje por movimiento de flexión de las rodillas (adaptado de Müller, 1994). Viraje paralelo, dinámico y simultáneo, al realizar la transferencia de peso y el cambio de cantos al mismo tiempo.



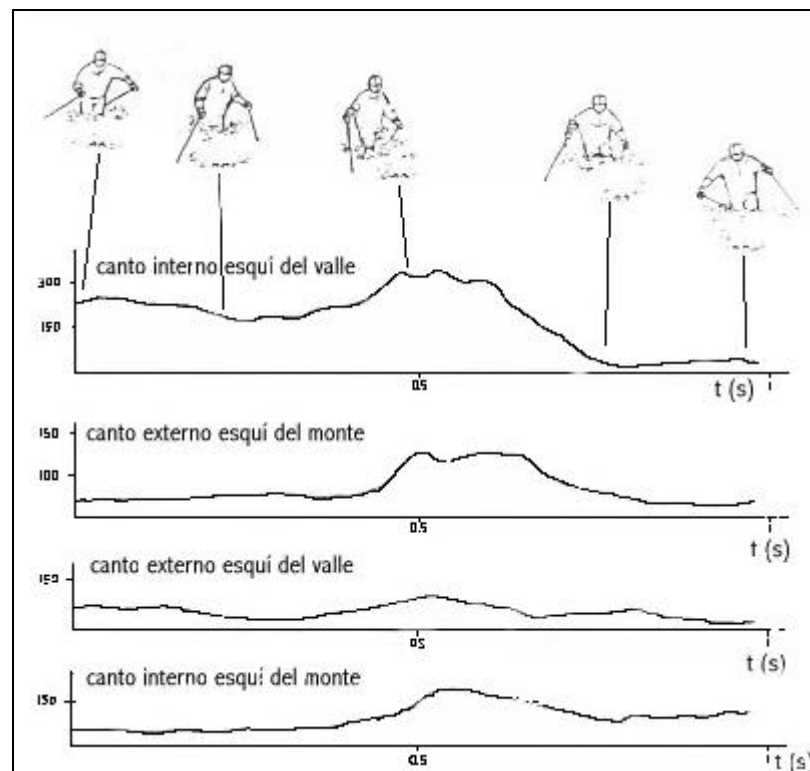
**Figura 2.32.** Viraje de radio corto o cíclico iniciado con ambos esquí. (adaptado de Müller, 1994). También es un viraje paralelo, dinámico y simultáneo, al realizar la transferencia de peso y el cambio de cantos, al mismo tiempo.



**Figura 2.31.** Iniciación de un viraje simultáneo iniciado desde ambos esquís, también viraje *acíclico* (extraído de Müller, 1994). Es denominado viraje *parallele* y/o *dynamic turn*. La transferencia del peso y el cambio de cantos se realiza al mismo tiempo.



**Figura 2.30.** Iniciación de un viraje alternativo iniciado desde ambos esquís o viraje *acíclico* (adaptado de Müller, 1994). También es denominado viraje *pedalè* y/o *diverging step turn*. El movimiento alternativo se realiza en dos partes: 1° transfiere el peso (del canto interior del esquí del valle, al canto interior del esquí del monte *downhill ski inside edge* al *uphill ski inside edge*), y 2° cambia de cantos (los cantos interiores del viraje extinguido se convierten en los exteriores, y los exteriores, en interiores del nuevo viraje).



**Figura 2.35.** Iniciación de un viraje por movimiento de flexión de las rodillas en nieve profunda (adaptado de Müller, 1994). Es un viraje paralelo, dinámico y simultáneo ya que la transferencia del peso y el cambio de cantos se realizan al mismo tiempo.

En la **Figura 2.36**, podemos apreciar la secuencia de fotogramas de un viraje de Slalom correspondiente a uno de los sujetos analizados. A modo de resumen, en la **Tabla 2.2**, se presenta un cuadro de los diferentes tipos de viraje, en el que tenemos en cuenta el movimiento de extensión y/o flexión que los originan.

### **2.6. La estructuración del viraje de Slalom en fases de movimiento**

El movimiento deportivo puede estructurarse en fases para facilitar su análisis según Grösser y Neumaier (1986).

Cuando dividimos un movimiento en sucesiones espacio-temporales y dinámicas, nos referimos, siguiendo a estos autores, a la estructura fundamental. Meinel y Schnabel (1986) (Grösser y Neumaier, 1986), dividen la estructura fundamental de un *movimiento acíclico* o movimiento que cumple su objetivo con una sola realización, en tres fases: a) una fase preparatoria, seguida de b) una fase principal, y por último c) una fase final. Según éstos, la parte decisiva en este tipo de movimientos coincide con el final e inicio de las fases preparatoria y principal, respectivamente, momento en el que se pasa de una *fase de frenado* o de actividad excéntrica, a una *fase de aceleración*, de actividad concéntrica de la musculatura. En la **Figura 2.37**, podemos observar la estructura en fases de movimiento de un viraje de los que anteriormente hemos considerado acíclicos según Müller (1994), y además, podemos apreciar el momento decisivo del cambio de dirección, ensombrecido.

Asimismo, y siguiendo el criterio de estos autores, las fases de un movimiento cíclico o repetitivo, son dos: a) una principal y b) otra intermedia. En ellas el principio de una coincide con el final de la otra y así, sucesivamente.



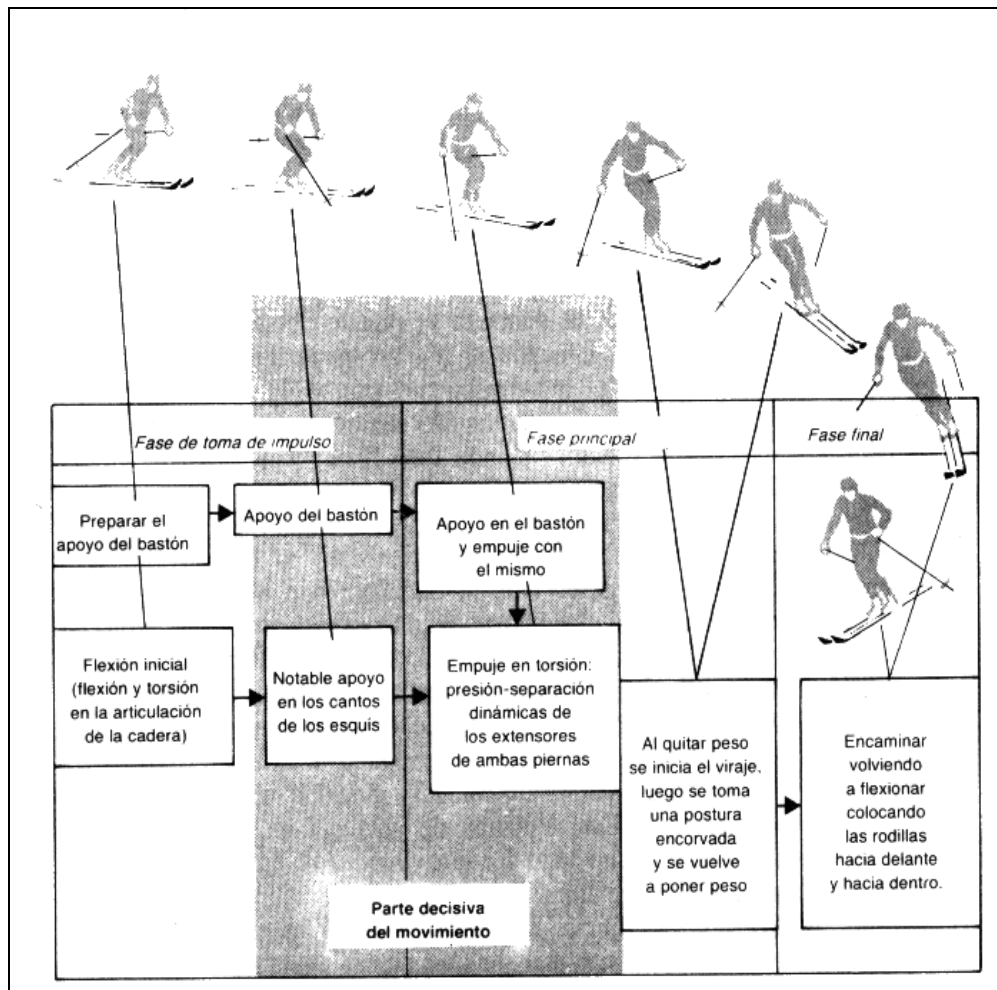


**Figura 2.36.** Secuencia de fotogramas en el viraje de Slalom analizado.

---

**Tabla 2.2.** Cuadro resumen de los tipos de viraje a partir del movimiento que lo origina.

TIPO DE VIRAJE	SECUENCIALIZACIÓN DEL MOVIMIENTO	ORIGEN DEL MOVIMIENTO	ESTADO DE LA NIEVE	PENDIENTE	RADIO DE VIRAJE	DENOMINACIÓN
	SIMULTANEO  La transferencia de peso y el cambio de cantos se realizan al mismo tiempo.	AMBOS ESQUÍS	PRENSADA.	FUERTE (24%)  MEDIA (11%)	CORTO	DINÁMICO
			HELADA.		MEDIO	PARALELO
			RECIEN CAIDA.		AMPLIO	ACÍCLICO ó CÍCLICO
INICIADOS POR UN MOVIMIENTO DE EXTENSIÓN	ALTERNATIVO  Primero se transfiere el peso y después se cambian los cantos.	AMBOS ESQUÍS	PRENSADA.	FUERTE (24%)	MEDIO	STEP
			HELADA.	MEDIA (11%)	AMPLIO	PEDALÉ ACÍCLICO ó CÍCLICO
		UN SOLO ESQUÍ El esquí del valle.	PRENSADA.	MEDIA (11%)	MEDIO	STEP PEDALÉ
INICIADOS POR UN MOVIMIENTO DE FLEXIÓN	SIMULTANEO	AMBOS ESQUÍS	PRENSADA.	FUERTE (24%)	MEDIO	DINÁMICO
			RECIEN CAIDA.	MEDIA (11%)		PARALELO ACÍCLICO ó CÍCLICO



**Figura 2.37.** Estructuración de un viraje en fases para su análisis descriptivo. (Grösser y Neumaier, 1986).

En opinión de Grösser y Neumaier (1986), estas fases de movimiento mantienen una relación continua entre sí. En primer lugar, con respecto a la relación de los resultados, ya que cada fase siguiente depende del resultado anterior. En segundo lugar, con respecto a la relación causal, y como consecuencia de una fase principal, siempre resulta una final, y viceversa. Y en último lugar, con respecto a la relación intencional, el deportista realiza una programación mental o se anticipa a la acción, cuando ordena mentalmente las partes del movimiento que va a realizar.

Götner (1979) (Grösser y Neumaier, 1986), realiza una estructuración en fases de movimiento, en función de las tareas de determinadas fases parciales, para conocer qué sucede en cada una de ellas, con respecto al objetivo del movimiento. El autor denomina a estas fases, *funcionales*. Cada una de las fases, se clasifica, en función de las relaciones de interdependencia entre ellas, en dos tipos. Por un lado, las *fases principales*, que no requieren relación alguna con las otras fases para describir su función. Según el autor, pueden existir movimientos con varias fases principales, o pueden existir fases principales que resulten de la superposición de fase dependientes entre sí, como son las acciones de *cantear* o apoyar los cantos y *virar* o girar los esquís, en la fase principal del viraje. Y por otro, las *fases auxiliares*, que son dependientes.

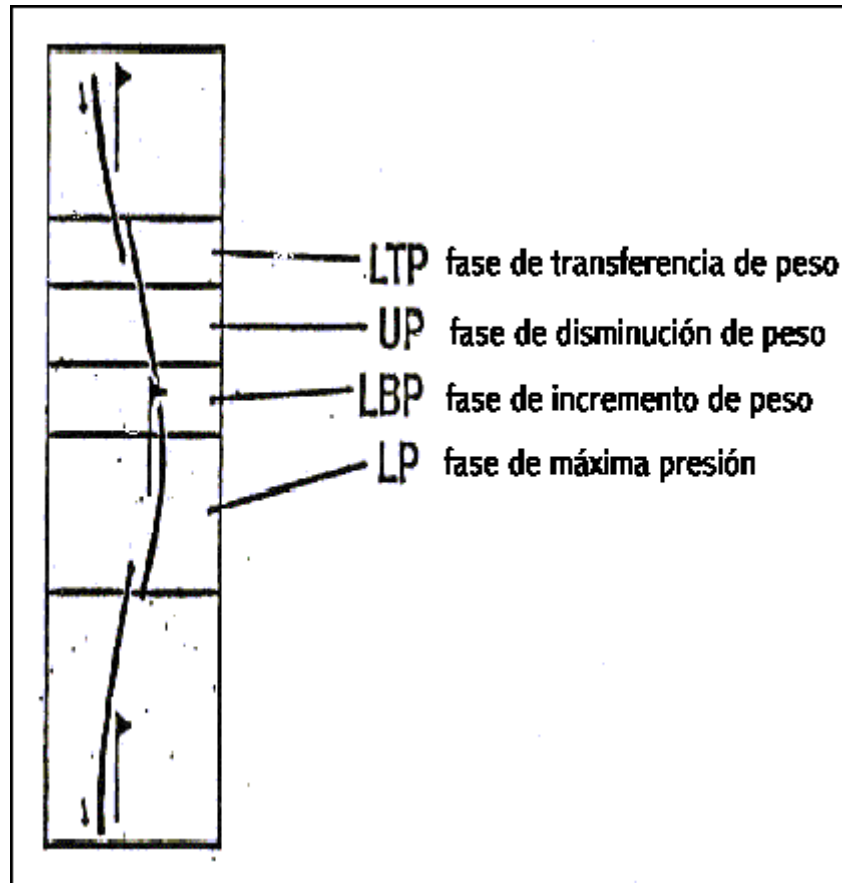
Según hemos visto en esta breve introducción acerca de la estructuración del movimiento en fases, nos parece importante, determinar el tipo de movimiento del que se trata un viraje, para a partir de aquí, estructurarlo en fases para su análisis en Slalom. Partiendo de los tipos de movimientos expuestos por Meinel y Schnabel (1986) (Grösser y Neumaier, 1986), podemos decir que el viraje en el Slalom es un movimiento cíclico, y como tal, su estructura fundamental, tiene dos fases.

Hemos encontrado autores como Roldán (1993), Müller (1994) y Chevalier y Schori (1995), que analizan el viraje estructurándolo en dos fases, que podrían resumirse en una fase de iniciación seguida de una fase de conducción.

También, hemos encontrado una estructuración del viraje en tres fases, FISU (1991) y Raschner et al (1998), que además de las mencionadas, hablan de la existencia de una fase intermedia entre ambas.

Por último, una estructuración del viraje en cuatro fases de movimiento, como las desarrolladas por Nachbauer (1987, 1989), Nachbauer y Rauch (1991), la USSCA (1994), y seguidas por Foster (1994) y Thomas (1994). Estas fases son; a) la fase de transferencia del peso (*load transfer phase*) y/o de preparación del viraje, b) fase de disminución de la presión (*unloading phase*) y/o de iniciación del viraje, c) fase de incremento de la presión (*load build-up phase*) y/o de giro propiamente dicha, y d) la fase de máxima presión (*loaded phase*) y/o de control de la carga y del arco de la curva. En la **Figura 2.38**, podemos observar la estructura en fases de un viraje en Slalom, según Nachbauer y Rauch (1991).

Para el análisis del viraje analizado en Slalom, vamos a estructurar el movimiento en dos fases, iniciación y conducción, siguiendo a Müller (1994). Según éste, en el viraje existen dos fases claramente diferenciadas: a) una fase de iniciación, en la que los esquís tras cambiar de cantos, se preparan para girar. Según él, en esta fase se pueden observar las principales diferencias, entre distintos tipos de viraje, bajo las mismas condiciones medioambientales. Y b) una fase de conducción, en la que los esquís, son girados. Según el autor, desde el punto de vista cinemático, podemos dividir el viraje en dos fase de conducción, una hacia fuera de la línea de máxima pendiente, en donde los esquís son girados hacia una posición transversal a



**Figura 2.38.** Estructuración de un viraje en Slalom en fases atendiendo a la distribución de la presión sobre la superficie de deslizamiento, donde LTP es la fase de transferencia del peso ; UP es la fase de disminución de la presión; LBP es la fase de incremento de la presión; y LP es la fase máxima presión (adaptado de Nachbauer y Rauch, 1991).

---

la pendiente, y otra, hacia dentro de la línea de máxima pendiente, en la que los esquís se vuelven a girar desde esta posición hacia la línea de máxima pendiente.

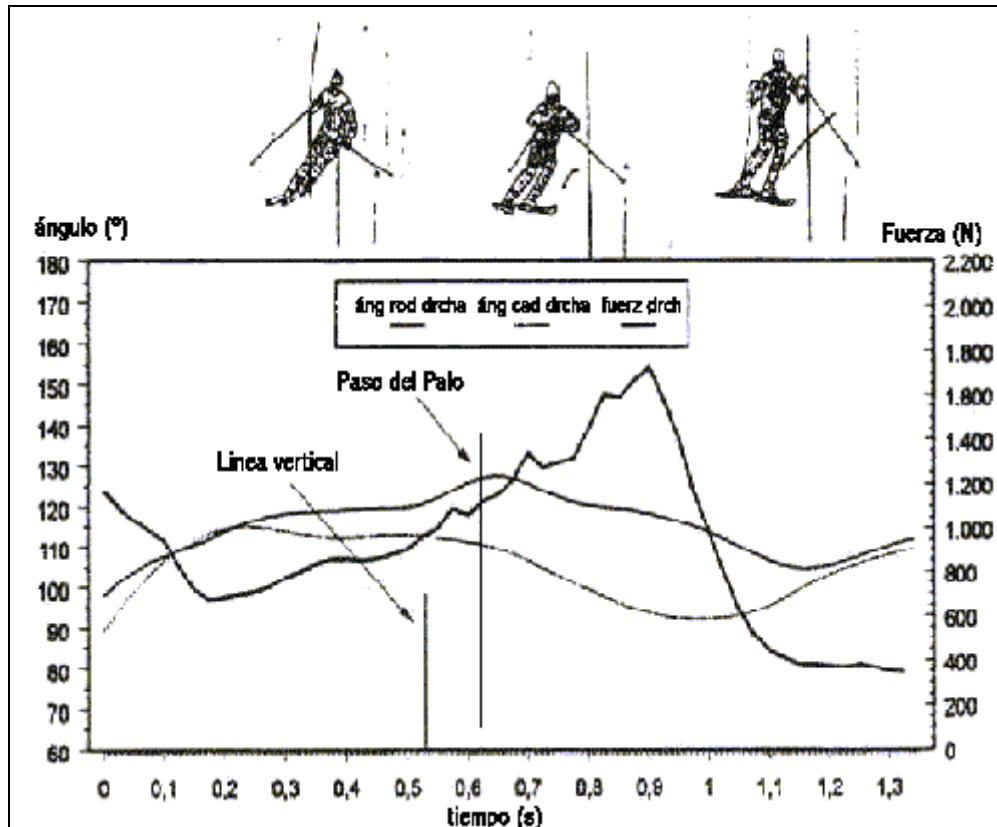
### **2.6.1. Fase de iniciación**

En la fase de iniciación vamos a definir los siguientes períodos importantes del movimiento:

#### **A) Preparación del viraje, momento de cambio de cantos**

Esta fase comienza con la transferencia de la carga desde el esquí exterior del viraje anterior hacia el esquí exterior del nuevo viraje, lo que origina un fuerte impulso para desencadenar el cambio de dirección. Este impulso ocasiona un aumento de la carga sobre ambos esquís, principalmente sobre el canto interno del esquí exterior. Y termina cuando el nuevo esquí exterior alcanza el máximo de carga (200% del peso del esquiador) según Nachbauer y Rauch (1991), como podemos observar en la **Figura 2.39**.

Además, la angulación de la rodilla de la pierna externa del anterior viraje y la rodilla de la que va a ser pierna externa en el nuevo viraje se sitúan en torno a 105° y 110° aproximadamente, y termina cuando llega a 130°, como consecuencia del movimiento vertical de extensión de las rodillas, según Müller (1994). Si existe clavado de bastón, dicho momento coincide con el momento de inicio del viraje (Foster, 1994).



**Figura 2.39.** Aumento de la presión sobre el canto interno del esquí exterior y desplazamiento angular de la rodilla y cadera derecha en un viraje en Slalom. (adaptado de Frick et al ,1996).



*B) Iniciación del viraje, orientación de los esquís hacia trayectoria deseada*

Con el impulso de cambio de dirección originado anteriormente el esquiador como hemos podido ver, produce una aceleración ascendente del CG, que provoca una fase de descarga relativa o de disminución de la presión ejercida sobre los esquís. La fuerza aplicada sobre el terreno puede disminuir al final de esta fase, en ambos esquís, hasta el 40 % del peso del esquiador aproximadamente, según Müller (1994) y Nachbauer y Rauch (1991).

Además, el esquiador efectúa el cambio de cantos, y comienza a colocar los esquís hacia la dirección elegida. La presión que se encuentra distribuida sobre ambos esquís, se va acumulando en el canto interno del nuevo esquí exterior, gracias al movimiento que realizan las rodillas de inclinación hacia el interior de la curva, reduciendo la angulación de las mismas a unos 115°, detalle que marca el final de la fase de iniciación del viraje (Müller, 1994).

Podemos concluir diciendo que el movimiento característico de la fase de iniciación del viraje, es el que Chevalier y Schori (1995) denominaban, movimiento de extensión-básculo-rotación, corresponde a un movimiento de extensión-flexión de las extremidades inferiores asociado al un movimiento de inclinación lateral de rodillas y del esquiador hacia el interior de la curva. Esta fase, también es considerada por Raschner et al (1998) como una fase de conducción pasiva, al considerar que los esquís se orientan hacia la línea de máxima pendiente por acción de la gravedad.

### **2.6.2. Fase de conducción**

En esta fase tenemos que tener en cuenta los siguientes puntos importantes del movimiento:

#### **C/ Incremento gradual de la presión sobre los esquís**

Tras la disminución de la presión sobre los esquís, parece ser que se incrementa la fuerza de reacción sobre el canto interno del esquí exterior, hasta un valor máximo. El final de esta fase se define como el inicio de la meseta de fuerza de reacción del esquí exterior (Raschner et al, 1998).

Una vez que los esquís han sido colocados en la dirección elegida, comienzan a girar, produciendo como consecuencia, un aumento de la fuerza aplicada sobre el nuevo esquí exterior principalmente, y una disminución del ángulo de las rodillas, continuación de la acción de dirección iniciada en la fase anterior por medio de la inclinación lateral de las rodillas hacia el interior de la curva, que provoca un aumento considerable del movimiento de canteo del esquiador.

#### **D/ Control del arco de la curva**

En esta última parte del viraje se aplica una fuerza relativamente constante en ambos esquís, hasta que la fuerza aplicada sobre el esquí exterior, comienza a descender bruscamente. En esta fase, la fuerza aplicada sobre el esquí interior inicia su aumento, originando el principio del impulso de cambio de dirección del siguiente viraje. La angulación de las rodillas llega al punto más bajo, como consecuencia del movimiento vertical de flexión que el esquiador inicia al principio de esta fase de conducción.

En esta fase es cuando el esquiador contacta con el palo, como puede observarse en la estructuración en fase del viraje en Slalom de Nacbauer y Rauch (1991) mencionada anteriormente y apreciamos en la Figura 2.38. El esquiador contacta con el palo cuando ya ha girado, y se dispone a iniciar el siguiente viraje. Aspecto que se traduce desde el punto de vista dinámico en el incremento de la fuerza aplicada sobre ambos esquís, según la curva de fuerza, y desde el punto de vista cinético, en la disminución del ángulo de rodillas y caderas del esquiador.

A modo de resumen, en la **Tabla 2.3**, se presenta un cuadro de las fases en la que se estructura el viraje para su análisis según diversos autores, con algunas características.

**Tabla 2.3.** Estructuración del viraje en fases y característica para su análisis, según diversos autores.

FASES	CARACTERÍSTICAS	AUTORES
Preparatoria		
Principal	El momento decisivo del viraje se produce la entre la fase preparatoria y principal (cambio de peso y cantos)	Meinel y Schnabel (1986)
Final		
Principal	En la fase principal, se producen las acciones de cantear, virar y dirigir los esquís	Götner (1979)
Auxiliar		
Iniciación	Se realizan los movimientos que determinan el tipo de viraje.	Roldán (1993) Müller (1994)
Conducción	Fase de control de la trayectoria escogida	Chevalier y Schori (1995)
Cambio	Se busca desequilibrio y reducir la resistencia contra la nieve	
Conducción Pasiva	Se busca equilibrio y aprovechar la resistencia contra la nieve	FISI (1991) Raschner et al (1998)
Conducción Activa	Se busca mantener el equilibrio y utilizar la resistencia contra la nieve	
Transferencia de peso	Cambio de peso y cantos, prepara viraje	
Disminución de la presión	Inicia viraje orientándose hacia la trayectoria deseada.	Nachbauer (1987, 1989) Nachbauer y Rauch (1991) USSCA (1994)
Incrementa presión	Trata de mantener la trayectoria y dirigir los esquís, conducir, girar.	Foster (1994,1995) Thomas (1994)
Máxima presión	Termina curva, controla dirección y arco de curva	

## CAPITULO 3

### MÉTODO

### 3. Método

En este capítulo se desarrollan los aspectos relacionados con la metodología y las características del sistema de análisis utilizado en esta tesis, el cual utiliza el método inverso y las técnicas fotogramétricas tridimensionales como base tecnológica para la descripción del movimiento deportivo, concretamente, en la disciplina de Slalom en el esquí alpino.

El movimiento analizado consistió en un viraje de Slalom, ubicado en el final de la primera parte del trazado, realizado en la prueba individual masculina y femenina del Campeonato del Mundo de Esquí Alpino celebrado durante los días 24 y 25 Febrero de 1996 en la Estación de Esquí y Montaña de Sierra Nevada, Granada (España).

#### 3.1. Características generales del método

Desde el punto de vista metodológico, la Biomecánica Deportiva ha estudiado el movimiento humano utilizando dos alternativas: **a) Método Inverso**, que utiliza las diversas variables implicadas en el análisis biomecánico del movimiento (parámetros cinemáticos, dinámicos y de estructuras biológicas) para realizar una descripción cuantitativa y establecer las ecuaciones necesarias que nos permitan determinar las variables biomecánicas que actúan en cada una de las articulaciones y segmentos que componen el sistema que produce el movimiento y **b) Método Directo**, que utiliza las diversas variables biomecánicas interactuantes en el movimiento deportivo, realizando sobre ellas cambios hipotéticos cuyas consecuencias y modificaciones pueden ser analizadas. (Gutiérrez, 1990).

Para utilizar cualquiera de estos dos métodos, la Biomecánica Deportiva

utiliza sistemas computerizados, más o menos complejos, para la medición y el análisis. El rendimiento deportivo, el estudio de las cargas que deben aplicarse en los procesos de rehabilitación, la cuantificación del rendimiento físico, el análisis y desarrollo del equipamiento, la detección de factores de riesgo en la actividad física, así como la investigación aplicada en áreas de entrenamiento deportivo, medicina terapéutica y ortopédica, son sus principales áreas de aplicación.

Siguiendo a Soto (1995), el análisis de las habilidades deportivas, desde una perspectiva biomecánica, utiliza múltiples y diversas tecnologías. Gran parte de ellas se basan en la obtención de los parámetros que definen la localización espacial del cuerpo humano considerado como el sistema objeto de estudio. La obtención de dichos parámetros puede realizarse de forma directa, mediante la utilización de tecnologías inteligentes de detección de marcadores o bien, de forma indirecta, mediante la utilización de técnicas cinematográficas o videográficas

Los métodos y técnicas de análisis actualmente empleados en la Biomecánica Deportiva podemos jerarquizarlos en dos grandes bloques: **a)** por un lado, las *Técnicas Instrumentales de Registro* que incluyen todas las tecnologías necesarias en el proceso de captación y detección del movimiento y **b)** por otro, las *Técnicas de Tratamiento de los datos*, las cuales se circunscriben al ámbito de todas las operaciones realizadas mediante la utilización del ordenador, permitiendo gestionar la información del movimiento desde su introducción en el ordenador, procesado y elaboración, hasta la obtención de resultados.

Y entre las técnicas instrumentales de registro que habitualmente se manejan en el ámbito de la captación de parámetros biomecánicos, diferenciamos dos tipos: **a)** los *Registros Directos*, que son aquellos que no requieren proceso intermedio alguno para su estudio y pueden visualizarse de forma simultánea a la realización de la actividad. El único inconveniente que tienen es que

la ubicación de los captadores sobre el sistema suele afectar al movimiento de éste, pero permiten obtener parámetros de una gran fiabilidad y de forma inmediata, posibilitando dar la información al deportista instantes después de haber realizado el gesto y **b)** los *Registros Indirectos*, son aquellos que permiten obtener la medida de ciertos parámetros mediante la realización de un proceso de cálculo previo en el que son necesarias otras medidas externas para obtener su valor. Tienen el inconveniente del excesivo tiempo del proceso intermedio para la obtención del registro y la manipulación de los datos por parte del experimentador y su ventaja es que no suelen afectar al movimiento ya que generalmente son registros de tipo externo.

Cuando no se conocen con exactitud las causas que producen el movimiento, se recurre al método inverso. Con la utilización de este método, se realiza una descripción cuantitativa del movimiento, tratando de deducir las causas que conducen a realizar el gesto de una forma eficaz. (Gutiérrez, 1990). Dentro del método inverso destacan los métodos descriptivos, siendo definidos por Pereda (1987) como los métodos de investigación más utilizados en todas las ciencias para el análisis de un fenómeno, observándolo en su ambiente natural para describirlo lo más detalladamente posible.

Este método, se caracteriza porque: a) la observación se lleva a cabo en el ambiente real donde se produce el movimiento y fenómeno de estudio, y b) el observador, generalmente, se mantiene apartado del lugar donde transcurre la acción, no interviniendo en la misma y no influyendo en el desenlace del movimiento o fenómeno objeto de estudio. En nuestro estudio, la primera característica se cumple al realizar la filmación durante el desarrollo del Campeonato del Mundo y la segunda implica una serie de controles, ya que se ha utilizado unas técnicas de registro que necesitan la participación de un experto (digitalizador) que podría producir un cierto error aleatorio.



### 3.1.1. Sujetos

Se han analizado esquiadores, del más alto nivel internacional, como prueba el hecho de encontrarse disputando entre ellos las medallas del Campeonato del Mundo de la especialidad del Slalom. Los sujetos analizados en un primer estudio, han sido tres hombres indicados para nuestro estudio como SH1, SH2 y SH3 de  $28 \pm 2.65$  años,  $89.67 \pm 2.08$  Kg de peso,  $181 \pm 4.58$  cm. de talla, y con una experiencia (EXP) en competición de  $21 \pm 2.65$  años.

En un segundo estudio hemos analizado a nueve mujeres indicadas para nuestro análisis como SD1, SD2, SD3, SD4, SD5, SD6, SD7, SD8 y SD9 de  $23.33 \pm 3.67$  años,  $64.11 \pm 5.01$  kg de peso,  $168.56 \pm 4.39$  cm de talla y una experiencia en competición de  $17.78 \pm 3.42$  años). Cada deportista analizado está identificado por un código (COD.) que les asigna la Federación Internacional de Esquí (FIS) y con el que participan en todas las competiciones internacionales desde que obtienen su licencia de corredor (obligatoria según reglamento para competir). La relación de sujetos hombres (SH) y sujetos damas (SD) analizados así como sus características, podemos verlos en la **Tabla 3.1.**

En las **Tablas 3.2** y **3.3** podemos observar los resultados relevantes de los sujetos hombres y mujeres analizados respectivamente, conseguidos entre los 10 primeros clasificados y en competiciones disputadas de Copa del Mundo en la modalidad de Slalom anteriores a la celebración del Campeonato del Mundo de Sierra Nevada. Los resultados obtenidos en la temporada 1995-1996 de estos deportistas en esta disciplina, nos ratifican el nivel de rendimiento con el que participaban en esta edición del Campeonato del Mundo. El SH1, que fue quien mejores resultados previos había obtenido, obtuvo el primer puesto al término de la

**Tabla 3.1.** Características de los deportistas analizados, donde **COD**, es el número de licencia internacional de corredor alpino; y **EXP**, se refiere a los años de experiencia en competición.

<b>COD</b>	<b>HOMBRES</b>	<b>PAIS</b>	<b>AÑOS</b>	<b>PESO</b>	<b>TALLA</b>	<b>EXP</b>
290539	SH1	ITA	30.00	92.00	1.82	23.00
420059	SH2	NOR	29.00	89.00	1.85	22.00
420382	SH3	NOR	25.00	88.00	1.76	18.00
	<b>MEDIA</b>		28.00	89.67	1.81	21.00
	<b>DT</b>		2.65	2.08	0.046	2.65

<b>COD</b>	<b>MUJERES</b>	<b>PAIS</b>	<b>AÑOS</b>	<b>PESO</b>	<b>TALLA</b>	<b>EXP</b>
505084	SD1	SUE	26.00	68.00	1.72	21.00
205117	SD2	ALE	21.00	72.00	1.72	14.00
16245	SD3	CHE	22.00	67.00	1.71	17.00
55068	SD4	AUS	29.00	55.00	1.63	20.00
195041	SD5	FRA	29.00	60.00	1.67	21.00
415069	SD6	NZL	20.00	62.00	1.74	15.00
505083	SD7	SUE	20.00	67.00	1.61	17.00
565010	SD8	ESL	22.00	63.00	1.70	17.00
495065	SD9	ESP	21.00	63.00	1.67	11.00
	<b>MEDIA</b>		23.33	64.11	1.68	17.78
	<b>DT</b>		3.67	5.01	0.044	3.42

**Tabla 3.2.** Resultados entre los 10 primeros clasificados en Copa del Mundo de Slalom en sujetos hombres (SH), antes del Campeonato del Mundo de Esquí Alpino de Sierra Nevada, 1996.

SUJETO	FECHA	LUGAR	CATEGORÍA	DISCIPLINA	POSICIÓN
SH1	04-12-1994	Tignes	Copa del Mundo FIS	Slalom	1°
	12-12-1994	Sestriere	Copa del Mundo FIS	Slalom	1°
	20-12-1994	Lech	Copa del Mundo FIS	Slalom	1°
	21-12-1994	Lech	Copa del Mundo FIS	Slalom	1°
	08-01-1995	Garmisch-Partenkir...	Copa del Mundo FIS	Slalom	1°
	15-01-1995	Kitzbuehel	Copa del Mundo FIS	Slalom	1°
	22-01-1995	Wengen	Copa del Mundo FIS	Slalom	1°
SH2	05-03-1989	Furano	Copa del Mundo FIS	Slalom	1°
	10-03-1989	Shiga Kogen	Copa del Mundo FIS	Slalom	2°
	12-08-1989	Thredbo	Copa del Mundo FIS	Slalom	2°
	21-01-1990	Kitzbuhel	Copa del Mundo FIS	Slalom	2°
	11-12-1990	Sestriere	Copa del Mundo FIS	Slalom	2°
	18-12-1990	Madonna di Campiglio	Copa del Mundo FIS	Slalom	1°
	22-12-1990	Kranjska Gora	Copa del Mundo FIS	Slalom	1°
	13-01-1991	Kitzbuhel	Copa del Mundo FIS	Slalom	2°
	10-12-1991	Sestriere	Copa del Mundo FIS	Slalom	3°
	14-12-1993	Sestrieres	Copa del Mundo FIS	Slalom	3°
	09-01-1994	Kranjska Gora	Copa del Mundo FIS	Slalom	2°
	15-01-1995	Kitzbuehel	Copa del Mundo FIS	Slalom	3°
	19-02-1995	Furano	Copa del Mundo FIS	Slalom	3°
	19-03-1995	Bormio	Copa del Mundo FIS	Slalom	1°
SH3	09-01-1993	Garmisch	Copa del Mundo FIS	Slalom	2°
	28-03-1993	Are	Copa del Mundo FIS	Slalom	2°
	19-11-1995	Vail/Beaver Creek,---	Copa del Mundo FIS	Slalom	4°
	01-12-1996	Breckenridge CO	Copa del Mundo FIS	Slalom	4°
	24-11-1996	Park City UT	Copa del Mundo FIS	Slalom	3°

**Tabla 3.3.** Resultados entre las 10 primeras clasificadas en Copa del Mundo de Slalom en sujetos damas (SD), antes del Campeonato del Mundo de Esquí Alpino de Sierra Nevada, 1996.

SUJETO	FECHA	LUGAR	CATEGORÍA	DISCIPLINA	POSICIÓN
SD1	12.03.1995	Lenzerheide	Copa del Mundo FIS	Slalom	8
	30.12.1995	Semmering	Copa del Mundo FIS	Slalom	8
	14.01.1996	Garmisch-Partenkir...	Copa del Mundo FIS	Slalom	6
SD2	06.01.1994	Morzine	Copa del Mundo FIS	Slalom	9
SD3	Ningún resultado encontrado				
SD4	13.03.1990	Vemdalen	Copa del Mundo FIS	Slalom	7
	07.01.1991	Bad Kleinkircheim	Copa del Mundo FIS	Slalom	5
	11.03.1991	Lake Louise	Copa del Mundo FIS	Slalom	8
	20.03.1991	Waterville Valley	Copa del Mundo FIS	Slalom	4
	06.01.1993	Maribor	Copa del Mundo FIS	Slalom	6
	17.01.1993	Cortina	Copa del Mundo FIS	Slalom	5
	24.01.1993	Haus Im Ennstal	Copa del Mundo FIS	Slalom	8
	18.11.1995	Vail/Beaver Creek,...	Copa del Mundo FIS	Slalom	7
	17.12.1995	St. Anton	Copa del Mundo FIS	Slalom	6
SD5	24.01.1993	Haus Im Ennstal	Copa del Mundo FIS	Slalom	1
	14.03.1993	Lillehammer Hafjell	Copa del Mundo FIS	Slalom	3
	19.03.1993	Vemdalen	Copa del Mundo FIS	Slalom	2
	06.01.1994	Morzine	Copa del Mundo FIS	Slalom	3
	09.01.1994	Altenmarkt	Copa del Mundo FIS	Slalom	4
	27.11.1994	Park City, UT	Copa del Mundo FIS	Slalom	5
	28.01.1996	Saint Gervais	Copa del Mundo FIS	Slalom	5
SD6	29.12.1995	Semmering	Copa del Mundo FIS	Slalom	6
	30.12.1995	Semmering	Copa del Mundo FIS	Slalom	5
	07.01.1996	Maribor	Copa del Mundo FIS	Slalom	3
	28.01.1996	Saint Gervais	Copa del Mundo FIS	Slalom	1
SD7	02.03.1992	Sundsvall	Copa del Mundo FIS	Slalom	2
	06.12.1992	Steamboat Springs	Copa del Mundo FIS	Slalom	1
	12.12.1993	Veysonnaz	Copa del Mundo FIS	Slalom	1
	06.01.1994	Morzine	Copa del Mundo FIS	Slalom	1
	18.12.1994	Sestriere	Copa del Mundo FIS	Slalom	2
	12.03.1995	Lenzerheide	Copa del Mundo FIS	Slalom	1
	19.03.1995	Bormio	Copa del Mundo FIS	Slalom	2
	22.12.1995	Veysonnaz	Copa del Mundo FIS	Slalom	1
	29.12.1995	Semmering	Copa del Mundo FIS	Slalom	1
	SD8	26.02.1995	Maribor	Copa del Mundo FIS	Slalom
19.03.1995		Bormio	Copa del Mundo FIS	Slalom	3
17.12.1995		St. Anton	Copa del Mundo FIS	Slalom	2
22.12.1995		Veysonnaz	Copa del Mundo FIS	Slalom	2
14.01.1996		Garmisch-Partenkir...	Copa del Mundo FIS	Slalom	1
SD9	Ningún resultado encontrado				

competición. Y en el Slalom Damas, la SD7 fue quien finalmente se impuso en la clasificación final, obteniendo la medalla de oro y confirmando el buen momento de forma que atravesaba, atendiendo a los resultados obtenidos en las pruebas previas al campeonato.

De cien participantes en sujetos hombres en la primera manga de las dos de las que consta la disciplina del Slalom, se escogió la filmación de tres sujetos, que finalizaron en el sexto, octavo y décimo lugar, al término de la primera manga, y primero, séptimo y octavo, respectivamente en la clasificación final de la prueba. En damas, filmamos la segunda manga, y de las treinta y tres deportistas que tomaron la salida, escogimos a nueve, de las cuales seis consiguieron clasificarse entre las ocho primeras al término de la prueba. Seleccionamos a aquellos esquiadores cuya filmación fue más nítida y completa para el análisis fotogramétrico.

### **3.1.2. Material y Métodos**

Al tratarse de un estudio donde se ha utilizado el método inverso, es decir, se parte del efecto (gesto deportivo en alta competición) para deducir las causas que interaccionan en su eficacia, nos ha permitido realizar un estudio descriptivo de las variables más significativas que determinan la eficacia en el Slalom.

#### **3.1.2.1. Técnicas de registro**

Dentro de los registros indirectos utilizados en la Biomecánica Deportiva para el estudio del movimiento humano, debemos destacar las Técnicas Fotogramétricas Indirectas como las más utilizadas para el análisis biomecánico del deporte. Según el *Manual of Photogrammetry* (Slama, 1980) el término

fotogrametría se define como «*el arte, ciencia, y tecnología requerida para la obtención de información fidedigna acerca de objetos físicos y el entorno a través de procesos de lectura, almacenamiento, e interpretación de imágenes fotográficas y modelos de energía radiada magnéticamente u otros fenómenos*».

Los sistemas fotogramétricos de registro indirecto son los más aplicados en el ámbito deportivo ya que su utilización hace posible el análisis del movimiento en condiciones competitivas sin que el atleta se vea afectado (Soto, 1995). A pesar de determinados inconvenientes, como es el hecho de que la digitalización sea realizada manualmente, produciendo el consiguiente error aleatorio, los sistemas de registro indirecto son la base tecnológica y metodológica más importante para el análisis deportivo, de ahí que hayan sido elegidos para la realización de esta investigación.

Siguiendo a Gutiérrez (1990), la utilización de un sistema de análisis fotogramétrico indirecto es factible siempre y cuando:

a) El estudio biomecánico utilizando técnicas fotogramétricas, se realice sobre un modelo real en competición, y no sobre modelos contruidos, en entrenamiento, ya que el gesto sería diferente como consecuencia de las diferencias existentes en el nivel de activación en ambas situaciones. Somos conscientes de que la búsqueda de situaciones de máxima activación permitirá mantener constante en su máxima intensidad la fuerza muscular y, consecuentemente eliminar el posible error contaminante producido por la variabilidad en el nivel de fuerza muscular debida a una baja activación.

En este sentido la alta competición se considera como la situación ideal de activación máxima. Durante la práctica del esquí alpino podemos encontrar situaciones donde la activación es máxima, como es el caso de las competiciones, donde el aliciente de ganar, genera un nivel de activación que podemos considerar

máximo cuando hablamos de deportistas de elite. En este tipo de práctica deportiva la eficacia de la técnica empleada influye decisoriamente en el rendimiento final. Por este motivo, hemos escogido las competiciones que se llevaron a cabo en la disciplina de Slalom (hombres y mujeres) con motivo de la celebración de los Campeonatos del Mundo de Esquí Alpino, en la estación de Esquí y Montaña de Sierra Nevada (1996), Granada (España).

b) El gesto analizado tenga un alto grado de automatismo en la ejecución. Teniendo en cuenta lo dicho, se ha escogido como gesto de análisis la realización de un viraje en una de las puertas previas a la realización de un cambio de ritmo en la modalidad del slalom, que son de obligada situación en el transcurso de una prueba de esta disciplina según establece el reglamento específico. Además para ello se han escogido deportistas de experiencia consagrada en la competición de Slalom, que garantizan una ejecución que podríamos considerar estable temporalmente, de la técnica adaptada a sus características individuales, ya que sólo los mejores deportistas del momento participan en una competición de esta naturaleza.

El intento de controlar todas las variables contaminadoras, es algo inherente a cualquier procedimiento que pretende ser objetivo y científico. Por ello, la mayor parte de los análisis basados en la utilización de estas técnicas, se han centrado en gestos de bucle abierto (Oña, 1994), o tareas discretas (Schmidt, 1988), es decir, gestos con un principio y un fin perfectamente delimitados que no impliquen procesos atencionales ni retroalimentación durante su misma ejecución.

En el caso de la Tesis que presentamos, nos encontramos ante una tarea discreta o de bucle abierto, como es un viraje en Slalom, aunque con algunos matices, donde las principales contingencias externas se refieren a las características técnicas de la pista de competición y la situación ambiental donde

realizamos la toma de datos como son la textura y tipología de la nieve (siempre cambiantes), y el desnivel, la pendiente, la longitud, número de puertas (siempre constante). No hemos tenido en cuenta la variación del medio donde se desarrolla el movimiento, pues los corredores filmados tenían dorsales de salida cercanos, y la duración de la bajada de cada uno no superaba el minuto.

### ***3.1.2.2. Las técnicas fotogramétricas tridimensionales***

La mejora en el rendimiento deportivo requiere la utilización de unos métodos y técnicas que nos permitan describir el movimiento con precisión, dar explicación de las causas que los producen y detectar los factores que determinan su eficacia. A pesar de determinados inconvenientes, los sistemas de registro fotogramétrico indirecto son la base tecnológica y metodológica más importante para el análisis deportivo.

Una de estas técnicas que permite cuantificar de forma fiable el movimiento humano sin interferir en su ejecución, es la fotogrametría, tanto bidimensional (2D), como tridimensional (3D), la cual emplea mediciones precisas desde fotografías, la cinematografía, vídeo y otros sistemas, para localizar puntos o marcadores específicos y el análisis sistemático para reconocer e identificar objetos.

En esta Tesis, hemos utilizado técnicas fotogramétricas tridimensionales indirectas basadas en la filmación del gesto seleccionado a través del vídeo. Todo el sistema de registro empleado está basado en una actualización del sistema de análisis fotogramétrico *CYBORG* (versiones 2.0 y 3.0) desarrollado por el Laboratorio de Biomecánica del Departamento de Educación Física y Deportiva de la Universidad de Granada. Este sistema ha sido validado suficientemente y está siendo utilizado en

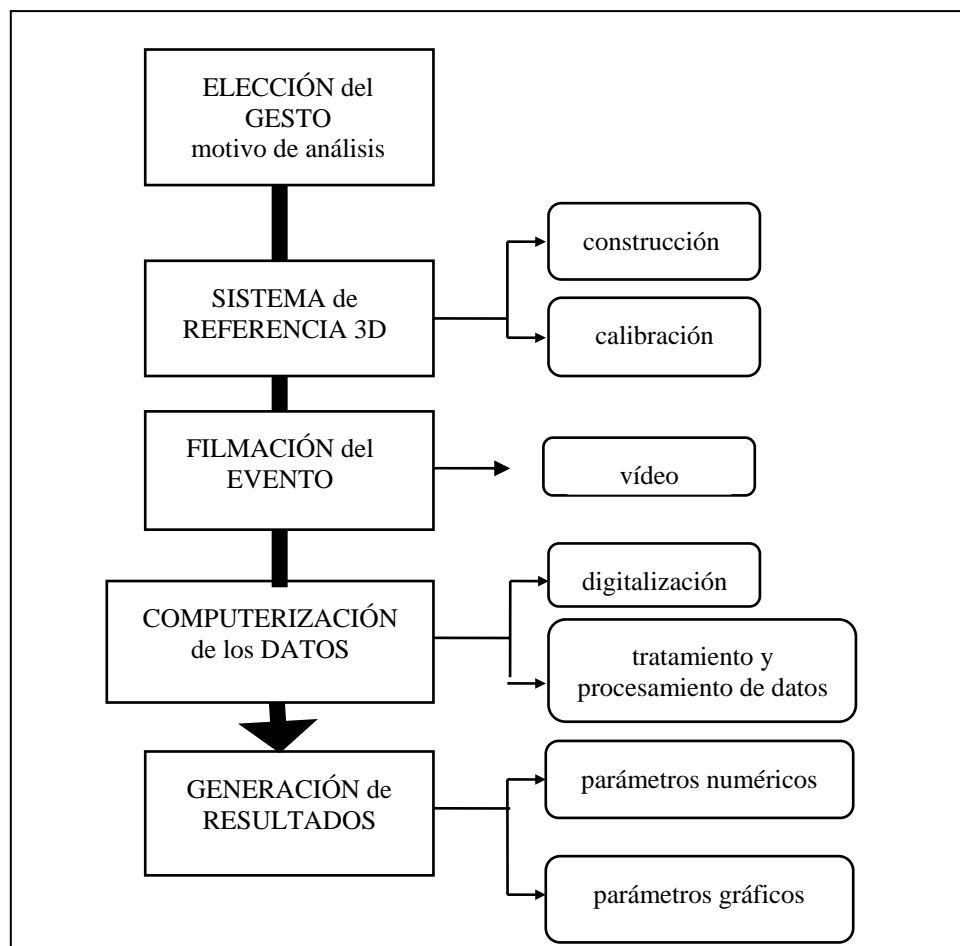


diversos proyectos de investigación aplicados al ámbito del deporte.

En las técnicas fotogramétricas tridimensionales aplicadas a los sistemas biológicos se considera al deportista como una estructura de sólidos, supuestamente rígidos, compuesta por un número de segmentos variable, de los cuales se conocen ciertos parámetros inerciales como la masa y la localización de su centro de gravedad. Partiendo de este sistema coordinado, es posible describir y dar explicación de las causas que determinan su eficacia (factores), partiendo del registro de las posiciones espaciales que adoptan los puntos que determinan los segmentos del sistema. Para ello, es necesario seguir el proceso secuencial que podemos observar en la **Figura 3.1**, y que se describe a continuación:

En primer lugar, tenemos que *seleccionar el gesto motivo de análisis* (el cambio de dirección en la disciplina de Slalom en el esquí alpino) y *elegir un sistema de referencias* (que describiremos posteriormente) que se adecue al gesto que queremos analizar. Una vez que tenemos claro el movimiento deportivo que vamos a estudiar y adecuado el sistema de referencias que vamos a utilizar, procedemos a la filmación del gesto.

Para la *filmación del evento* en 3D, son necesarias dos cámaras de cine, vídeo u otro sistema de registro de alta velocidad (entre 50 y 500 Hz), que destacaremos en el apartado de material empleado, cada una de las cuales obtiene un ángulo de visión diferente del gesto que se pretende estudiar. Con anterioridad o posteriormente a la filmación del gesto y sin mover las cámaras, se filma el sistema de referencias utilizado (Rz) ubicado en el espacio donde se desarrolla el movimiento motivo de análisis. La utilización del vídeo como sistema de registro nos permite obtener las imágenes sin interferir en el

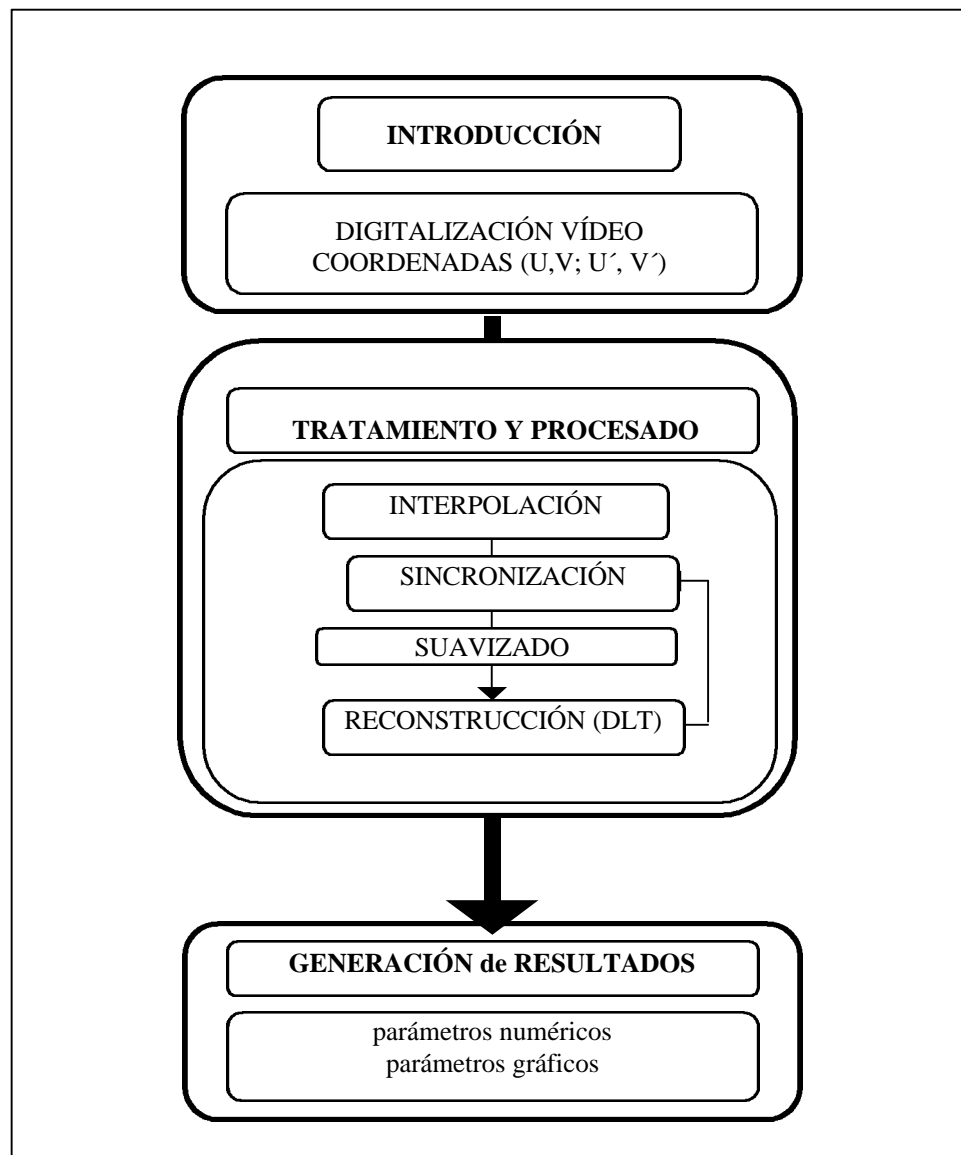


**Figura 3.1.** Metodología secuencial del sistema fotogramétrico empleado en esta Tesis (adaptado de Soto, 1995).

movimiento, algo que es realmente importante cuando se trata de analizar un gesto verdaderamente eficaz, el cual suele darse durante el desarrollo de competiciones importantes y no durante los entrenamientos o en condiciones de laboratorio.

Por ello, hemos utilizado cámaras colocadas estáticamente sobre trípodes que descansaban sobre plataformas de madera fijas e insertadas sobre la nieve, registrando el gesto seleccionado sin modificar su posición, ya que la reconstrucción 3D de las coordenadas, utilizando este sistema, resulta más sencilla, y no necesita tener en cuenta otros puntos de referencia que no siempre pueden estar disponibles en las filmaciones realizadas en el ámbito competitivo, por decisión de la organización del evento. Prueba de ello tenemos en los estudios de Nachbauer et al., (1996), Mössner et al., (1995) utilizando cámaras móviles, en el análisis de la fase de recepción de un salto en la disciplina de velocidad del Descenso, en donde si se les permitió colocar otros puntos de referencia en la pista antes y después del evento.

Después del proceso de filmación, comienza el *proceso de computerización de los datos* (que podemos observar en la **Figura 3.2**), tanto de las imágenes del gesto como las del sistema de referencias. Este proceso de computerización comienza con la *digitalización* de los puntos que definen los sólidos rígidos del sistema de estudio y el sistema de referencias, lo que nos permite obtener las coordenadas planas que representan las posiciones adoptadas por el deportista, así como del sistema de referencias. Ésta, puede realizarse de forma automática (habiendo utilizado marcadores articulares en el sujeto analizado) o manualmente, nosotros la realizamos en este estudio manualmente. Con este proceso se obtienen dos grupos de coordenadas planas que corresponden a las posiciones que adoptan los segmentos en cada imagen ( $U, V; U', V'$ ) y otras dos que corresponden a las coordenadas de los puntos que determinan el sistema de referencia ( $Rz$ ). El tipo de dispositivo utilizado es interno



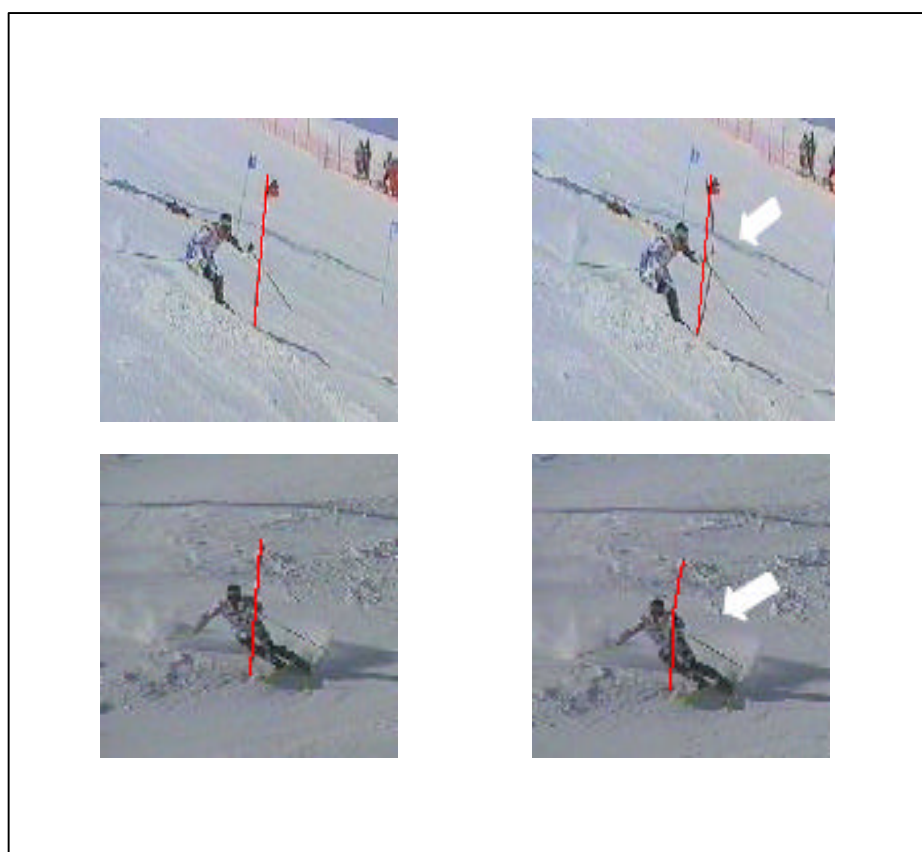
**Figura 3.2.** Fases secuenciales del proceso de captación y computerización de los datos utilizado para el análisis del viraje en el Slalom (adaptado de Soto, 1995).

y consiste en una tarjeta sintonizadora de la señal de vídeo que nos permite introducir la imagen, reproducida por un magnetoscopio, dentro de un ordenador. Utilizando este sistema de filmación, la obtención de los resultados del análisis reduce el tiempo transcurrido desde la filmación hasta la administración de la información al entrenador y/o esquiador en este caso.

Obtenidas las coordenadas planas ( $U, V$ ;  $U', V'$ ) de cada filmación se procede a *interpolación de los datos* a una frecuencia adecuada, mediante la función spline de quinto grado, y a aplicar ciertas matrices de rotación que nos permitirán seleccionar el ángulo de visión deseado. En el análisis del viraje del Slalom, y debido a que la frecuencia de muestreo de las cámaras era de 50 Hz, hemos optado por interpolar a 100 Hz, en las dos filmaciones digitalizadas. De esta forma hemos conseguido obtener en el mismo intervalo de tiempo digitalizado, información de un mayor número de posiciones, que nos facilitan la ulterior sincronización.

El paso siguiente a la interpolación, es la *sincronización automática* de las cámaras. Para sincronizar las cámaras, es decir, la correspondencia en el tiempo de las imágenes planas digitalizadas, hemos tenido en cuenta el momento de contacto con el palo de viraje en ambas cámaras (**Figura 3.3**). Una vez detectados los fotogramas en los que sucede el evento al mismo tiempo, se eliminan las imágenes de los extremos del intervalo que no se corresponden, dándonos como resultado final dos secuencias con idéntico número de fotogramas, sincronizadas en el tiempo. La representación gráfica de las imágenes de ambas tomas (lateral y frontal) mediante una estructura alámbrica fruto de la digitalización realizada a priori, es mostrada por el sistema mediante la visualización de 3 fotogramas (**Figura 3.4**).

Para comprobar que dicha sincronización visual por eventos no fuera errónea se aplicó el sistema de sincronización matemática descrito por Gutiérrez



**Figura 3.3.** Visualización del momento de contacto del esquiador con el palo de viraje en el Slalom en la filmación desde la cámara lateral y frontal.

---



**Figura 3.4.** Módulo de sincronización basado en la detección de eventos visuales del sistema CYBORG v. 2.0.

y Martínez (2000). La base teórica de este método matemático de sincronización reside en el error que se produce en la reconstrucción de las coordenadas 3D, mediante los algoritmos DLT, de un punto que está en movimiento, a partir de dos proyecciones que no coinciden en el tiempo. Cuando esto ocurre, la reconstrucción del punto en el espacio, mediante los algoritmos DLT  $(x, y, z)$ , no coincide con la posición espacial de los puntos que han sido digitalizados.

Obtenidas las coordenadas planas  $(U, V; U', V')$  de los puntos que determinan la estructura de segmentos del deportista durante el tiempo que dura su gesto, interpolados datos a una frecuencia de 100Hz y sincronizadas las cámaras, es necesario considerar la existencia de ciertos errores en el proceso de obtención de las coordenadas espaciales, unos asociados a las lentes de las cámaras y otros a la obtención de las coordenadas digitalizadas debidos al error aleatorio producido por la persona que debe realizar la digitalización. Este proceso se denomina *suavizado*. Así surge la necesidad de evaluar la primera y segunda derivada temporal de las funciones posición-tiempo, utilizando *técnicas de ajuste* de los puntos que determinan la estructura de sólidos. Para ello se utilizan diferentes tipos de técnicas como por ejemplo las basadas en diferencias finitas de primer y segundo orden, mínimos cuadrados, filtrados digitales, series de Fourier, etc. (Gianikellis y Gutiérrez, 1998), aunque la más extendida es la que se basa en el ajuste de datos a través de las funciones *spline* de quinto grado, donde el ajuste se hace a trozos en lugar de utilizar un solo polinomio (Wood y Jennings, 1979).

La utilización de la función spline de quinto grado persigue un doble objetivo: por un lado se pretende minimizar el error de ajuste y, por otro lado, conseguir una curva suave (*suavizado*). Se trata pues, de pasar la curva de ajuste a cierta distancia de las coordenadas espaciales, aceptando que los



valores de dichas coordenadas están afectados por *ruido blanco* de media cero y varianza ( $s^2$ ), de manera que se minimice la función ( $C_p$ ), compuesta por un término que expresa el *error intrínseco de la medida* y otro término que expresa la *suavidad de la curva de ajuste (E-1)*.

E-1

$$C_p = \sum_{i=1}^n w_i \left\{ \Psi_i - S_p(t_i) \right\}^2 + p \int_{-\infty}^{\infty} |S^m p(t)|^2 dt$$

En opinión de Soto (1995), los splines de quinto grado permiten el ajuste de forma dinámica, favoreciendo la obtención de diversos tipos de curvas dependiendo de un parámetro denominado como factor de suavizado, el cual debe ajustarse a tenor del comportamiento y rango de error de los datos. Se trata de un parámetro numérico cuyo valor oscila entre 0 y 1, de tal forma que, valores próximos a 1, producen curvas que suavizan la trayectoria. Y los valores próximos a 0, describen trayectorias cercanas a las coordenadas digitalizadas. Otros autores han utilizado splines cúbicos tal y como realiza el sistema KWON3D (Kwon, 1991) que ha sido utilizado en otros análisis biomecánicos del esquí alpino (Nachbauer et al , (1996), Nachbauer y Kaps (1995), Mössner et al (1995), Miller et al , (1993), Forg-Rob y Nachbauer (1988), en el slalom concretamente.

Interpoladas las coordenadas planas (U,V; U',V'), sincronizadas las cámaras y suavizados los puntos, el siguiente paso dentro de este proceso de computerización, será obtener las coordenadas espaciales de los puntos que determinan los sólidos rígidos del sistema. A este proceso se le ha denominado *reconstrucción espacial de las coordenadas planas*, y para ello se pueden utilizar diferentes métodos. El más utilizado en el análisis del movimiento humano es el que hace referencia a la transformación lineal directa (DLT).

Utilizando los algoritmos DLT, desarrollados por Abdel Aziz y Karara (1971) es posible realizar una transformación lineal directa de las coordenadas de la referencia a las coordenadas espaciales de los puntos que definen los sólidos rígidos del sistema. Para ello se obtienen las once constantes DLT, mediante el siguiente sistema matricial (**E-2**).

E-2

$$\begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 & -U_1 & x_1 & -U_1 & y_1 & -U_1 & z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 & -U_2 & x_2 & -U_2 & y_2 & -U_2 & z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - \\ - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - \\ x_n & y_n & z_n & 1 & -U_n & x_n & -U_n & y_n & -U_n & z_n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -V_1 & x_1 & -V_1 & y_1 & -V_1 & z_1 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -V_2 & x_2 & -V_2 & y_2 & -V_2 & z_2 & x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - \\ - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -V_n & x_n & -V_n & y_n & -V_n & z_n & x_n & y_n & z_n & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \\ F \\ G \\ H \\ J \\ K \\ L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ - \\ - \\ U_n \\ V_1 \\ V_2 \\ - \\ - \\ V_n \end{pmatrix}$$

La obtención de las coordenadas espaciales (x,y,z) del punto en el espacio se resuelve mediante un sistema sobredimensionado, a partir de las coordenadas de los dos planos de imagen (**E-3**).

E-3

$$\begin{pmatrix} (A_1 & - & E_1 & U) & (B_1 & - & F_1 & U) & (C_1 & - & G_1 & U) \\ (H_1 & - & E_1 & V) & (J_1 & - & F_1 & V) & (K_1 & - & G_1 & V) \\ (A_2 & - & E_2 & U') & (B_2 & - & F_2 & U') & (C_2 & - & G_2 & U') \\ (H_2 & - & E_2 & V') & (J_2 & - & F_2 & V') & (K_2 & - & G_2 & V') \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (U & - & D_1) \\ (V & - & L_1) \\ (U' & - & D_2) \\ (V' & - & L_2) \end{pmatrix}$$

Para ello es necesario considerar que el sistema está en movimiento y el desarrollo del DLT requiere que los puntos digitalizados corresponden, en cada

plano de imagen, a una misma posición espacial. Esto se consigue con la sincronización previa ya realizada de las imágenes de las dos cámaras utilizadas en la filmación, convirtiéndose en el siguiente paso de este proceso.

Si la posición de los segmentos en el espacio se considera un vector posición determinado por dos puntos conocidos, el ángulo de dos segmentos contiguos puede determinarse mediante su producto escalar. Usando de nuevo la función spline espacio-tiempo, es posible, también, obtener las velocidades y aceleraciones de cada uno de los puntos, así como del desplazamiento angular, determinando su primera y segunda derivada, respectivamente, lo que nos permitirá cuantificar la descripción del gesto, es decir, realizar el análisis cinemático.

Finalizado el proceso de computerización de los datos, y siguiendo e proceso secuencial que podemos observar en la Figura 3.2, llegamos a la *generación de resultados*, tanto de los parámetros numéricos como de los parámetros gráficos. Los resultados han sido deducidos con los diversos módulos de gráficos y obtención de variables numéricas incluidos en CYBORG v.3.0 (Soto, 1996), siendo requerida en algunos casos la elaboración e implementación de algunos algoritmos de cálculo específicamente desarrollados para este estudio.

Para la representación grafica de los resultados generados utilizaremos dos métodos, claramente diferenciados. En un primer lugar, dividiremos el viraje analizado en tramos de 1 metro de longitud, comenzando desde el inicio de la secuencia hasta el final del viraje analizado en todos y cada uno de los sujetos estudiados. Para ello hemos calculado la coordenada del CG en la componente X (dirección del movimiento) del sistema de referencias, y ubicado el fotograma

de inicio y fin del viraje analizado para a partir de aquí, y desde la coordenada X del CG en el fotograma inicial, establecer unidades de 1 m hasta llegar al final. Se cogerá por defecto, en todos los sujetos, el fotograma más cercano por debajo a la distancia establecida. Además, para el estudio individual que realizaremos en sujetos hombres, añadiremos posiciones espaciales, que más adelante serán descritas, y que hemos ubicado dentro de los tramos de viraje señalados, que nos servirán para justificar y dar explicación a los cambios de valor de las variables estudiadas y designar qué tramos de viraje podemos considerar críticos.

En segundo lugar, para comprobar las variables intragrupo en la muestra de esquiadoras damas analizada y obtener su estadística descriptiva, los datos relativos a las variables estudiadas se ha interpolado en función del porcentaje del tiempo total transcurrido desde que el esquiador inicia el primer tramo (T1) y termina el sexto tramo (T6). De esta forma se ajustan todos los valores a un determinado valor temporal que es igual para todas.

### ***3.1.2.3. Modelo biomecánico del esquiador***

El punto de partida de este análisis biomecánico ha sido la definición del modelo mecánico del cuerpo humano que se va a utilizar. El modelo estaría incompleto si sólo se caracterizaran sus segmentos y puntos anatómicos, haciendo falta incluir en el mismo ciertos segmentos que representan el equipo de competición necesario para esquiar.

El modelo humano diseñado para el análisis del esquiador está compuesto por 19 segmentos (14 correspondientes al cuerpo del deportista y 6 pertenecientes al equipamiento específico) y 28 puntos (22 articulares y 6 correspondientes a los

implementos deportivos) que podemos observar en la **Figura 3.5** y **3.6**, respectivamente. La mayor parte de los marcadores se corresponden con puntos internos correspondientes a centros de rotación articulares, así como los extremos proximal y distal de los implementos, habiéndose seleccionado las localizaciones que habitualmente se recomiendan en los estudios fotogramétricos de biomecánica deportiva.

Adicionalmente ha sido necesaria la localización de otra serie de puntos ubicados dentro del sistema de referencias, correspondientes al palo de viraje y la superficie de nieve sobre la cual se producía el desplazamiento. La localización de estos puntos adicionales fue imprescindible para su utilización en el análisis de los resultados.

Algunos factores como son los parámetros antropométricos y el equipamiento propio para cada uno de los esquiadores analizados (vestimenta), suponen contingencias internas, que hemos desestimado, ya que tanto la morfología como las características técnicas del material utilizado por cada corredor, eran prácticamente las mismas.

#### ***3.1.2.4. Parámetros Inerciales del esquiador***

Este modelo utiliza una adaptación de los parámetros inerciales aportados por Leva (1994), de ahí que se hayan establecido los segmentos y localizaciones puntuales definidas por este autor para el modelado del cuerpo humano, así como otras localizaciones necesarias para la determinación de los parámetros derivados de los implementos deportivos propios del esquí como son los bastones, las botas y los esquís (ver **Tabla 3.4**).



1	PIE DRCHO	11	ANTEBRAZO IZQDO.
2	PIERNA DRCHA.	12	MUÑECA IZQDA.
3	MUSLO DRCHO.	13	MANO IZQDA
4	BRAZO DRCHO.	14	TRONCO
5	ANTEBRAZO DRCHO.	15	CABEZA
6	MANO DRCHA.	16	ESQUÍ DRCHO.
7	PIE IZQDO.	17	ESQUÍ IZQDO.
8	PIERNA IZQDA.	18	BASTÓN DRCHO.
9	MUSLO IZQDO.	19	BASTÓN IZQDO.
10	BRAZO IZQDO.		

**Figura 3.5.** Segmentos utilizados para el modelado humano del esquiador alpino en la disciplina del slalom.



**Figura 3.6** Puntos utilizados para el modelado humano del esquiador alpino en la disciplina del slalom.

**Tabla 3.4.** Parámetros inerciales del esquiador obtenidos a partir de los valores medios del vector posición y el peso relativo del equipamiento específico para la práctica del esquí en Slalom.

Nº	SEGMENTO	VECTOR POSICIÓN (*)	PESO (*)	Nº	SEGMENTO	VECTOR POSICIÓN (*)	PESO (*)
1	PIE DRCHO	0.441500	0.013700	11	ANTEBRAZO IZQDO.	0.451500	0.016200
2	PIERNA DRCHA.	0.455400	0.043300	12	MANO IZQDA	0.787200	0.006100
3	MUSLO DRCHO.	0.424100	0.141700	13	TRONCO	0.437800	0.434600
4	BRAZO DRCHO.	0.498100	0.027100	14	CABEZA	0.402700	0.069400
5	ANTEBRAZO DRCHO.	0.451500	0.016200	15	ESQUÍ DRCO.	0.303	3.090
6	MANO DRCHA.	0.787200	0.006100	16	ESQUÍ IZQDO.	0.303	3.090
7	PIE IZQDO.	0.441500	0.013700	17	BASTÓN DRCHO.	0.294	0.320
8	PIERNA IZQDA.	0.455400	0.043300	18	BASTÓN IZQDO.	0.294	0.320
9	MUSLO IZQDO.	0.424100	0.141700	19	BOTA DRCHA	0.217	2.360
10	BRAZO IZQDO.	0.498100	0.027100	20	BOTA IZQDA	0.217	2.360

(\*) % con respecto a 1



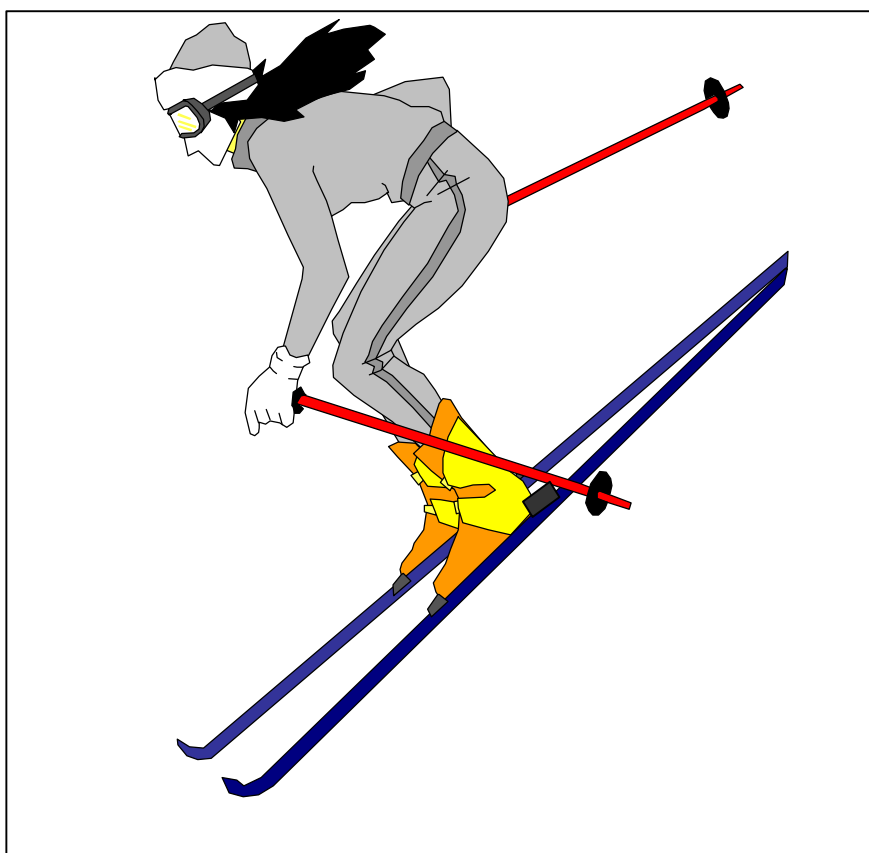
En la **Figura 3.7**, podemos observar los implementos deportivos en un esquiador. Los parámetros inerciales de los implementos se han obtenido a partir de los valores medios de los vectores posición del CG y de la masa de varias marcas, al ser todas ellas muy similares. Estos valores han sido calculados a partir de la determinación del CG de cada implemento deportivo necesario para la práctica del esquí en la disciplina del Slalom, cuyo proceso se describe más adelante.

#### ***3.1.2.5. Sistema de referencia***

Tal y como hemos descrito anteriormente, para la obtención de las coordenadas espaciales que definen el sistema coordinado motivo de análisis, es imprescindible la utilización de un sistema de referencia, el cual es la base sobre la cual se construye el algoritmo de la DLT necesario para la reconstrucción 3D de las coordenadas planas obtenidas de la filmación. Gran parte de los errores producidos en la reconstrucción 3D de las coordenadas se basa en la incorrecta construcción, calibración y digitalización del sistema de referencia.

El sistema de referencia utilizado en esta Tesis tiene las siguientes características: rígido, ligero para el transporte, modular, desarmable y montable en poco tiempo, y con forma geométrica que permita una fácil detección de los puntos que lo definen. Los aspectos relacionados con la forma geométrica ideal y el número de puntos óptimo que debe de tener el sistema de referencias, para que el grado de precisión obtenido en la reconstrucción de las coordenadas espaciales sea el máximo posible, es un área de análisis muy frecuente en la bibliografía de Biomecánica.

Posteriormente y para los cálculos que obtendremos una vez establecidas las coordenada 3D, necesitamos definir un sistema de referencia inercial. Para este



**Figura 3.7.** Implementos deportivos en un esquiador: bastones, botas y esquís.

---

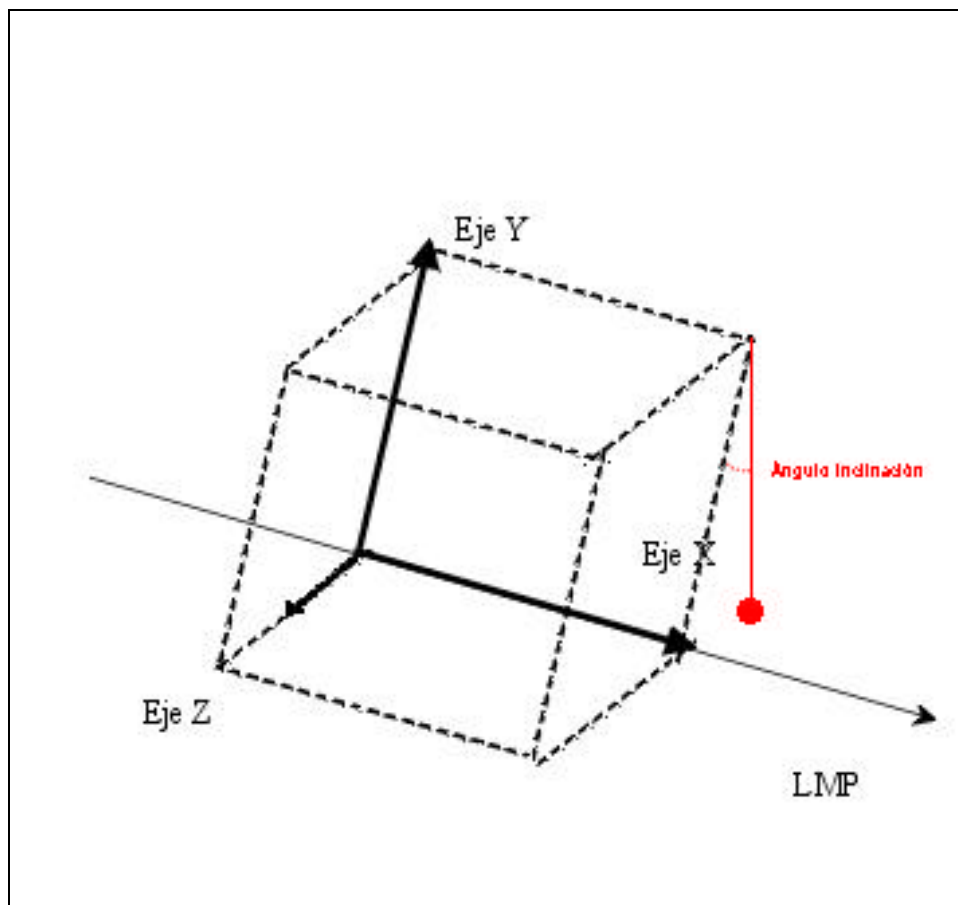
estudio hemos utilizado sistema de referencia que no tiene en cuenta la inclinación de la pendiente para realizar los cálculos. En este sistema de referencia, el eje horizontal X, coincide con la inclinación de la pista y la línea de máxima pendiente (LMP), el eje vertical Y es normal a la citada superficie y el eje Z es paralelo a la pendiente y perpendicular a los dos anteriores, tal y como podemos apreciar en la **Figura 3.8**. El ángulo de inclinación de la pista es de 24° en hombres y de 16° en damas y ha sido calculado con una plomada.

Se ha optado por un tipo de sistema que abarca prácticamente todo el espacio que se necesita para realizar un viraje en Slalom, teniendo en cuenta la separación de las puertas (entre 0.75 a 15 m, según reglamento específico). Por este motivo, y dado que el espacio a cubrir es relativamente grande, se ha construido un sistema de referencia formado por módulos como el que podemos ver en la **Figura 3.9**, de estructura indeformable, desmontable y modular, fácilmente manejable, que está formada con 28 barras cilíndricas de aluminio de 2 cm de diámetro, de 1.5 m de longitud, que se enroscan en 16 crucetas por sus extremos. Estas crucetas o puntos de unión de acero, detalladas en la **Figura 3.10**, son cubos de 5 cm<sup>3</sup> provistos de entradas en sus 6 lados que permiten el acoplamiento de hasta 6 barras.

Tras el montaje de la estructura se obtiene un polígono regular de base rectangular de 13.5 m<sup>3</sup> (6 m de longitud por 1.5 m de profundidad, por 1.5 m de altura), que podemos observar en la **Figura 3.11**, sobre la nieve. Debido a su estructura modular, este sistema de referencia puede ser ampliado por cualquiera de sus lados, para cubrir el volumen espacial que sea necesario.

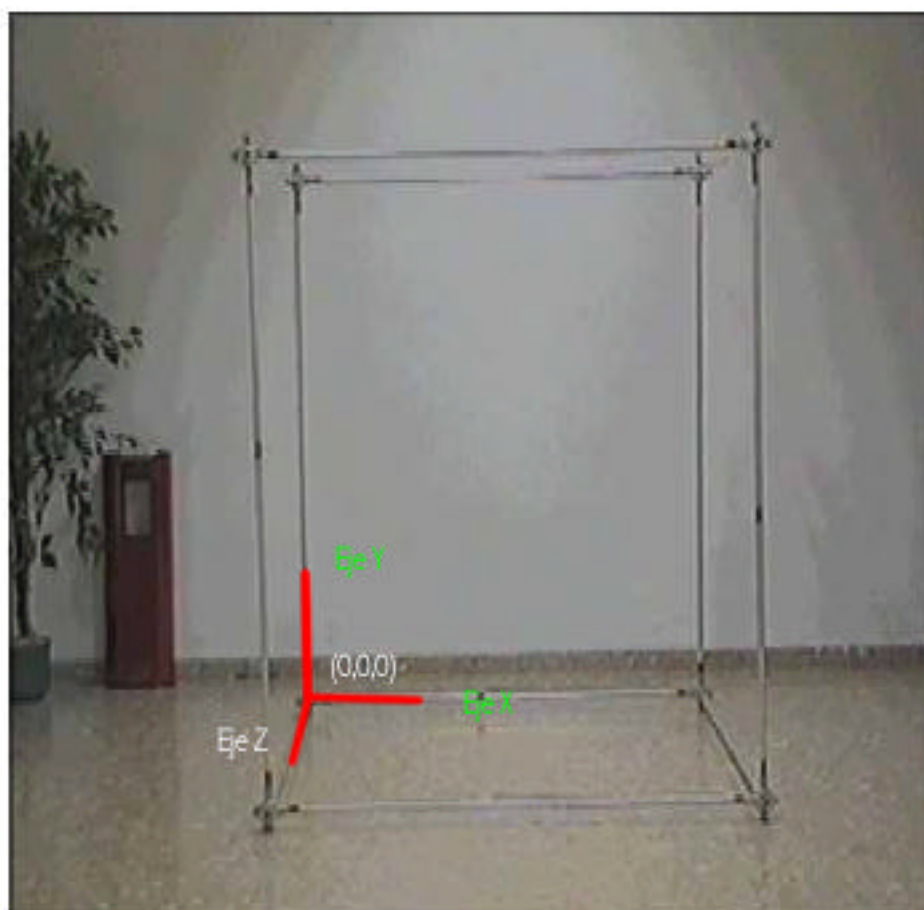
#### **3.1.2.6. Material de registro**

Al ser un estudio 3D, hemos requerido dos cámaras de vídeo Panasonic S-



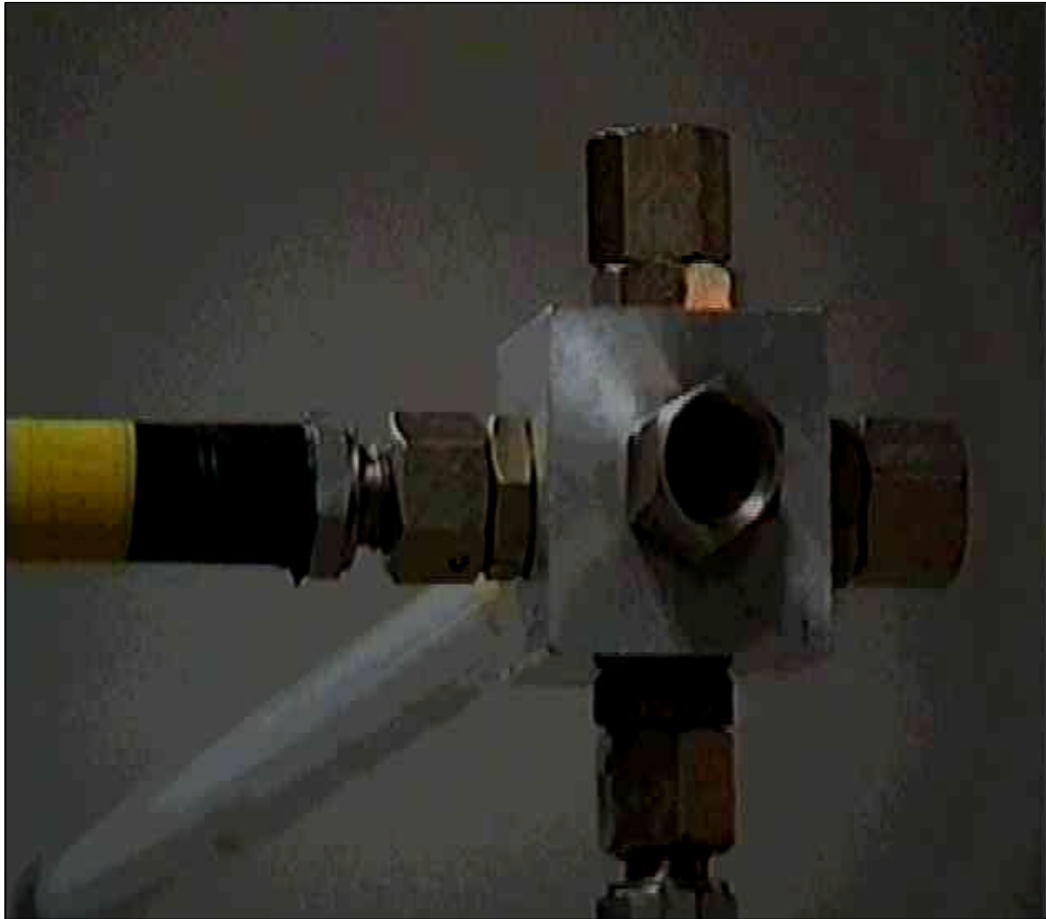
**Figura 3.8.** Sistema de referencia inercial utilizado en esta Tesis, donde LMP es la Línea de Máxima Pendiente.

---



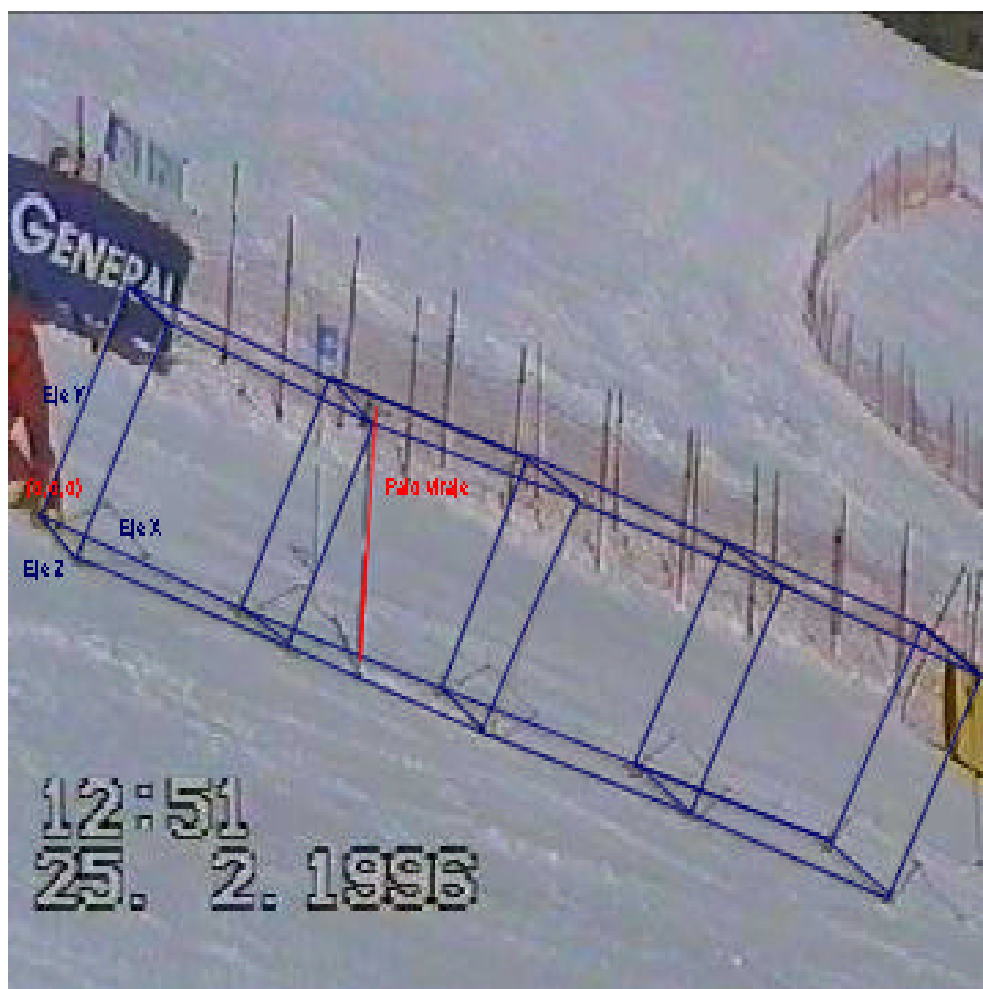
**Figura 3.9.** Sistema de referencia modular construido para el análisis biomecánico del viraje en el Slalom.

---



**Figura 3.10.** Detalle de las crucetas diseñadas para el sistema de referencia construido en el análisis del viraje en Slalom.

---



**Figura 3.11.** Sistema de referencia para el análisis biomecánico del viraje en Slalom utilizado en esta Tesis.

VHS NV-MS4 sobre trípodes, regulando la velocidad de obturación a 1/2000. Además también se ha utilizado una cámara Sony Handicap para tomas generales, grabaciones del entorno en el que se desarrollará la filmación, así como los primeros planos del paso de los esquiadores.

Para la reproducción del movimiento filmado hemos utilizado un magnetoscopio Panasonic MS5 SVHS (**Figura 3.12**) que nos permite obtener 50 campos por segundo. La tarjeta sintonizadora ha sido una VídeoBlaster de Creative Lab.

En esta Tesis, hemos utilizado la digitalización manual ya que es la alternativa más habitual y útil en el ámbito de la Biomecánica Deportiva, ante la imposibilidad de emplear marcadores epidérmicos en los esquiadores que competían, lo cual habría posibilitado la digitalización automática en condiciones de competición. Para la digitalización manual de las imágenes obtenidas de la filmación de vídeo, hemos utilizado un ordenador tipo PC, con microprocesador 486, y una versión actualizada del módulo de digitalización, basado en la superposición de la imagen de vídeo con el software que realiza la captación mediante el puntero del ratón (**Figura 3.13**). De esta forma, reducimos la posibilidad de errores de apreciación, al simultanear la imagen filmada con la estructura alámbrica digitalizada, lo que permite a su vez corregir y redigitalizar puntos y/o fotogramas durante la misma sesión o diferentes (ver **Figura 3.14**).

#### **3.1.2.7. Procedimiento**

La toma de datos en la que se ha basado este análisis estuvo determinada por la exigencia del Comité Organizador que nos autorizó la filmación siempre y cuando estuviéramos lo menos posible dentro de la zona de competición y que en





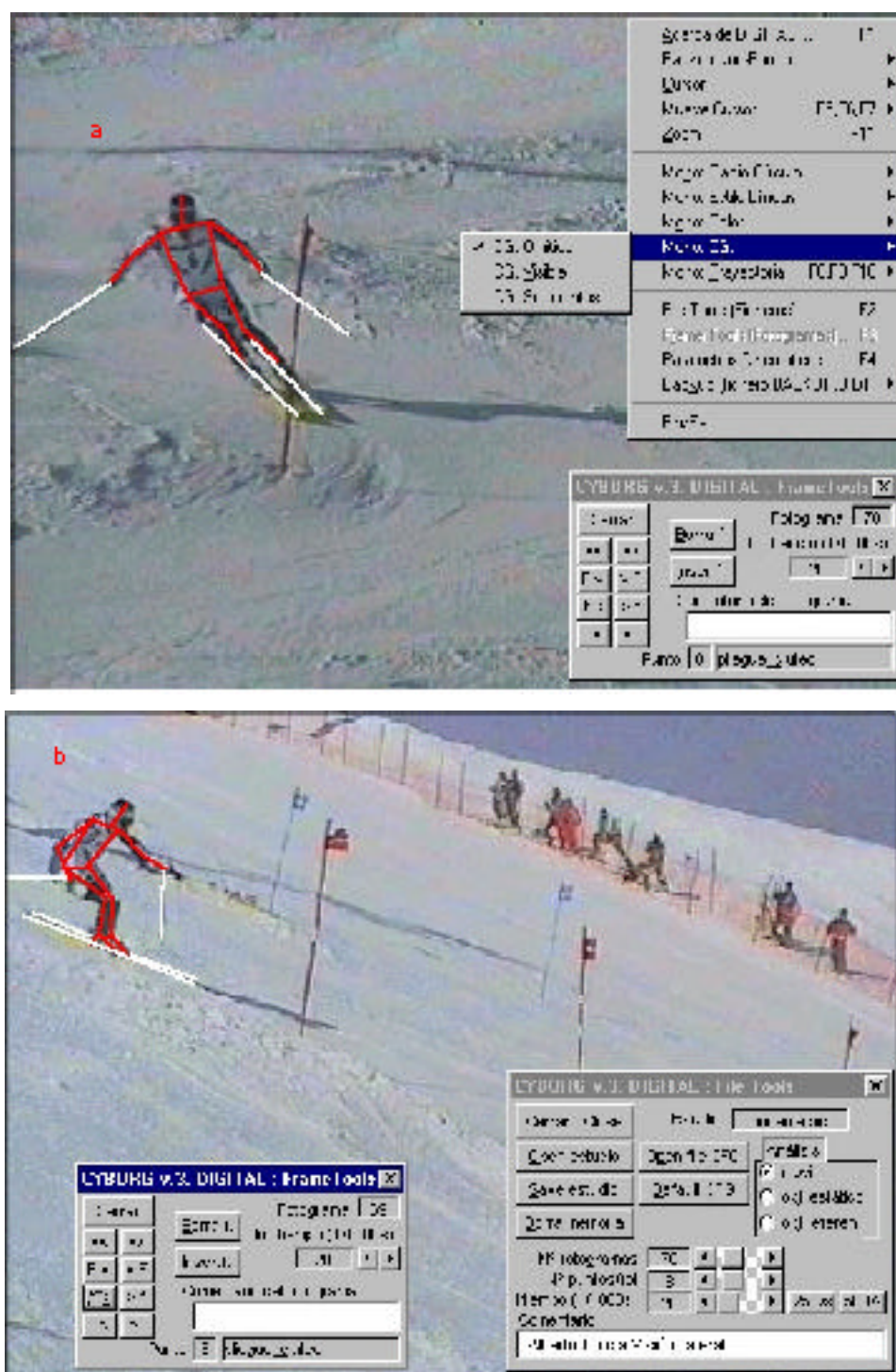
**Figura 3.12.** Magnetoscopio S-VHS Panasonic MS5 utilizado.

---



**Figura 3.13.** Material empleado en la digitalización manual con el software CYBORG versión 2.0 y 3.0, basado en la superposición de la imagen de vídeo filmada con un programa de digitalización mediante ratón.

---



**Figura 3.14.** Superposición de la estructura alámbrica digitalizada sobre la imagen de vídeo con los caracteres de la pantalla del programa de digitalización CYBORG v. 3.0, en una visión frontal (a) y lateral (b).

ningún momento se interrumpiera el desarrollo de la prueba. Para ello las cámaras de vídeo tenían que estar fuera del balizamiento de seguridad y el sistema de referencia debía de permanecer fuera del recinto de competición, debiendo por tanto desplazarlo y colocarlo cada vez que debía ser filmado, en la puerta de viraje correspondiente. Además de la autorización del Comité Organizador, contamos con la aprobación de los Responsables de Copa del Mundo de la Federación Internacional de Esquí de damas y hombres.

El equipo humano que colaboró en la investigación estuvo formado por seis personas: dos de ellas eran las encargadas de realizar la filmación y por tanto de transportar, ubicar y estacionar las cámaras de vídeo utilizadas de forma estable sobre los trípodes correspondientes y las plataformas de madera sobre las que se apoyaban. Las otras cuatro personas se responsabilizaron del transporte, del montaje y de la ubicación y retirada, en las puertas elegidas, del sistema de referencias construido para esta ocasión. Una de ellas además portaba una cámara de vídeo con la que grabó algunas actuaciones de este estudio.

Para determinar el tiempo que se necesitaba para estar preparados en la toma de datos el día de la competición, nos acercamos al lugar de la competición para realizar un ensayo dos días antes de la celebración de la prueba. El tiempo empleado este día para montar el objeto de referencia y ubicarlo en la zona de pista de competición, como el de filmarlo y retirarlo, así como el que empleamos para llegar al lugar exacto, determinó que para tener todo preparado el día de competición antes de que comenzara el reconocimiento de pista (una hora antes del inicio de la competición) y por tanto estuviera la pista llena de participantes, que tuviéramos que estar en nuestra posición dos horas antes del inicio del reconocimiento, previsto para las 8.30 horas en la primera manga y 12.00 horas para la segunda.

La toma de datos de esta Tesis se llevó a cabo en la pista Neveros, lugar designado por el Comité Organizador del Campeonato del Mundo de Esquí Alpino de Sierra Nevada para celebrar las competiciones de Slalom en hombres y damas, durante los días 24 y 25 de Febrero de 1996.

El Sábado 24 de Febrero tuvo lugar la toma de datos de la segunda manga (bajando a la izquierda) correspondiente al Slalom damas y el Domingo 25, se registró la primera manga (bajando a la derecha) del Slalom de hombres. La segunda manga de damas tuvo 58 puertas, frente a las 60 puertas que tuvo la de hombres. Las puertas elegidas para realizar el análisis biomecánico tridimensional de la técnica del viraje en esta disciplina fueron la número 18 (roja) y la 23 (roja), en damas y hombres respectivamente, como puertas representativas de la disciplina de Slalom. En ambas situaciones se escogió una puerta que se encontraba al final de un muro y dos puertas antes de un cambio de ritmo (doble vertical) y de pendiente, en el que los esquiadores giraban hacia la derecha, estando la puerta entre la cámara y el esquiador mirándolo desde una toma lateral. Aproximadamente la puerta se encontraba próxima a la mitad de recorrido, cerca del tramo de bajada donde la organización tenía establecido el tiempo intermedio.

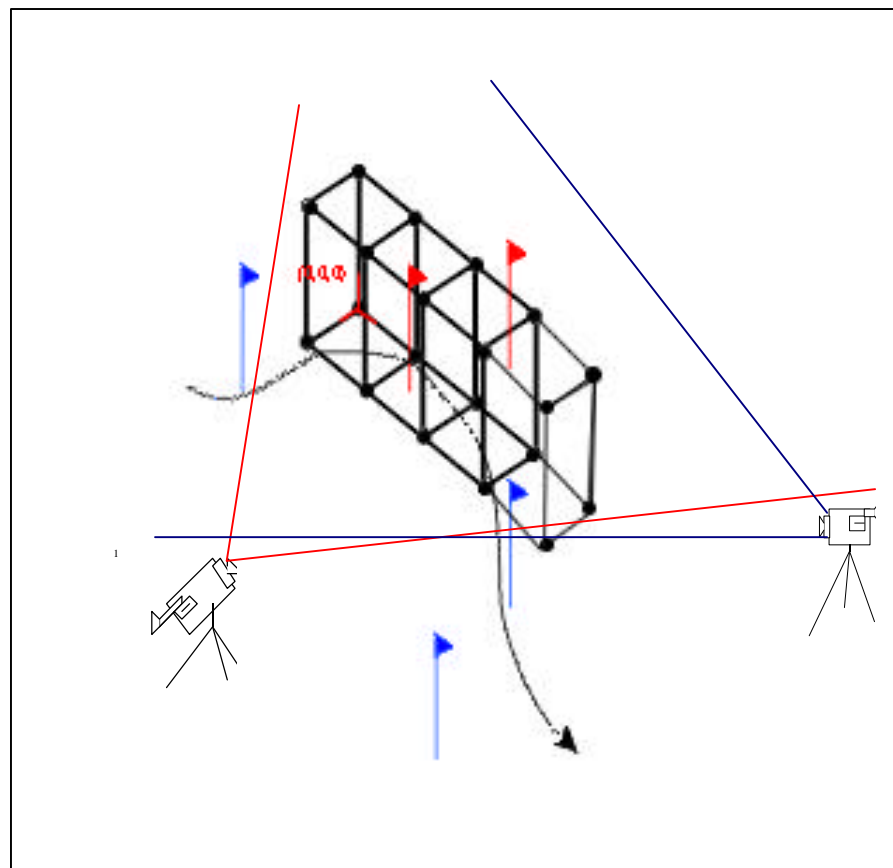
Las actuaciones seguidas para ambos días de competición siguieron el mismo horario. A las 6.30 horas de la mañana, la Estación de Esquí y Montaña de Sierra Nevada, abrió los remontes por los cuales se accedía a la pista de competición (Telesilla Antonio Jara y Telesilla Montebajo). A las 6.45 horas entramos en la pista de competición. A las 7.15 horas las cámaras (lateral y frontal) quedaron emplazadas en su lugar. Las cámaras de vídeo fueron ubicadas en lugares autorizados por el Comité Organizador de la prueba y fuera del trazado, por motivos de seguridad, según establece el reglamento y accionadas remotamente cuando el esquiador estaba tres puertas antes de la puerta objeto de análisis. Debido a que durante la filmación no son requeridas las medidas de campo, las cámaras

fueron colocadas sin que nos preocupara calibrar su posición espacial ya que será determinada indirectamente a posteriori a partir de la filmación del sistema de referencia utilizando el algoritmo DLT. La ubicación de las cámaras en la pista de competición, se ilustran en la **Figura 3.15**.

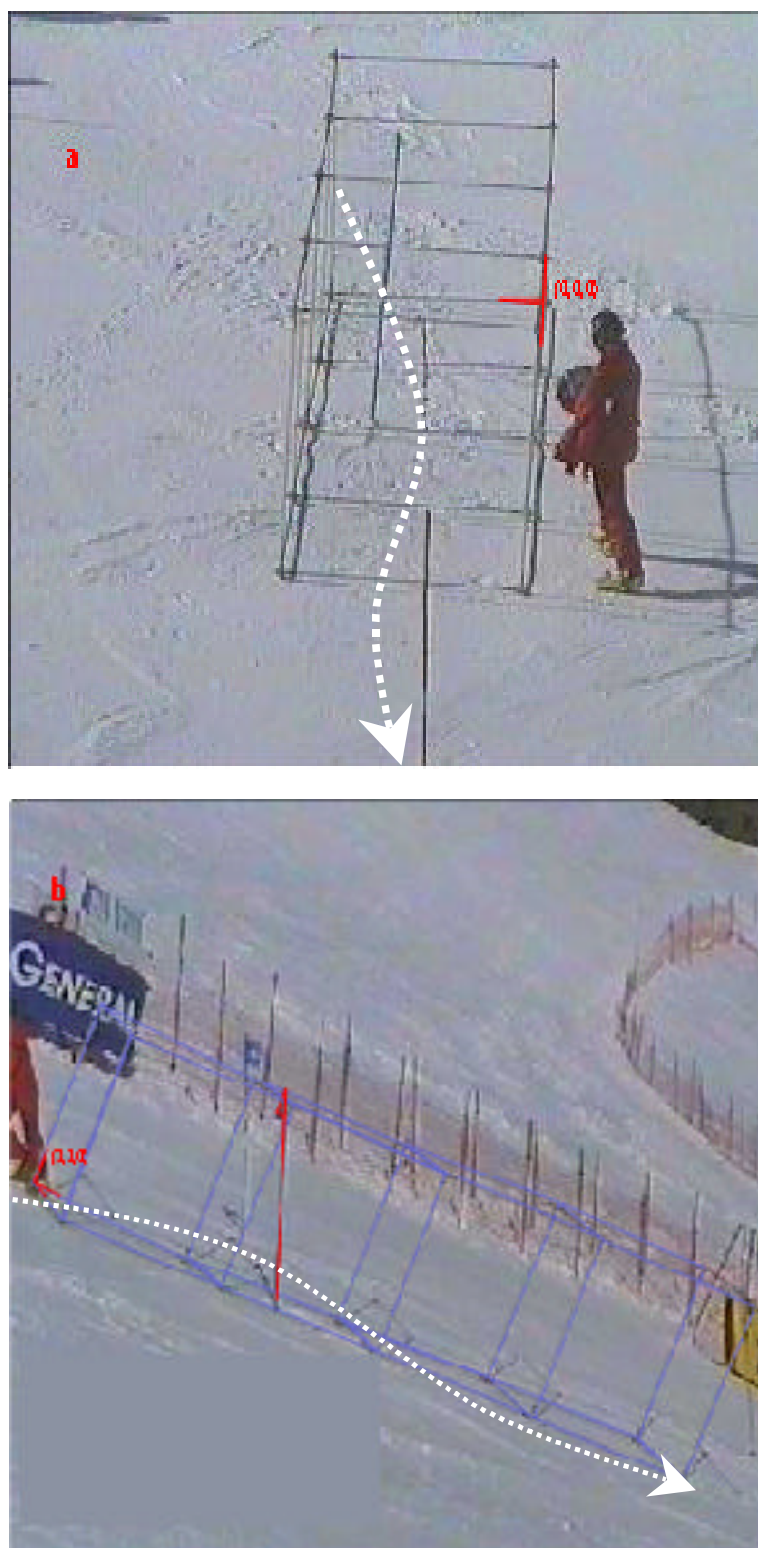
A las 7.40 horas, fue colocado en la puerta de viraje seleccionada el sistema de referencias después de ser montado, como muestra la **Figura 3.16**. A las 8.00 horas, el sistema de referencias había sido filmado, registrándose el volumen espacial del desplazamiento que transcurría sobre la posición del sistema de referencia ajustando la óptica de las cámaras durante su filmación y se retiraba de la pista de competición.

A las 8.30 horas, comenzaba el reconocimiento de pista previsto por la organización de la prueba y todo estaba preparado para realizar la filmación de los deportistas. La primera manga comenzó a las 9.30 y finalizó a las 11.30. Se filmaron los treinta primeros corredores que pasaron por la puerta seleccionada. Al término de la primera manga, y por precaución, el sistema de referencia fue nuevamente colocado y filmado al finalizar cada recorrido reglamentario, evitando así que las cámaras pudieran haberse movido durante la filmación de las curvas de los esquiadores por causas ajenas a nuestra voluntad (desajustes técnicos involuntarios, o incluso desestabilización de la cámara por fundición de la nieve, etc.).

Repetimos este proceso para recoger datos en la segunda manga, teniendo en cuenta los horarios previstos por la organización, reconocimiento a partir de las 12.00 horas, salida del primer corredor a las 13.00 horas, y a las 14.30 finalizaba la segunda manga.



**Figura 3.15.** Representación gráfica de la ubicación de las cámaras estáticas, el sistema de referencias y el volumen filmado en esta Tesis, en la puerta de viraje analizada



**Figura 3.16.** Colocación del sistema de referencia en la puerta de viraje de Slalom analizada vista desde una visión frontal (a) y lateral (b).



### **3.1.2.8. Variables de estudio**

En este apartado describiremos las variables que hemos estudiado y el proceso que hemos seguido para su obtención. En primer lugar, calcularemos el centro de gravedad del sistema. Posteriormente, determinaremos variables temporales, espaciales y relativas a la velocidad que vamos a analizar en esta Tesis.

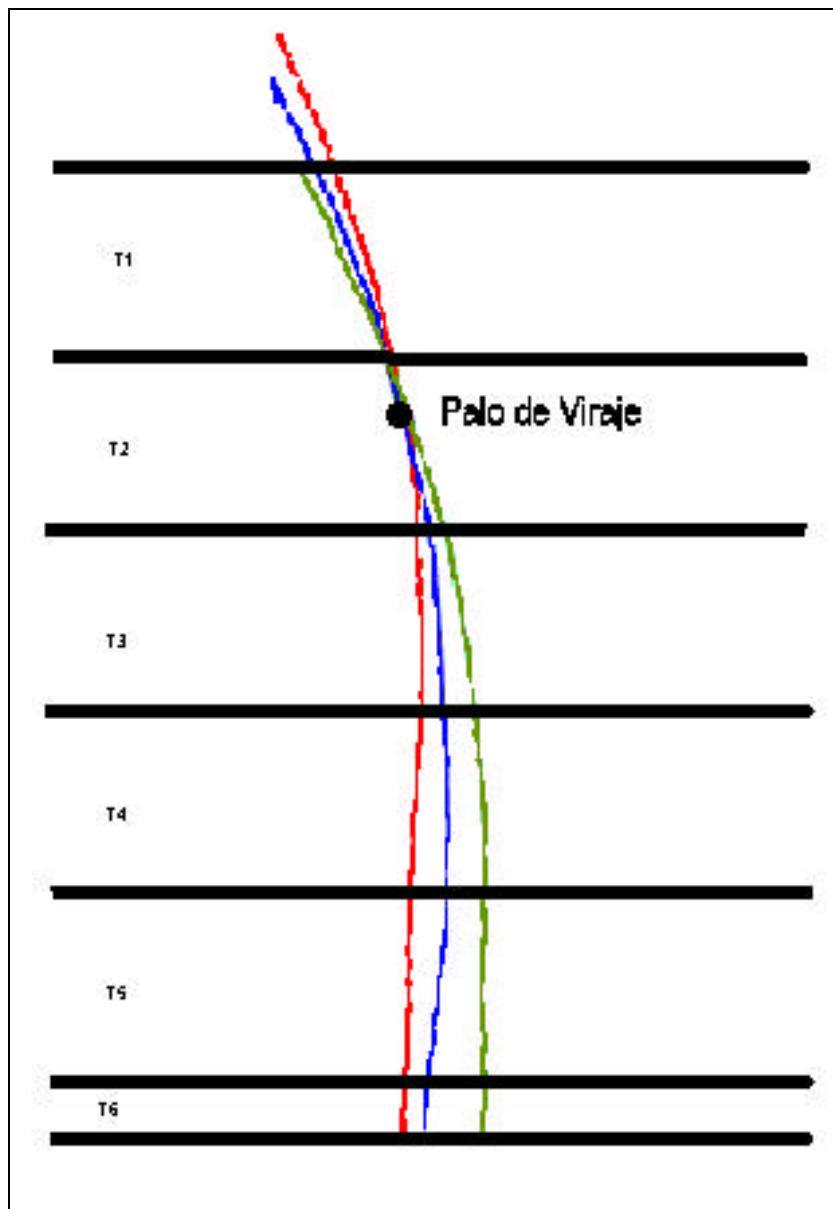
#### **3.1.2.8.1. Determinación de tramos en el viraje para el análisis**

La organización y selección de variables ha sido la misma en hombres y damas y su presentación se basa en la trayectoria descrita por el CG en el tramo de filmación, la cual ha sido analizada a partir de sectores de un metro de longitud en dirección del Eje X del sistema de referencias (longitudinal) y en sentido descendente. Para ello tendremos en cuenta la coordenada en el Eje X del CG ( $CX_{CG}$ ), y dividiremos en tramos de 1 m la trayectoria del viraje analizado desde el inicio hasta el final. La división del viraje en tramos para su análisis, podemos observarla en la **Figura 3. 17**.

Pensamos que de esta forma será posible conocer el tramo crítico donde la velocidad de deslizamiento es menor y donde es posible que se asocien otros eventos (posiciones espaciales) que determinen esta reducción de velocidad, y por el contrario, también podemos obtener los tramos de mayor velocidad asociándolos a los eventos donde aparecen.

#### **3.1.2.8.2. Determinación del CG del sistema**

Conocer la localización del Centro de Gravedad del sistema (CG) para el análisis dinámico de un sistema coordinado en movimiento, adquiere una especial relevancia, ya que el movimiento de cualquier sistema coordinado puede describirse en función del movimiento de su CG, considerando que éste



**Figura 3.17.** División de la trayectoria del CG del sistema en tramos para el análisis biomecánico del viraje en Slalom.

es un punto de un cuerpo material que se mueve como si la masa total del sistema se hallara en el citado punto y todas las fuerzas externas fuesen aplicadas al mismo.

Para el cálculo del CG, podemos considerar que existen tres problemas a resolver antes de abordar las expresiones matemáticas que determinen el origen del vector resultante de las fuerzas que actúan en cada segmento, es decir el centro de gravedad del sistema: **a)** es necesario definir el número de segmentos que componen el *modelo humano*, **b)** necesitamos conocer la localización del centro de gravedad de cada segmento y **c)** determinar el peso de cada segmento.

En la biomecánica deportiva estos problemas han sido solucionados de forma experimental, unas veces mediante segmentación de cadáveres (Dempster, 1955 y Clauser et al. 1969), otras mediante la definición geométrica de los sólidos para ser descritos matemáticamente. (Jensen, 1994, Hatze, 1980 y Yeadon, 1990) y recientemente, utilizando el escaner de rayos gamma (Zatsiorsky y Seluyanov, 1985, y adaptados por Leva, 1996). Dichas investigaciones nos han permitido conocer la localización del CG de cada segmento, con respecto a su longitud real, así como su peso en porcentaje del peso total del sujeto. A partir de estos datos inerciales de los segmentos y conocida la posición de los segmentos en el espacio, es posible determinar la localización del CG del sistema sin implementos mediante la expresión (**E-4**).

---

E.4

$$CG_T = \sum_{i=1}^{i=14} \{ Gp_i - [ K_i(Gp_i - Gd_i) ] * p_i \}$$

donde  $Gp_i$ , es la coordenada proximal de un segmento determinado;  $K_i$ , es la localización del centro de gravedad de un segmento determinado;  $Gd_i$ , es la coordenada distal de un segmento determinado; y,  $p_i$  es el peso relativo al segmento.

---

A partir de los datos descritos y otros de posible cálculo, como el momento angular del sistema, basado en el sumatorio del producto de las masas segmentarias por el producto vectorial de la velocidad tangencial y el vector posición de cada segmento, es posible deducir los factores que determinan la eficacia de cualquier gesto deportivo, cuantificando su descripción y dando explicación de las causas que lo producen, utilizando como soporte la dinámica inversa.

Debido a que todos los cálculos se han realizado teniendo en cuenta el modelo mecánico del cuerpo humano (cuerpo humano sin implementos deportivos), hemos determinado el CG del esquiador a partir de la Expresión-3 (E- 3). Para ello hemos tenido que determinar la posición del CG de los esquís, de las botas y de los bastones. La posición del CG del material deportivo, lo hemos determinado mediante el *método de suspensión* (Gutiérrez (1998):

a) Para los esquís y bastones, hemos buscado el punto de equilibrio de varios esquís y bastones. Después y teniendo en cuenta la longitud total del esquí y/o el bastón (medida por la suela, y de extremo superior a inferior, respectivamente), registramos la distancia existente entre este punto de equilibrio y los extremos inferior y superior, respectivamente, en el esquí y el bastón, relativa a la posición del CG en diferentes modelos y longitudes de esquí y sus respectivos pesos, y los valores medios de la posición y de los pesos que hemos utilizado para todos los sujetos analizados en este estudio y obtenidos de materiales similares de diferentes marcas, ya que los sujetos analizados no nos facilitaron sus datos.

b) Para las botas, hemos calculado su CG, suspendiendo la bota desde dos lugares diferentes (borde superior posterior y borde inferior anterior). Desde

cada lugar hemos trazado una perpendicular al suelo y hemos considerado la intersección de estas dos líneas el CG de la bota. Hemos observado que se encuentra muy próximo al segmento que une los puntos articulares de la punta del pie y el tobillo. Al igual que hicimos anteriormente hemos obtenido el peso de varios modelos y tallas de botas, para determinar un peso medio de la bota. En la **Figura 3.18** podemos observar el procedimiento seguido para determinar el CG de la bota de esquiar.

Como hemos indicado anteriormente, la existencia de los esquís, las botas y los bastones, como complemento al modelo requiere el conocimiento del CG del sistema deportista con esquís, botas, y bastones. El resto de material blando (vestimenta, máscara, casco y protecciones), lo hemos desestimado pues no existe variación alguna. Para este cálculo, previamente se habrá detectado las coordenadas del CG sin tener en cuenta los implementos. A continuación, utilizando los pesos y CG parciales de cada implemento, recalculamos el CG total (CGT) del sistema (esquiador más implementos) mediante la **Expresión E.5** (adaptada de Gutiérrez, 1998).

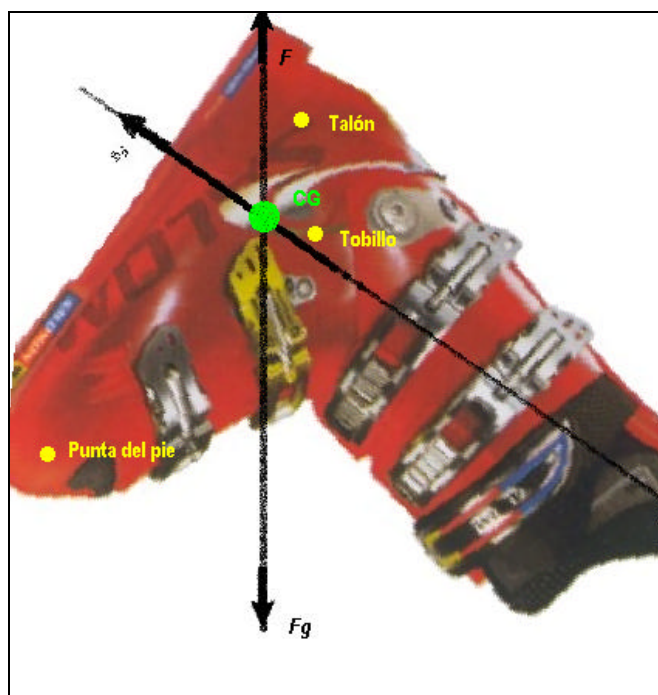
---

E.5.

$$CG_T = \frac{(CGh * Ph) + (CGei * Pei) + (CGed * Ped) + (CGbi * Pbi) + (CGbd * Pbd) + (CGpi * Ppi) + (CGpd * Ppd)}{Ph + Pei + Ped + Pbi + Pbd + Ppi + Ppd}$$

donde **CG<sub>T</sub>** se corresponde con el Centro de gravedad del sistema (deportista mas implementos); **CG<sub>h</sub>**, con la coordenada del CG del deportista; **CG<sub>ei</sub>** y **CG<sub>ed</sub>**, son las coordenadas del CG del esquí izquierdo y derecho, respectivamente; **CG<sub>bi</sub>** y **CG<sub>bd</sub>**, las coordenadas del CG de la bota izquierda y derecha, respectivamente; **CG<sub>pi</sub>**, **CG<sub>pd</sub>**, las coordenadas del CG del bastón izquierdo y derecho, respectivamente; **Ph**, es el peso que actúa sobre el esquiador; **Pei** y **Ped**, son el peso del esquí izquierdo y el derecho, respectivamente; **Pbi** y **Pbd**, son el peso de la bota izquierda y la derecha, respectivamente; y, **Ppi** y **Ppd**, son el peso del bastón izquierdo y el derecho, respectivamente.

---



**Figura 3.18.** Determinación del CG de la bota de esquí a partir del *método de suspensión* (Gutiérrez, 1998) y ubicación de los puntos articulares del pie.

### 3.1.2.8.2. Variables Temporales

Podemos observar cómo en algunas ocasiones existen diferencias de tiempo de centésimas de segundo entre los corredores que deciden el lugar del primero al quinto puesto en las competiciones de esquí alpino.

Si analizamos las diferencias entre los tiempos obtenidos por los sujetos hombres y damas que hemos analizado, podemos observar la existencia de una gran variabilidad entre los tiempos obtenidos de todos los corredores. La razón principal de esta variabilidad existente se debe a la duración del viraje o tiempo transcurrido entre el cambio de cantos en la realización de dos virajes (Mester, 1997).

Este tiempo también es denominado *tiempo de viraje*, y podemos identificarlo desde un punto de vista cinético, como el momento en el que la fuerza que es aplicada sobre los cantos de los esquís pasa por ser cero (en el cambio de cantos), o cuando los esquís están planos sobre la nieve. En el estudio que hemos encontrado sobre la duración del viraje, se llega a la conclusión de que este tiempo revela una variabilidad similar a la obtenida tras el análisis del tiempo de bajada entre todos deportistas analizados.

En el proceso de obtención de las variables temporales hemos considerado las siguientes posiciones espaciales adoptadas por cada sujeto (sujetos hombres) que hemos ubicado en los diferentes tramos en los que dividimos el viraje analizado:

**P<sub>1</sub>**: Se corresponde con el momento de inicio de la secuencia de movimiento analizada. Para determinar el inicio, hemos tomado como referencia la *coordenada en el eje X del CG* y hemos obtenido el número del fotograma de

cada sujeto, donde la coordenada en el eje X obtiene el valor mínimo. El mayor valor de todas las coordenadas X mínimas de los sujetos hombres y las damas corresponde al fotograma de inicio  $F_1$ , que es el momento de inicio de la secuencia de movimiento analizada, por el que todos los sujetos estudiados han pasado. De esta forma nos aseguramos que el inicio de la secuencia analizada sea el mismo en todos los sujetos.

**P<sub>2</sub>**: Ha correspondido con el momento en el que el CG del esquiador se encuentra en la posición más baja. Hemos determinado esta posición a partir del análisis de la trayectoria del CG en el eje Y. Para ello hemos calculado el fotograma donde la *coordenada en el eje Y del CG* es mínima en cada sujeto analizado. Este punto de inflexión de la trayectoria nos ayuda a calcular el cambio de movimiento vertical de flexión a extensión del CG del deportista. Este fotograma, es diferente en cada esquiador y lo hemos determinado  $F_2$ .

**P<sub>3</sub>**: Momento en que la proyección vertical del CG está más alejada de la puerta de viraje. Se ha determinado este momento a partir del análisis de la trayectoria del CG en el eje Z. Para ello, hemos determinado el fotograma ( $F_3$ ) donde la *coordenada Z del CG* que está más alejada del palo interno a la curva.

**P<sub>4</sub>**: Instante de contacto con el palo de viraje desde una visión lateral. Esta posición fue determinada a partir de la sincronización manual de las cámaras en el fotograma inicial en el que los deportistas contactaban con el palo de viraje ( $F_4$ ). El valor del fotograma de contacto se corresponde con la siguiente expresión (*Expresión 3.6*).

---

E-6

$$F_4 = 2 F_4 L - 1; F_4 = 2 F_4 F - 1$$

donde  $F_4 L$  y  $F_4 F$  son los fotogramas iniciales de contacto desde la visión lateral y frontal, respectivamente.

---



**P<sub>5</sub>**: Instante de cambio de trayectoria del esquí exterior hacia el interior de la curva, o instante en el que el esquí exterior se aleja de la línea de máxima pendiente. Calculamos el fotograma en donde cambia la trayectoria el esquí exterior hacia el interior de la curva. Para ello debemos observar la representación gráfica de cada uno de los sujetos con implementos desde una visión superior. Este fotograma será aquel donde el esquí exterior pase de una posición paralela a la línea de máxima pendiente a una posición inclinada hacia el interior de la curva, siempre desde una visión superior de la representación gráfica. A este fotograma lo vamos a denominar **F<sub>5</sub>**

**P<sub>6</sub>** Se corresponde con el momento final de la secuencia de viraje analizado. Para determinar el final, hemos tenido en cuenta la *coordenada en el eje X del CG*, obteniendo el número del fotograma de cada sujeto, a partir del valor máximo de la coordenada en el eje X. El valor más pequeño de todas las coordenadas X máximas de los sujetos hombres y las damas corresponde al fotograma de final **F<sub>6</sub>**, que es el momento final de la secuencia de movimiento analizada, por donde todos los sujetos estudiados han pasado. Del mismo modo, el final de la secuencia analizada es el mismo en todos los sujetos.

Una vez determinados todos los fotogramas, los hemos introducido dentro del módulo de cálculo GRAFO 3D incluido en el soporte lógico CYBORG 3.0. De esta forma, obtendremos en la representación gráfica de cada esquiador, diferentes posiciones espaciales y su ubicación dentro del viraje que comienza en el fotograma inicial (**F<sub>1</sub>**) y termina en el fotograma final (**F<sub>6</sub>**).

Finalmente, con el propósito de valorar la estructura y consistencia temporal obtenida por los sujetos, hemos definido estas variables temporales: a) *Tiempo de bajada (TB)*, definido como el tiempo total que el sujeto utiliza en

su bajada por el trazado. Es medido por un equipo oficial de cronometradores que utiliza un circuito de células fotoeléctricas, que es abierto cuando el corredor abre el portillón de salida y cerrado cuando cruza la línea de meta. El que menos tiempo realiza, gana la manga. Está directamente relacionada con el rendimiento; b) *Tiempo intermedio (TI)* resultante de la división de la bajada en dos periodos temporales (T1 y T2, de tal forma que  $TI = TB - T1$ , y  $TB = T1 + T2$ ). Utilizamos el tiempo intermedio ya que la puerta analizada se encontraba en esta primera sección; y, c) *Tiempo de viraje (TV)* o tiempo transcurrido desde la posición  $P_1$  determinado por el fotograma de inicio a la posición  $P_6$ , determinado por el fotograma final o tiempo empleado en realizar el viraje analizado.

Como se ha podido ver, las fases temporales que hemos tenido en cuenta en el análisis del viraje para este estudio, los hemos basado en la obtención de fotogramas y posiciones espaciales que determinan por un lado momentos de la secuencia analizada ( $P_1, P_2, \dots, P_6$ ). Estas posiciones las hemos obtenido a través de la imagen tridimensional, visionando paralelamente las coordenadas del CG del sistema esquiador y los fotogramas, teniendo en cuenta que se hemos registrado las imágenes con una frecuencia de 50 Hz, y que posteriormente han sido interpoladas a 100 Hz.

#### **3.1.2.8.3. Variables relativas a posiciones espaciales**

La valoración de las posiciones espaciales adoptadas, se ha referido al análisis del sistema esquiador (deportista más implementos), y a las posiciones segmentarias. En cuanto al *análisis de las posiciones adoptadas por el CG del sistema*, hemos seleccionado las siguientes variables: a) Coordenada del CG en la dirección del movimiento ( $CX_{CG}$ ), que nos ha servido para dividir el viraje

analizado en tramos y ha sido determinada a partir del cálculo de la coordenada del CG en la componente X (dirección del movimiento); b) Posición más baja del CG del sistema esquiador ( $CY_{CG}$ ), determinada a partir de la coordenada del CG en la componente Y, y que nos ha servido para describir los movimientos que el CG del sistema realiza en el eje vertical (Eje Y).

Entre las relacionadas con las *posiciones segmentarias adoptadas por el sistema esquiador*, hemos relacionado las siguientes: a) Angulo de la articulación de la rodilla. ( $q_{Ra}$ ), determinado por dos vectores correspondientes a los segmentos pierna (puntos articulares de tobillo y rodilla) y muslo (puntos articulares de rodilla y cadera) del miembro inferior interno y externo, respectivamente de cada esquiador; y b) Angulo de la articulación de la cadera. ( $\theta_{Ca}$ ), determinado por dos vectores correspondientes a los segmentos muslo (puntos articulares de rodilla y cadera) y tronco (puntos articulares de cadera y hombro) de la pierna interna y externa, de cada esquiador.

#### **3.1.2.8.4. Variables relativas a las velocidades relacionadas**

Con respecto a las variables relativas a las velocidades relacionadas, hemos tenido en cuenta, con respecto al CG del sistema esquiador, la Velocidad lineal media resultante, en la componente X, y Z del CG ( $VR_{CG}$ ,  $VX_{CG}$ ,  $VZ_{CG}$ , respectivamente), calculando en cada tramo la velocidad media (resultante, y en las componentes X, Y, Z) para determinar en qué tramo se produce la disminución de la velocidad y establecer el tramo crítico de pérdida de velocidad en cada sujeto.

Entre las relacionadas con las *posiciones segmentarias adoptadas por el sistema esquiador*, hemos tenido en cuenta la Velocidad lineal media resultante

y en las componentes X y Z del esquiador del extremo antero-superior o punta de la bota externa ( $VR_{Bi}$ ,  $VX_{Bi}$  y  $VZ_{Bi}$ , respectivamente).

El cálculo de las velocidades lineales se ha realizado mediante la primera derivada de la función de las posiciones espaciales dependientes del tiempo, obteniendo la función mediante el algoritmo de splines elevados a la quinta potencia.

Por último, creemos conveniente decir que, mientras en hombres los valores de todas las variables estudiadas serán utilizados para realizar un estudio individual de lo sucedido en cada sujeto, en mujeres utilizaremos los valores aportados por la estadística descriptiva de estas variables para realizar un estudio transversal entre las sujetos analizadas. Esto implicará, que los valores de las variables mencionadas en sujetos hombres serán tratados teniendo en cuenta la división del viraje en tramos tanto para la generación de resultados numéricos como gráficos, y en mujeres, estudiaremos los valores de las variables establecidas teniendo en cuenta la división del viraje en tramos para la generación de resultados numéricos y para la generación de los resultados gráficos, el porcentaje del tiempo total invertido en el viraje.

**CAPITULO 4**  
**RESULTADOS**

#### **4. Resultados**

Como es preceptivo en todo informe de investigación, en este capítulo cuarto se expondrán los resultados de forma secuencial y organizados en dos apartados. El primero de ellos se dedicará al estudio individualizado de cada uno de los tres esquiadores masculinos analizados y en el segundo apartado se analizarán las nueve esquiadoras femeninas atendiendo no sólo al análisis individualizado sino realizando un análisis transversal con el propósito de obtener ciertos factores comunes al análisis de la muestra, utilizando para ello la estadística descriptiva, correlacional y diferencial.

El motivo de este desglose en dos apartados obedece a tres condicionantes: a) las trayectorias del CG en el espacio filmado necesariamente van a ser diferentes entre sujetos hombres y sujetos damas debido a que son trazados diferentes; b) el número de sujetos hombres analizados no se puede considerar suficientemente elevado como para realizar un estudio transversal mediante estadística tradicional, por el contrario la calidad de los esquiadores analizados nos ofrece la oportunidad de hacer un análisis individual de extraordinaria trascendencia en la transferencia de los resultados; y c) las características físicas individuales y especialmente referidas a la fuerza nos permite pensar que la comparación entre sujetos hombres y damas tendría un problema metodológico insalvable.

Al margen de las diferencias señaladas, la organización y selección de variables ha sido la misma en hombres y damas y la presentación se basa en la trayectoria descrita por el CG en el tramo de filmación, la cual ha sido analizada a partir de sectores de un metro de longitud en dirección del Eje X del sistema de referencias (longitudinal) y en sentido descendente. De esta forma será posible conocer el tramo crítico donde la velocidad de deslizamiento es menor y donde es posible que se asocien otros eventos que determinen esta reducción de velocidad,

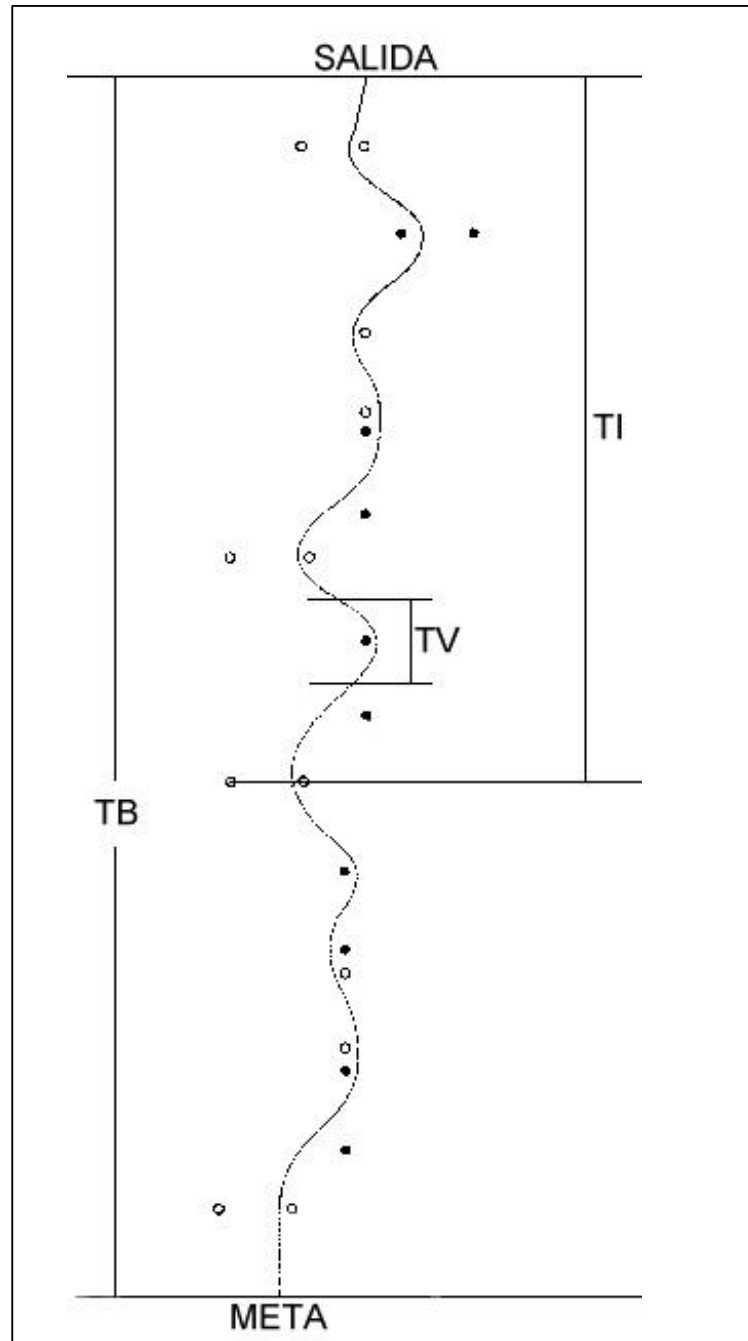
y por el contrario, también podemos obtener los tramos de mayor velocidad asociándolos a los eventos donde aparecen.

Aunque esta Tesis es descriptiva y no deberíamos considerar factores independientes ya que no se manipula nada, sí debemos considerar que el tiempo requerido en recorrer verticalmente estos tramos constituye un factor o criterio de eficacia determinante en el rendimiento (factor producto) y que a su vez está condicionado por otros factores que deberíamos considerar como de proceso a los cuales estarán asociadas la trayectoria descrita por el CG, las posiciones adoptadas por el deportista y ciertos eventos que la literatura ha considerado relevantes.

#### ***4.1. Resultados del análisis individual del viraje en Slalom en sujetos hombres (SH)***

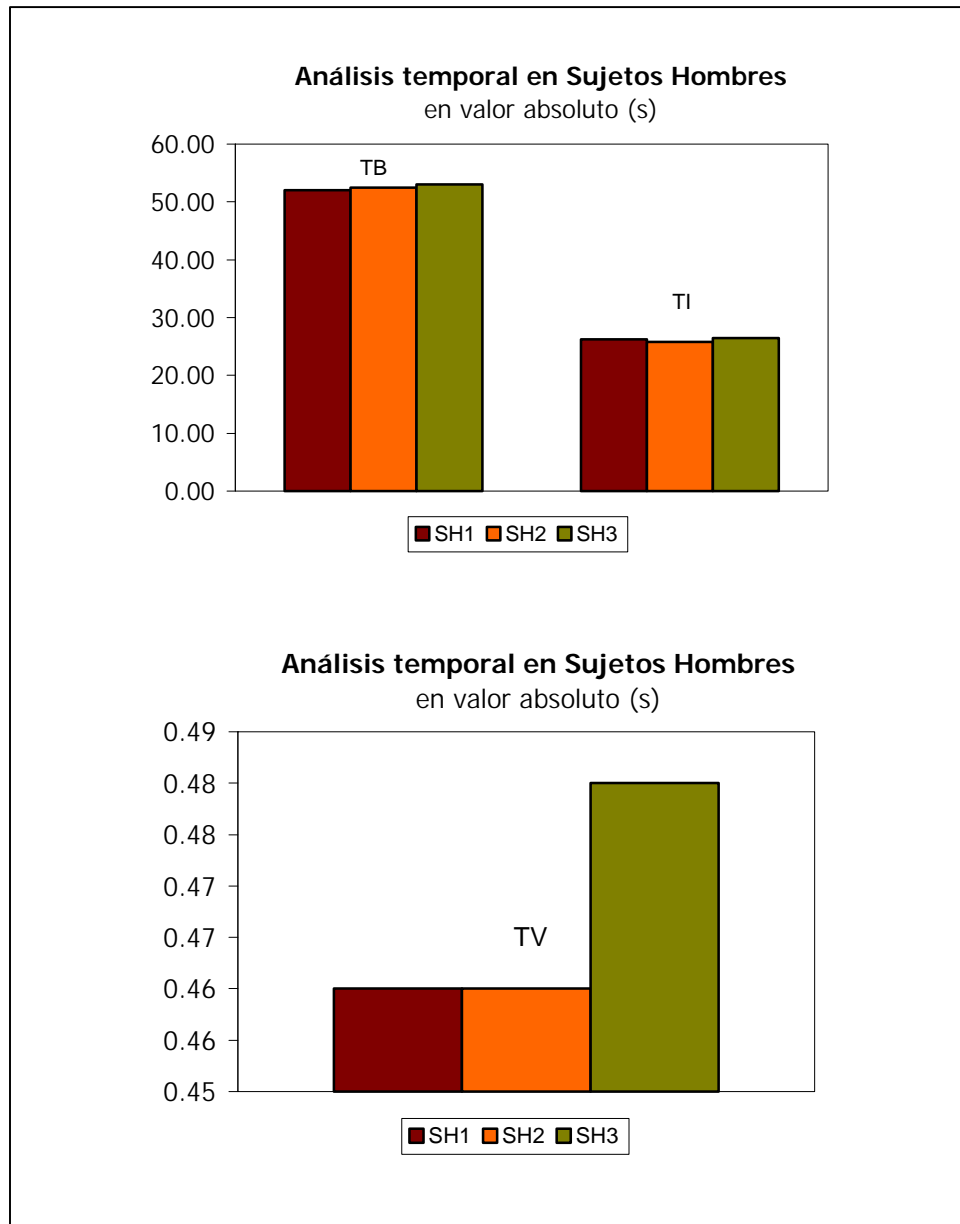
##### ***4.1.1. Análisis temporal en sujetos hombres (SH)***

En las **Figuras 4.1.1** y **4.1.2** y la **Tabla 4.1.1** se presenta el estudio temporal referido al tiempo total de bajada (TB), considerado como el tiempo invertido en el recorrido por cada sujeto analizado, utilizando para ello los resultados oficiales de competición facilitados por la organización del evento y referidos al cronometraje oficial; el tiempo intermedio (TI), considerado como el tiempo que invierte el sujeto desde la salida hasta un punto concreto que corresponde, aproximadamente, a la mitad del recorrido y que ha sido determinado igualmente a partir de los registros oficiales dados por la organización; y el tiempo empleado en el viraje analizado (TV), obtenido a partir de los datos fotogramétricos correspondientes a nuestras filmaciones. En la citada tabla y figura se observa como SH1 consigue el menor TB ganando la manga. Sin embargo se observa que en el TI éste fue superado claramente por SH2, lo que



**Figura 4.1.1.** Tiempos del análisis temporal utilizados en el estudio del Slalom, donde **TB** es el Tiempo de Bajada; **TI** es el Tiempo intermedio; y **TV** es el Tiempo del viraje analizado.





**Figura 4.1.2** Análisis temporal de los Sujetos Hombres (SH), expresado en valor absoluto (s), donde **TB** es el Tiempo de Bajada; **TI** es el Tiempo intermedio; y **TV** es el Tiempo del viraje analizado.

**Tabla 4.1.1** Análisis temporal de los Sujetos Hombres (SH), expresado en valor absoluto (s), donde **TB** es el Tiempo de Bajada; **TI** es el Tiempo intermedio; y **TV** es el Tiempo del viraje analizado.

<b>SUJETO</b>	<b>TB (s)</b>	<b>TI (s)</b>	<b>TV (s)</b>
<b>SH1</b>	52.02	26.2	0.46
<b>SH2</b>	52.51	25.8	0.46
<b>SH3</b>	52.98	26.5	0.48

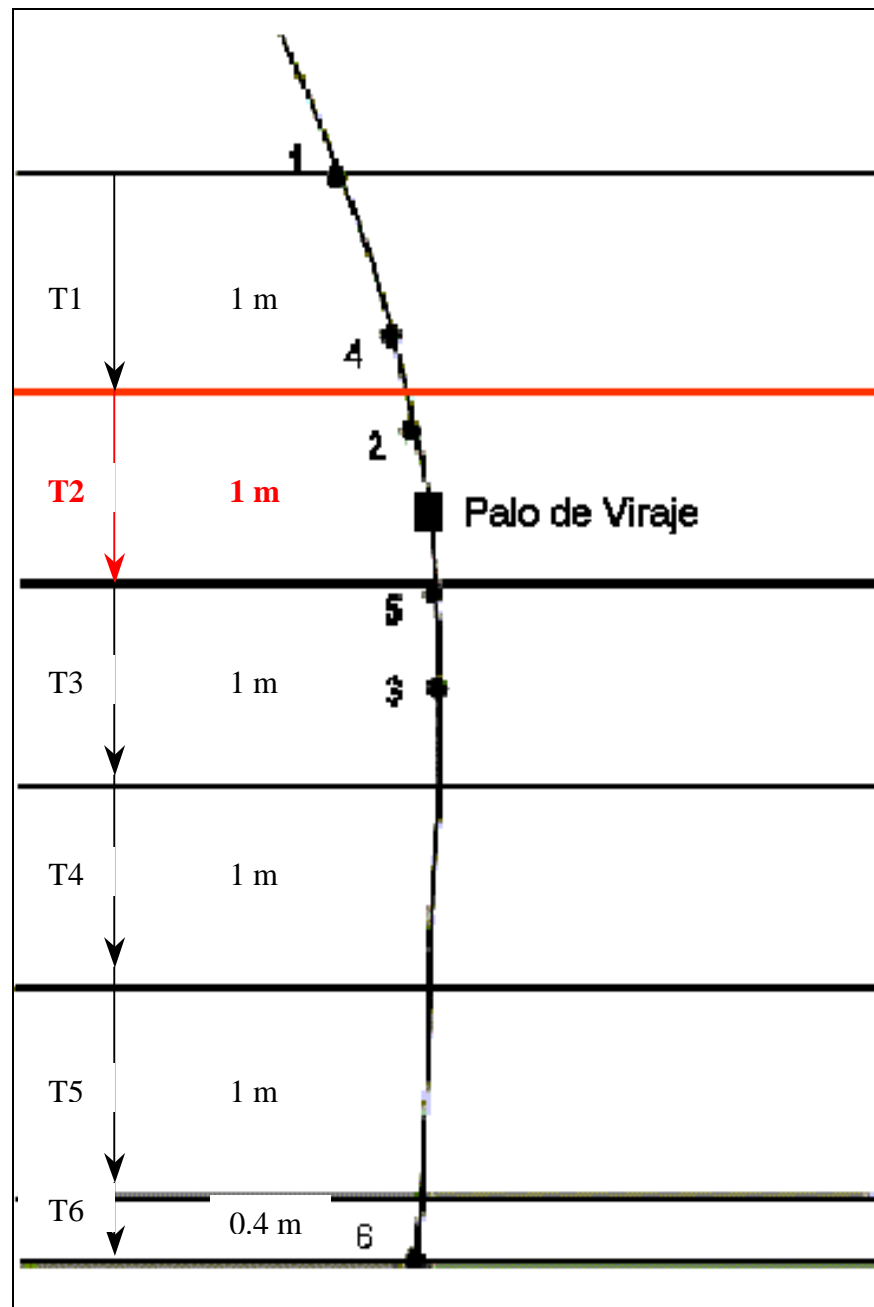
---

pone de manifiesto que durante la segunda parte de la bajada, el SH1 realizó mejor tiempo, recuperando el tiempo perdido y mejorando el TB. Considerando que la filmación se realizó en una puerta ubicada al final del primer tramo de la bajada, donde SH1 obtuvo tiempos superiores a SH2, la igualdad que se establece en el TV de ambos sujetos tiene cierta lógica, sin embargo SH3 tiene un tiempo relativamente elevado en el viraje analizado con respecto al tiempo intermedio empleado, por lo que podría decirse que este sujeto tuvo algún problema en esta puerta analizada.

#### **4.1.2. Análisis individual de SH1**

En la **Figura 4.1.3** y la **Tabla 4.1.2**, se representa la trayectoria del CG en el recorrido filmado del sujeto SH1 así como la componente horizontal, transversal y resultante de la velocidad media ( $VX_{CG}$ ,  $VZ_{CG}$  y  $VR_{CG}$ , respectivamente) en cada uno de los tramos en los que se ha dividido el espacio analizado de la puerta de viraje seleccionada. En éstas, observamos como la velocidad media resultante va reduciéndose progresivamente hasta el tramo 5 (T5) donde vuelve a incrementarse ligeramente. Deberíamos considerar que esta reducción estaría condicionada por la presencia del palo de viraje en el tramo 2 (T2).

Otro hecho que se observa en los datos presentados en la Figura 4.1.3 es que en los tres primeros tramos (T1, T2 y T3) la reducción de la velocidad media resultante es consecuencia de la reducción de la componente transversal y un ligero incremento de la componente horizontal. También es la consecuencia de que durante estos tres primeros tramos el sujeto analizado realiza el cambio de dirección, consiguiendo, a partir del tercer tramo (T3) una trayectoria paralela con la dirección de la línea de máxima pendiente y de la componente horizontal.



**Figura 4.1.3.** Representación gráfica de la trayectoria del CG en SH1, posiciones espaciales analizadas (eventos) por tramos del viraje analizado y tramo crítico (en rojo) donde **1**, se corresponde con el momento de inicio de la secuencia; **2**, es la posición más baja del CG; **3**, es la posición en donde la proyección vertical de CG está más alejada de la puerta de viraje; **4**, es el momento de contacto con el palo de viraje; **5**, es el momento donde el esquí exterior cambia de trayectoria hacia el interior de la curva; y **6**, se corresponde con el momento final de la secuencia.

**Tabla 4.1.2.** Velocidad media alcanzada del CG en SH1, en la dirección de la pendiente ( $VX_{CG}$ ), en la componente Z ( $VZ_{CG}$ ) y resultante ( $VR_{CG}$ ) por tramos del viraje analizado, expresados en valor absoluto ( $ms^{-1}$ ).

TRAMOS	$VX_{CG} (ms^{-1})$	$VZ_{CG} (ms^{-1})$	$VR_{CG} (ms^{-1})$
T1	11.15	-4.14	11.92
T2	11.55	-1.90	11.73
T3	11.69	-0.10	11.71
T4	11.58	0.43	11.65
T5	11.81	0.67	11.88
T6	11.83	0.60	11.87

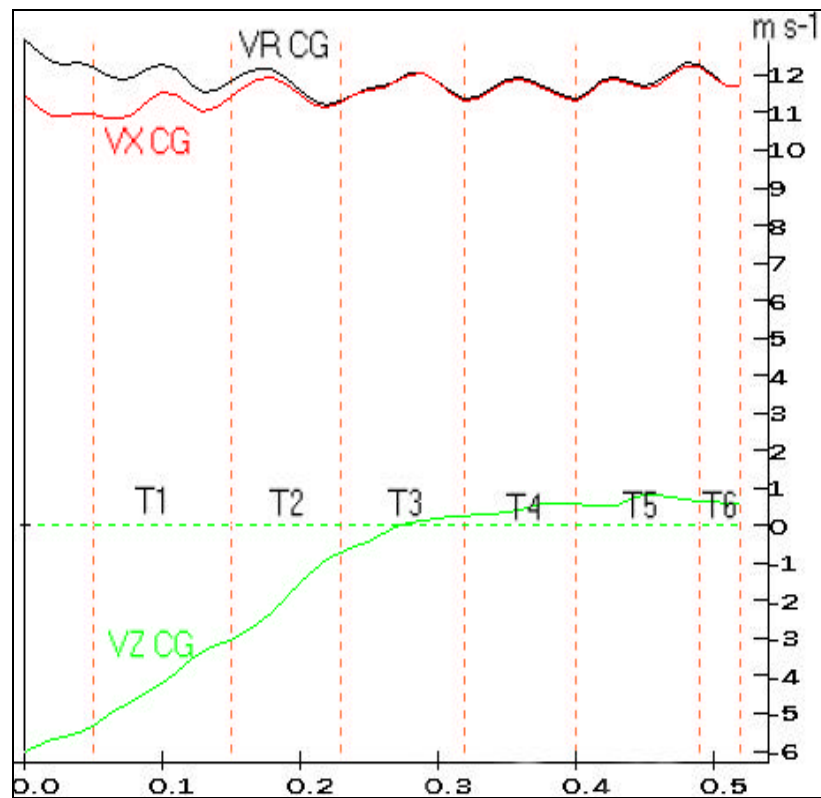
---

Aunque se puede considerar como tramo crítico aquel en el que se obtiene una velocidad media resultante menor, como sucede en el T4, no se debe perder la referencia de que la reducción de velocidad ha sido progresiva en los tramos anteriores. Por ello para determinar el tramo crítico deberíamos utilizar un criterio de máxima desaceleración entre tramos, resultando ser de  $-0.19 \text{ ms}^{-1}$  entre el T1 y T2;  $-0.02 \text{ ms}^{-1}$  entre el T2 y T3; y,  $-0.06 \text{ ms}^{-1}$  entre los tramos T3 y T4. Sobre la base de este criterio deberíamos considerar como tramos críticos T1 y T2 donde se obtiene una reducción de la velocidad media resultante de  $-0.19 \text{ ms}^{-1}$ .

Para describir el comportamiento de la velocidad media resultante en estos tramos, se recurre a la gráfica de velocidad-tiempo que presentamos en la **Figura 4.1.4**. Esta nos confirma que la velocidad instantánea resultante del CG presenta sus valores mínimos al final del T2 en el instante de paso del palo de viraje.

A partir de este momento la componente transversal ( $VZ_{CG}$ ) pasa de tener valores negativos a aproximarse a valores 0.00 coincidiendo, prácticamente, la componente horizontal de la velocidad ( $VX_{CG}$ ) con la resultante ( $VR_{CG}$ ) lo que nos permite afirmar dos hechos: a) que al final de T2 finaliza la trayectoria curva y el esquiador se orienta hacia la dirección de la pendiente, y b) a partir de T2 hasta el final, la dirección del esquiador es coincidente con el eje horizontal o línea de máxima pendiente.

Al margen de la presencia en este tramo crítico del palo de viraje, existen igualmente dos eventos que entendemos pueden tener cierta relación con la citada reducción de la velocidad: a) al final del tramo crítico (T2) se produce el cambio de orientación de los esquís hacia el interior de la curva, y b) instantes antes de hacer contacto con el palo y a comienzos de T2, el esquiador SH1 se encuentra en la posición más baja de toda su trayectoria. Este



**Figura 4.1.4.** Representación gráfica de las velocidades medias resultante, horizontal y transversal del CG ( $V_{R\ CG}$ ,  $V_{X\ CG}$  y  $V_{Z\ CG}$ , respectivamente) en SH1 por tramos del viraje analizado.

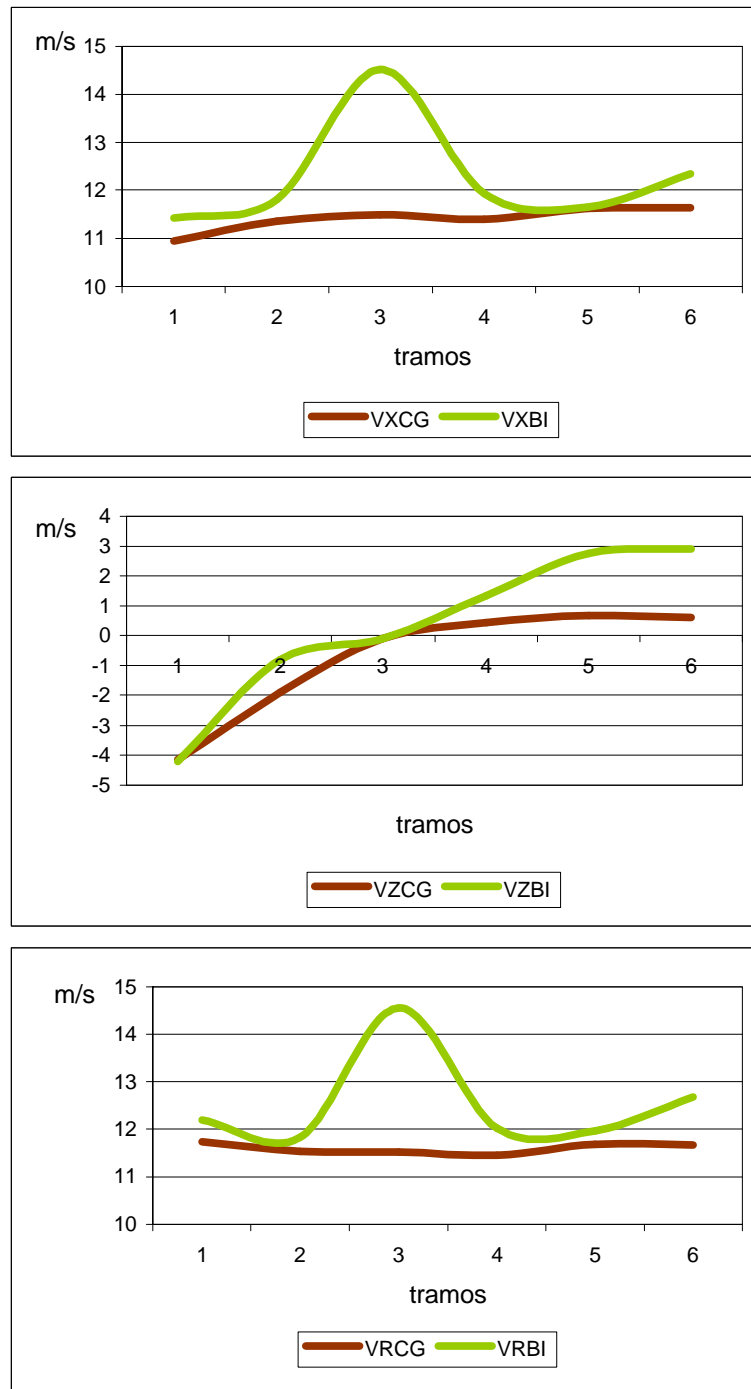
momento es aprovechado por el esquiador para cambiar la dirección de los esquís, posiblemente gracias a la disminución de la presión ejercida sobre los esquís.

Siguiendo los estudios previos encontrados en la bibliografía existente, entre los que destacamos los de Forg-Rob y Nachbauer (1988), Goodwin (1993), y Raschner et al (1996 y 1997) hemos estudiado la velocidad media resultante, horizontal y transversal de la punta de la bota de la pierna externa con respecto a la velocidad media (resultante, horizontal y transversal) del CG del sistema.

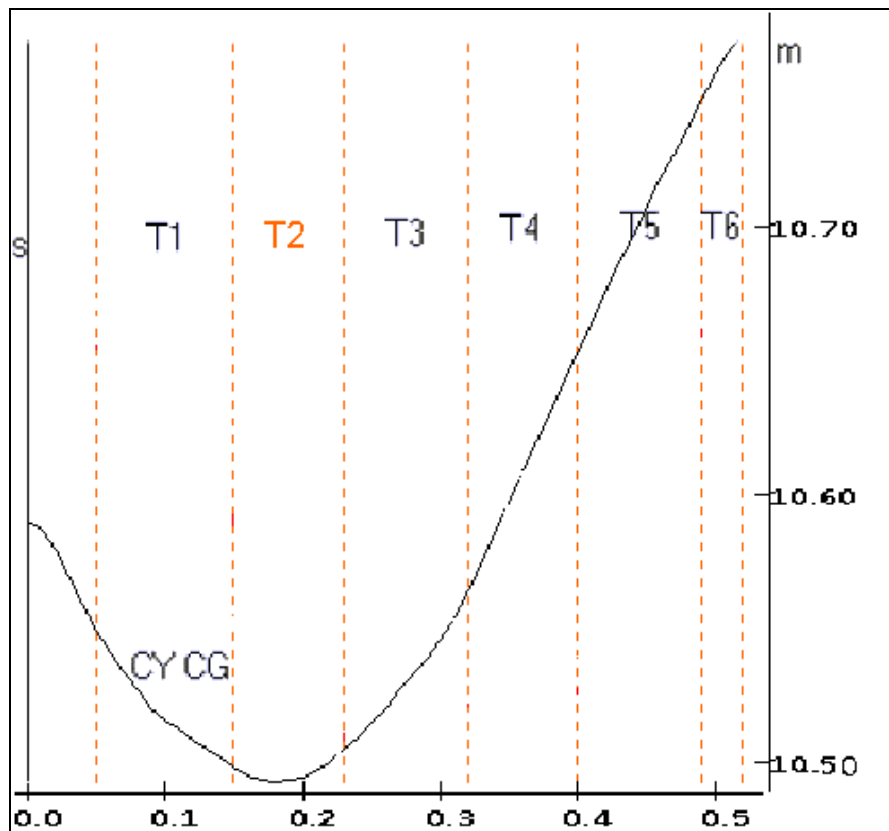
En la **Figura 4.1.5**, se representan las velocidades medias horizontal, transversal y resultante de la punta de la bota de la pierna externa ( $VX_{BI}$ ,  $VZ_{BI}$  y  $VR_{BI}$ , respectivamente) y del CG del sistema del SH1, en cada uno de los tramos en que se ha dividido el espacio analizado de la puerta de viraje. En ellas observamos como a mediados del tramo 3, tanto la velocidad media resultante como la obtenida por la componente horizontal de la punta de la bota izquierda ( $VR_{BI}$  y  $VX_{BI}$ , respectivamente) alcanzan su máximo valor justo cuando la componente transversal ( $VZ_{BI}$ ) reduce su valor y el SH1 obtiene una trayectoria coincidente con la dirección de la pendiente, coincidiendo con lo que hemos comentado anteriormente con los valores de la velocidad media del CG. Posteriormente, reduce las velocidades medias resultante y horizontal de la punta de la bota izquierda hasta el final del T3, debido principalmente a que comienza a desviarse hacia el interior de la línea de máxima pendiente con el objeto de terminar esta curva y preparar el inicio de la siguiente, empujando el esquí hacia delante. Esta acción implica una anticipación de los esquís hacia la pendiente.

En la **Figura 4.1.6**, presentamos la trayectoria del CG, atendiendo a la coordenada Y del sistema, de SH1 en el recorrido analizado, donde podemos





**Figura 4.1.5.** Representación gráfica de las velocidades medias horizontal, transversal y resultante de la punta de la bota de la pierna externa ( $VX_{BI}$ ,  $VZ_{BI}$  y  $VR_{BI}$ , respectivamente) en SH1 por tramos del viraje analizado con respecto a sus homónimas del CG del sistema ( $VX_{CG}$ ,  $VZ_{CG}$  y  $VR_{CG}$ , respectivamente), expresadas en valor absoluto ( $\text{ms}^{-1}$ ).

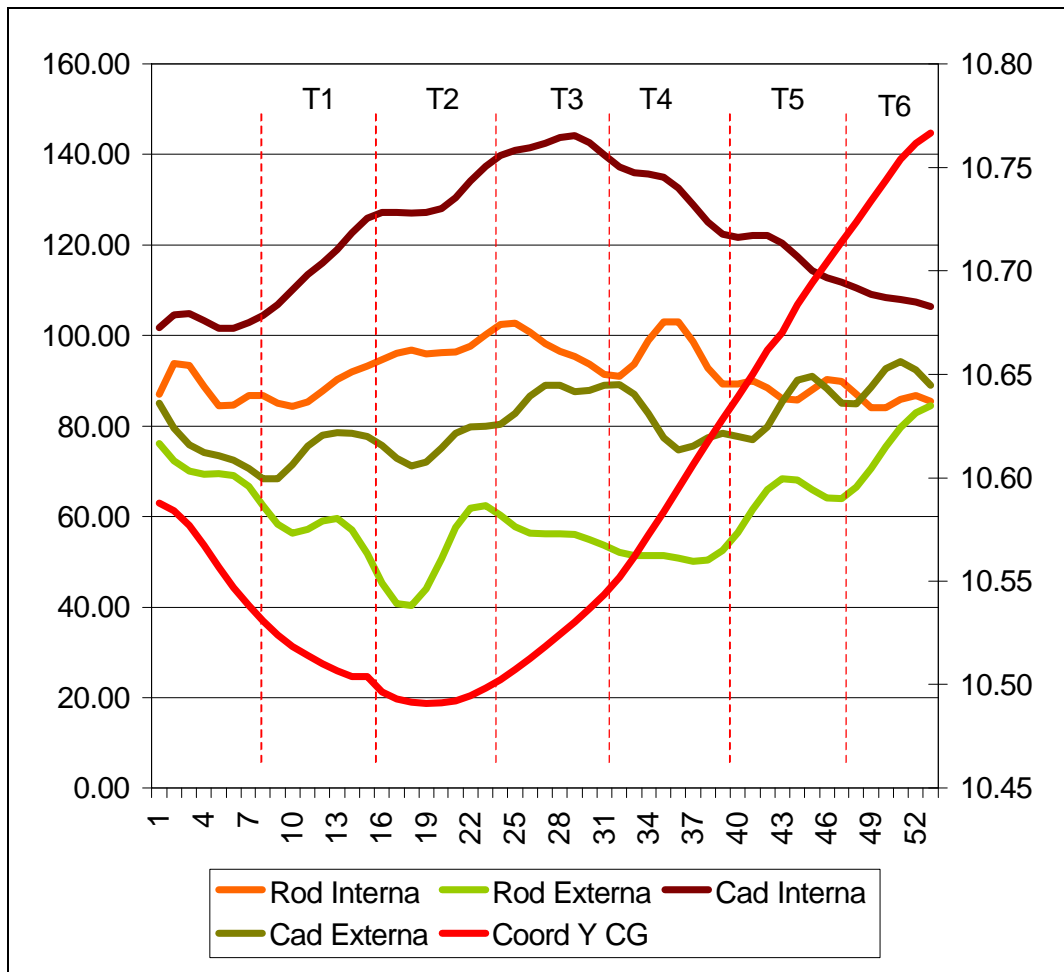


**Figura 4.1.6.** Representación gráfica de la coordenada Y del CG ( $CY_{CG}$ ) en SH1 por tramos del viraje analizado. En rojo, tramo crítico.

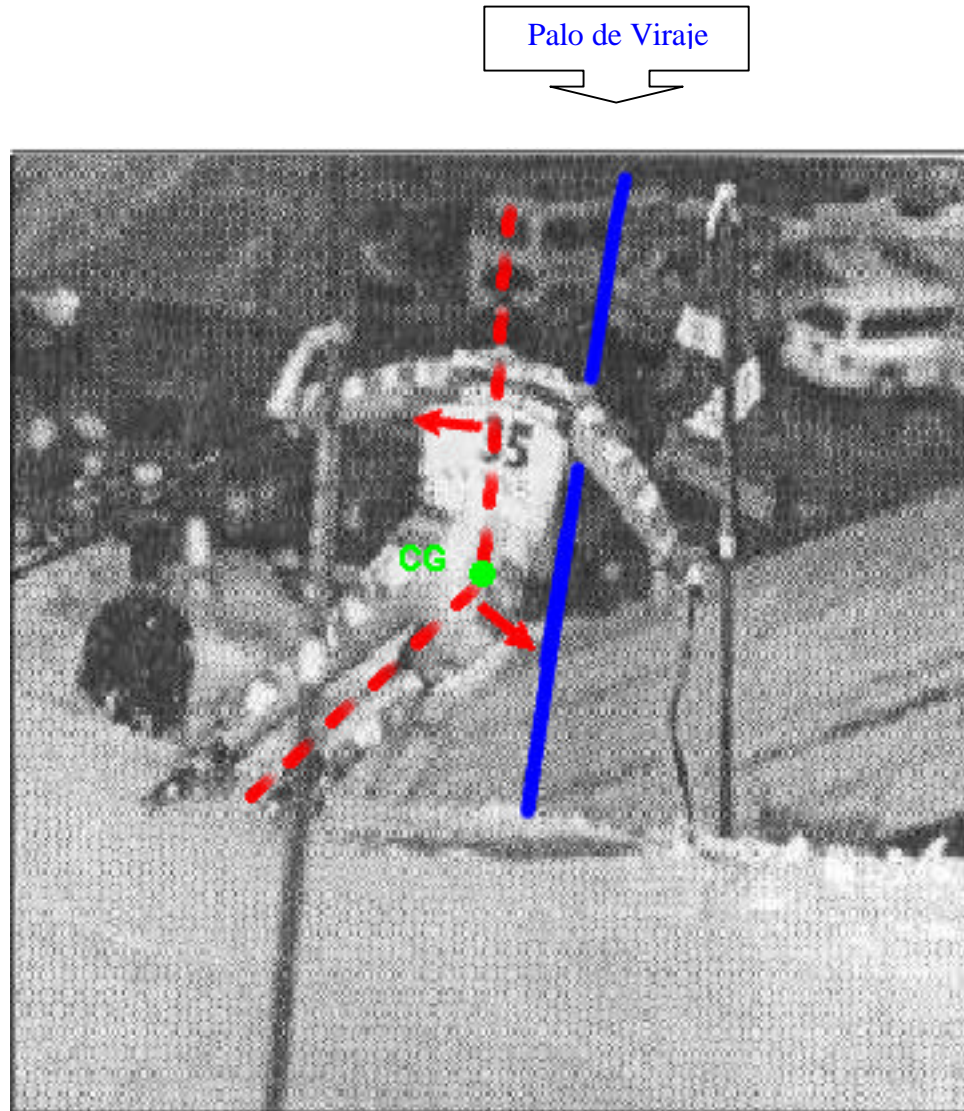
apreciar como a partir de que alcanza su posición más baja al inicio de T2, éste comienza a elevarse consiguiendo un incremento de la fuerza normal contra el suelo, consecuencia de la aceleración vertical del CG (Teorema del Centro de Masas, Gutiérrez, 1998). Se puede decir que posiblemente, este incremento en la fuerza vertical que se ejerce contra el suelo, le permite cambiar la dirección del CG, sin aumentar la componente transversal en exceso y orientarse hacia la línea de máxima pendiente.

Para comprobar mejor las causas que producen la variación en la componente vertical del CG, en la **Figura 4.1.7** se presenta la goniometría de la articulación de la rodilla y de la cadera tanto de la más cercana al palo de viraje (rodilla interna, cadera interna) como la más alejada (externas). En ella se observa como la cadera interna tiene una tendencia a la extensión hasta el final de T2, mientras que la rodilla externa tiende a la flexión durante los dos primeros tramos y la rodilla interna y la cadera externa tienden a mantenerse en sus valores goniométricos. Este hecho nos confirma que el CG del esquiador no baja como consecuencia de la flexión e las articulaciones de cadera y rodilla sino más bien debido a la inclinación lateral y hacia delante del esquiador, como podemos apreciar en la **Figura 4.1.8**.

El hecho de que la cadera interna se extienda  $40^\circ$  en los dos primeros tramos mientras que la externa tienda a mantener su angulación e incluso llegar a tener una tendencia hacia la flexión, debe significar que existe un relativo cambio de inclinación del tronco hacia fuera del palo de viraje y una inclinación interna de las extremidades inferiores del esquiador acompañada de una inclinación hacia delante. La inclinación hacia fuera del palo de viraje del tronco hace que se desplace el peso del cuerpo hacia la pierna exterior la cual como consecuencia tiende a flexionarse a la vez que los miembros inferiores se inclinan hacia el interior y hacia adelante de la curva (ver Figura 4.1.8.).



**Figura 4.1.7.** Goniometría de las articulaciones de cadera y rodilla ( $q_{Ca}$  y  $q_{Ra}$ , interna y externa, respectivamente) y la coordenada Y del CG ( $CY_{CG}$ ) en SH1, por tramos del viraje analizado.



**Figura 4.1.8.** Inclínación del tronco y de las extremidades inferiores del esquiador (hacia el exterior y hacia el interior y hacia delante de la curva, respectivamente), vista desde una visión posterior.

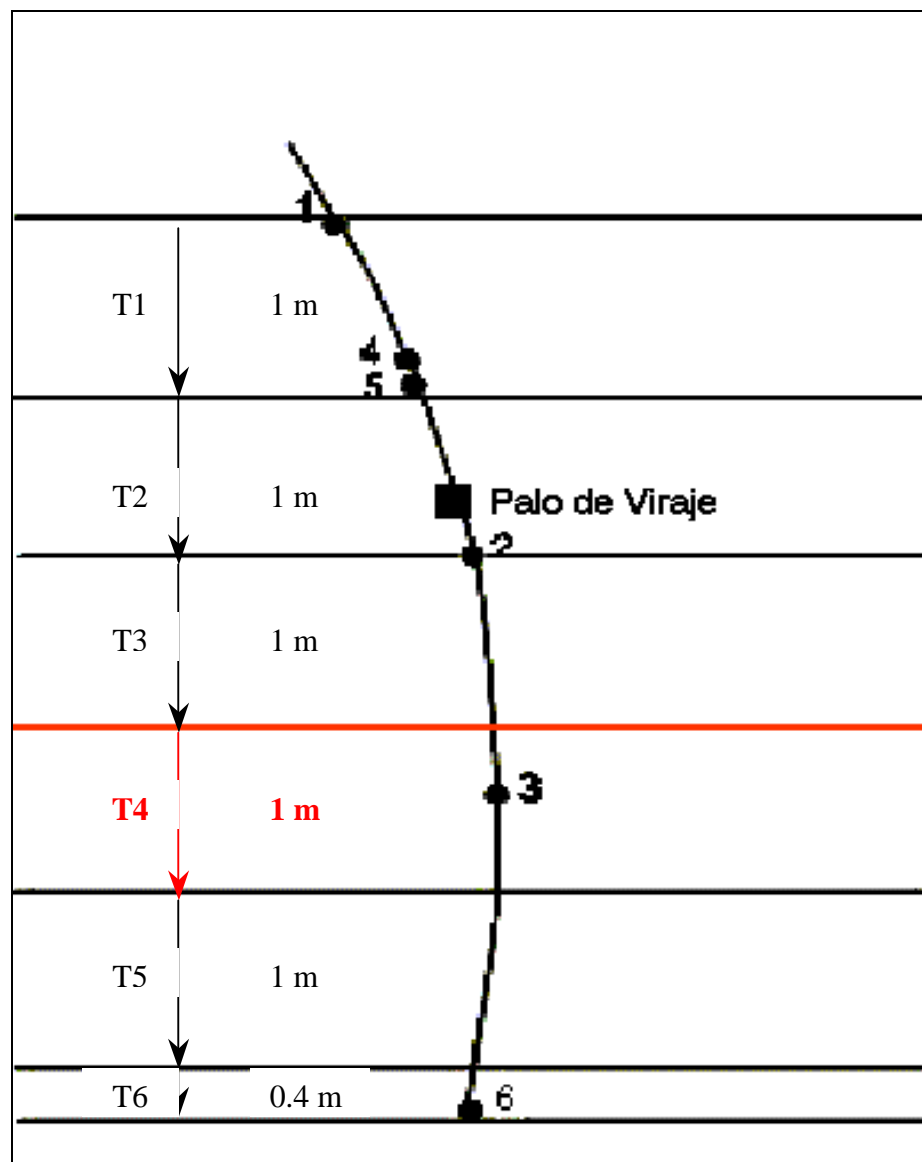
---

### 4.1.3. Análisis individual de SH2

En la **Figura 4.1.9** y en la **Tabla 4.1.3**, se presenta la trayectoria del CG en el recorrido filmado del sujeto SH2 así como la componente horizontal, transversal y resultante de la velocidad media ( $VX_{CG}$ ,  $VZ_{CG}$  y  $VR_{CG}$ , respectivamente) en cada uno de los tramos en los que se ha dividido el espacio analizado de la puerta de viraje seleccionada. En este caso y considerando de nuevo la velocidad media resultante del centro de gravedad ( $VR_{CG}$ ), el sujeto SH2 comienza a reducir su velocidad a partir de T2 y continúa disminuyendo progresivamente hasta la mitad de T5. Esta reducción está acompañada igualmente por una reducción de la velocidad en su componente horizontal ( $VX_{CG}$ ). Teniendo como criterio para la elección del tramo crítico las diferencias de velocidades medias en cada tramo, se comprueba como dicho tramo estaría entre T3 y T4, con una reducción de la velocidad media resultante del CG ( $VR_{CG}$ ) de  $-0.54 \text{ ms}^{-1}$ . Analizando la gráfica de velocidad-tiempo de SH2 que podemos ver en la **Figura 4.1.10**, podemos decir que el CG obtiene sus valores mínimos al final de T4, por lo cual consideramos como tramo crítico de este sujeto la segunda mitad de T4.

Debemos hacer notar que en este tramo no se encuentra la puerta de viraje. Sus problemas en cuanto a la velocidad de desplazamiento son posteriores al paso del palo de viraje, no consiguiendo su orientación hacia la línea de máxima pendiente hasta T5.

Este esquiador (SH2) mantiene una velocidad media transversal ( $VZ_{CG}$ ) negativa hasta final de T3 e inicio de T4, lo que significa que hasta este instante se está alejando de la dirección de la línea de máxima pendiente, cambiando su orientación a partir de la mitad de T4 para acercarse de nuevo a



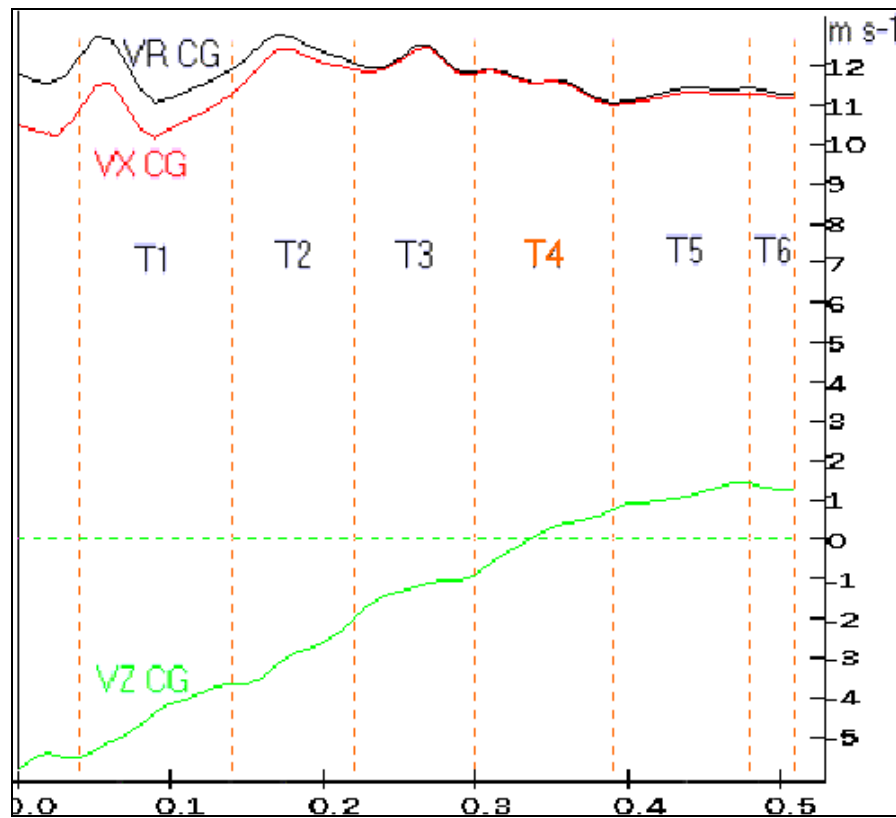
**Figura 4.1.9.** Representación gráfica de la trayectoria del CG en SH2, posiciones espaciales analizadas (eventos) por tramos del viraje analizado y tramo crítico (en rojo) donde **1**, se corresponde con el momento de inicio de la secuencia; **2**, es la posición más baja del CG; **3**, es la posición en donde la proyección vertical de CG está más alejada de la puerta de viraje; **4**, es el momento de contacto con el palo de viraje; **5**, es el momento donde el esquí exterior cambia de trayectoria hacia el interior de la curva; y **6**, se corresponde con el momento final de la secuencia.

**Tabla 4.1.3.** Velocidad media alcanzada del CG en SH2, en la dirección del movimiento ( $VX_{CG}$ ), en la componente Z ( $VZ_{CG}$ ) y resultante ( $VR_{CG}$ ) por tramos del viraje analizado, expresado en valor absoluto ( $ms^{-1}$ ).

TRAMOS	$VX_{CG} (ms^{-1})$	$VZ_{CG} (ms^{-1})$	$VR_{CG} (ms^{-1})$
T1	10.86	-4.50	11.78
T2	12.05	-2.98	12.43
T3	12.05	-1.28	12.13
T4	11.55	0.08	11.59
T5	11.22	1.10	11.33
T6	11.20	1.28	11.32

---





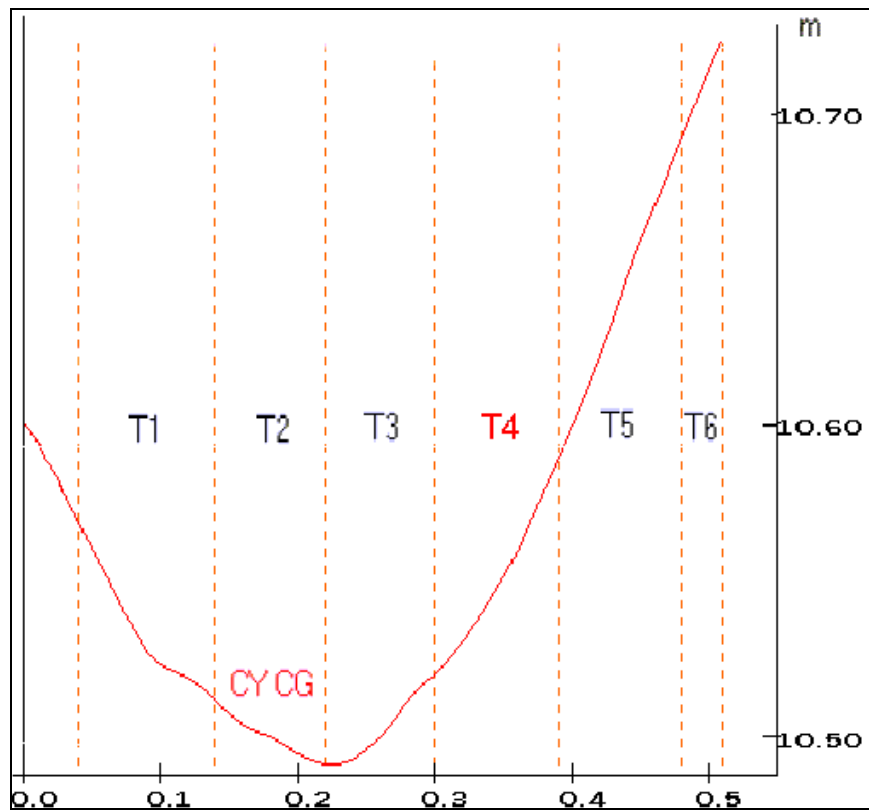
**Figura 4.1.10.** Representación gráfica de las velocidades medias resultante, horizontal y transversal del CG ( $VR_{CG}$ ,  $VX_{CG}$  y  $VZ_{CG}$ , respectivamente) en SH2 por tramos del viraje analizado. En rojo, tramo crítico.

ella. Esto supone que este sujeto se mantiene muy alejado del palo de viraje en T4, realizando por consiguiente un recorrido mayor entre las puertas.

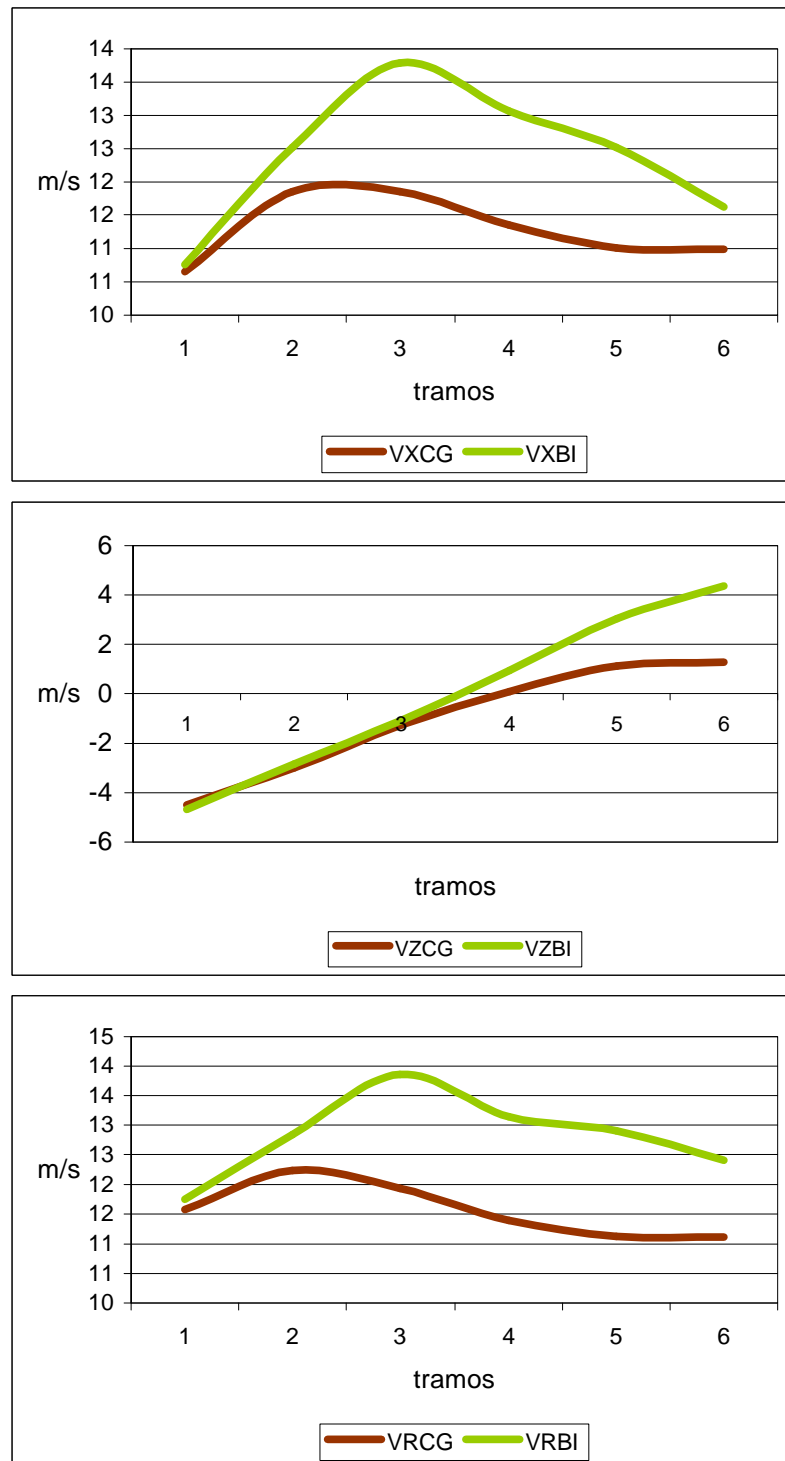
Este hecho puede estar motivado por retrasar el instante en el que el CG debe estar en la posición más baja (después de haber pasado la puerta). Así, cuando comienza a elevar el CG y a obtener las fuerzas normales para cambiar la dirección, es a partir de T3 en lugar de T2, como hacía SH1. Este hecho podemos observarlo en la **Figura 4.1.11**.

Con respecto a la velocidad media resultante y horizontal de la punta de la bota izquierda en SH2 ( $VR_{BI}$  y  $VX_{BI}$ , respectivamente), éste tiene un comportamiento similar a SH1. Como podemos observar en la **Figura 4.1.12**, este sujeto también obtiene sus máximos valores a mediados del tramo 3 y una reducción de la velocidad media de la componente transversal ( $VZ_{BI}$ ) a partir de este momento. Es destacable, en el análisis de la velocidad media transversal, como hasta finales del T3, la velocidad del CG y de la punta de la bota izquierda obtienen valores similares y a partir de este momento la reducción de la velocidad del CG es menor que la de la punta de la bota, debido principalmente a que los pies del esquiador realizan un mayor desplazamiento lateral que el CG del sistema si lo comparamos con SH1. Este comportamiento observado a partir del análisis de las velocidades medias del CG y de la punta de la bota de SH2 con respecto a SH1, nos confirma el hecho de que el sujeto SH1 mueve sus pies más rápido que los otros dos sujetos en el tramo donde realiza una trayectoria más curva (T3) y vuelve a tener valores similares cuando la trayectoria se orienta y se dirige hacia el inicio de la siguiente curva en dirección de la pendiente.

Al contrario de lo que ocurría en el SH1, en SH2 se observa una tendencia clara hacia la flexión tanto de la rodilla como de la cadera externa y una tendencia a la extensión de las articulaciones más próximas a la puerta



**Figura 4.1.11.** Representación gráfica de la coordenada Y del CG ( $CY_{CG}$ ) en SH2, por tramos del viraje analizado y tramo crítico en rojo.



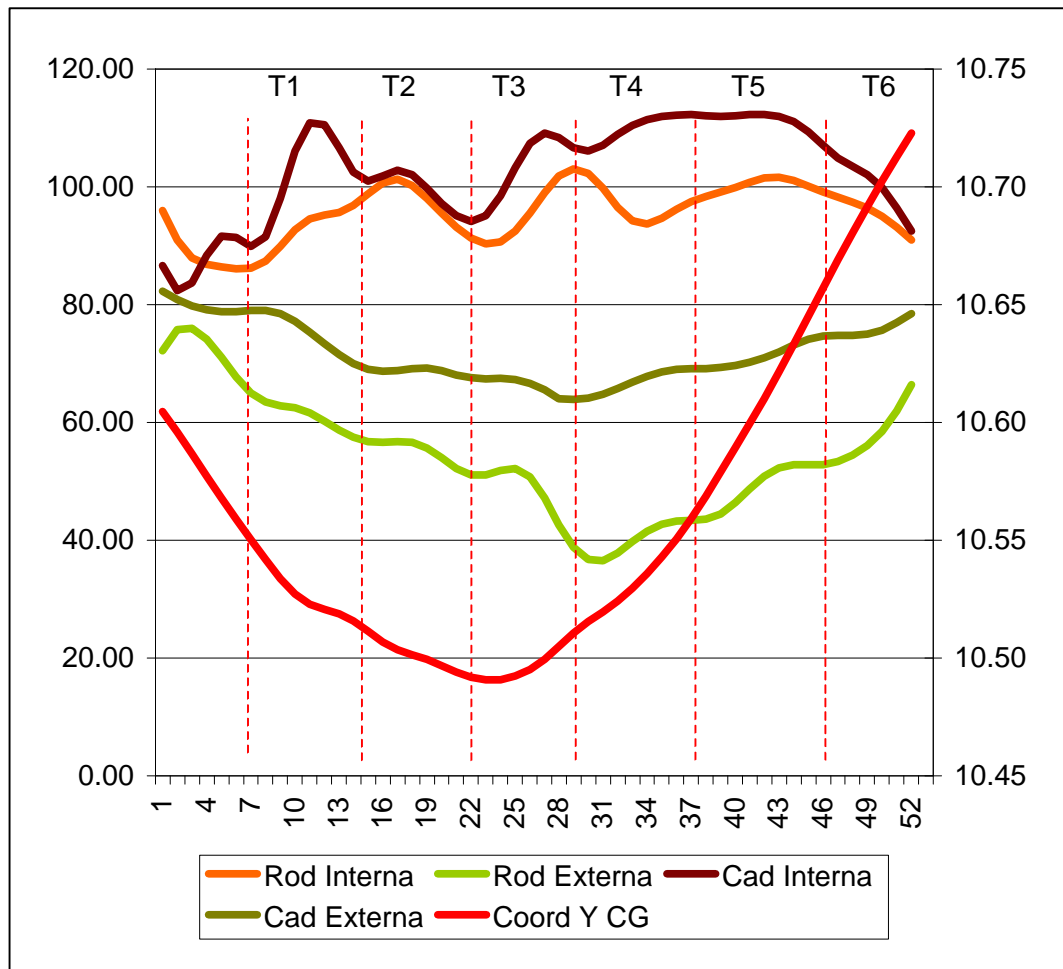
**Figura 4.1.12.** Representación gráfica de las velocidades medias horizontal, transversal y resultante de la punta de la bota de la pierna externa ( $VX_{BI}$ ,  $VZ_{BI}$  y  $VR_{BI}$ , respectivamente) en SH2, por tramos del viraje analizado con respecto a sus homónimas del CG ( $VX_{CG}$ ,  $VZ_{CG}$  y  $VR_{CG}$ , respectivamente) del sistema, expresados en valor absoluto ( $\text{ms}^{-1}$ ).

(internas) hasta finales de T3, tal y como podemos comprobar en la **Figura 4.1.13**. Este esquiador retrasa su elevación del CG hasta el tramo T3 y lo hace a expensas de la extensión de las articulaciones más alejadas del palo de viraje (externas) manteniendo un ángulo relativamente alto de las articulaciones más próximas (internas).

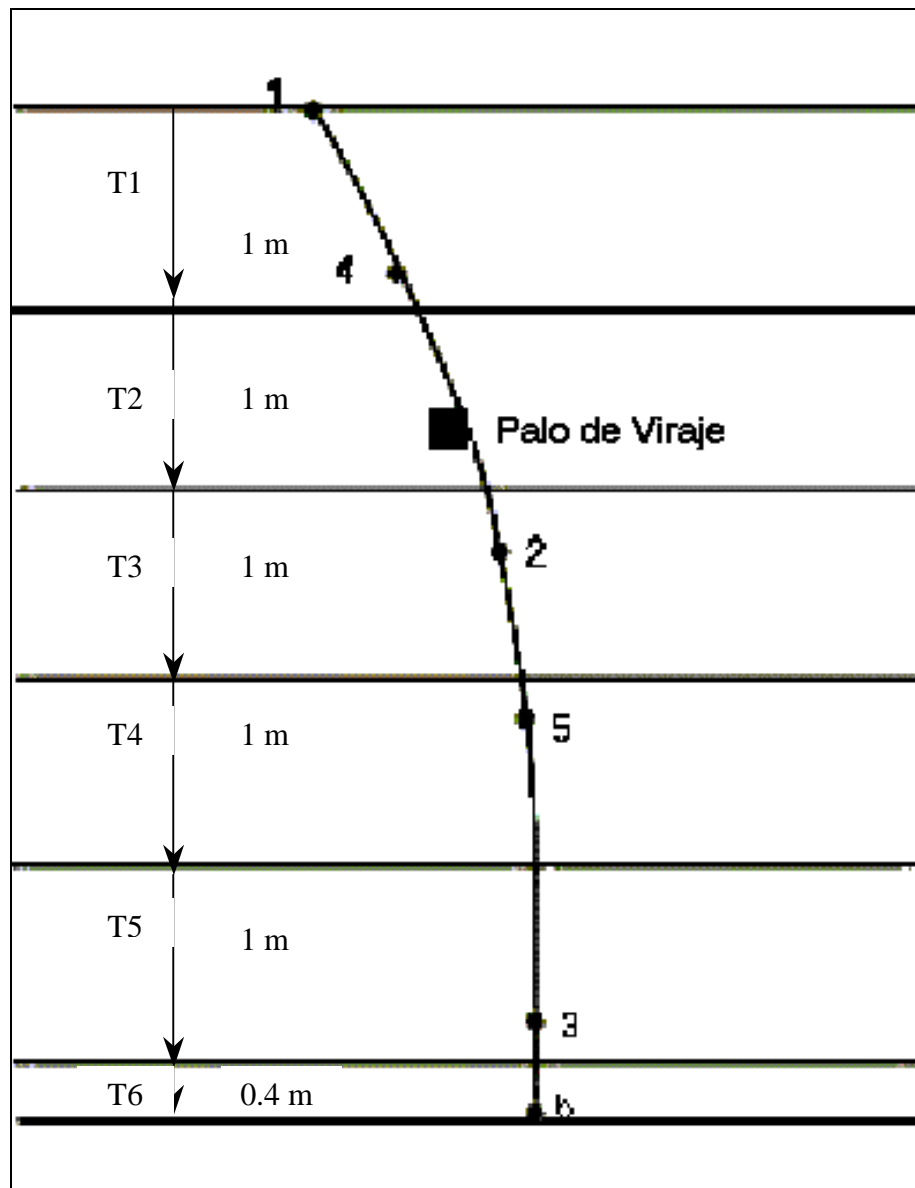
#### **4.1.4. Análisis individual de SH3**

En la **Figura 4.1.14** y en la **Tabla 4.1.4**, se presenta la trayectoria del CG en el recorrido filmado del sujeto SH3 así como la componente horizontal, transversal y resultante de la velocidad media ( $VX_{CG}$ ,  $VZ_{CG}$  y  $VR_{CG}$ , respectivamente) en cada uno de los tramos en los que se ha dividido el espacio analizado de la puerta de viraje seleccionada. En este nuevo caso y considerando la velocidad media resultante del CG ( $VR_{CG}$ ) en SH3, se observa que al contrario de lo que sucedía en los dos sujetos anteriores (SH1 y SH2), este esquiador desciende produciendo aceleraciones y desaceleraciones medias de la velocidad resultante del CG como muestra los datos que comentamos a continuación; una reducción de  $-0.43 \text{ ms}^{-1}$  entre T1 y T2; un aumento de  $1.14 \text{ ms}^{-1}$  entre T2 y T3; una reducción de  $-1.20 \text{ ms}^{-1}$  entre T3 y T4; y de nuevo un aumento de  $1.68 \text{ ms}^{-1}$  entre T4 y T5. La primera valoración que se puede hacer de estas aceleraciones y desaceleraciones es que éstos cambios de velocidad deben implicar un considerable gasto energético e incremento de la fuerza requerida que, a su vez, aumenta la fuerza de rozamiento contra la nieve del sistema, así como ciertos errores de ejecución en la realización del paso de la puerta. Éste hecho se manifiesta también en el análisis temporal del tiempo invertido en la realización del viraje (TV) con respecto a los anteriores sujetos (SH1 y SH2).

Con respecto a la velocidad media resultante, horizontal y transversal de la punta de la bota izquierda ( $VR_{BI}$ ,  $VX_{BI}$  y  $VZ_{BI}$ , respectivamente) y su



**Figura 4.1.13.** Goniometría de las articulaciones de cadera y rodilla ( $q_{Cd}$  y  $q_{Rd}$ , interna y externa, respectivamente) y coordenada Y del CG ( $CY_{CG}$ ) en SH2, por tramos del viraje analizado.



**Figura 4.1.14.** Representación gráfica de la trayectoria del CG en SH3, posiciones espaciales analizadas (eventos) por tramos del viraje analizado donde **1**, se corresponde con el momento de inicio de la secuencia; **2**, es la posición más baja del CG; **3**, es la posición en donde la proyección vertical de CG está más alejada de la puerta de viraje; **4**, es el momento de contacto con el palo de viraje; **5**, es el momento donde el esquí exterior cambia de trayectoria hacia el interior de la curva; y **6**, se corresponde con el momento final de la secuencia.

**Tabla 4.1.4.** Velocidad media alcanzada del CG en SH3, en la dirección del movimiento ( $VX_{CG}$ ), en la componente Z ( $VZ_{CG}$ ) y resultante ( $VR_{CG}$ ) por tramos del viraje analizado, expresados en valor absoluto ( $ms^{-1}$ ).

TRAMOS	$VX_{CG} (ms^{-1})$	$VZ_{CG} (ms^{-1})$	$VR_{CG} (ms^{-1})$
T1	10.11	-5.44	11.52
T2	10.16	-4.33	11.09
T3	11.96	-2.41	12.23
T4	10.90	-0.54	10.94
T5	13.40	-0.22	13.46
T6	10.27	1.06	10.36

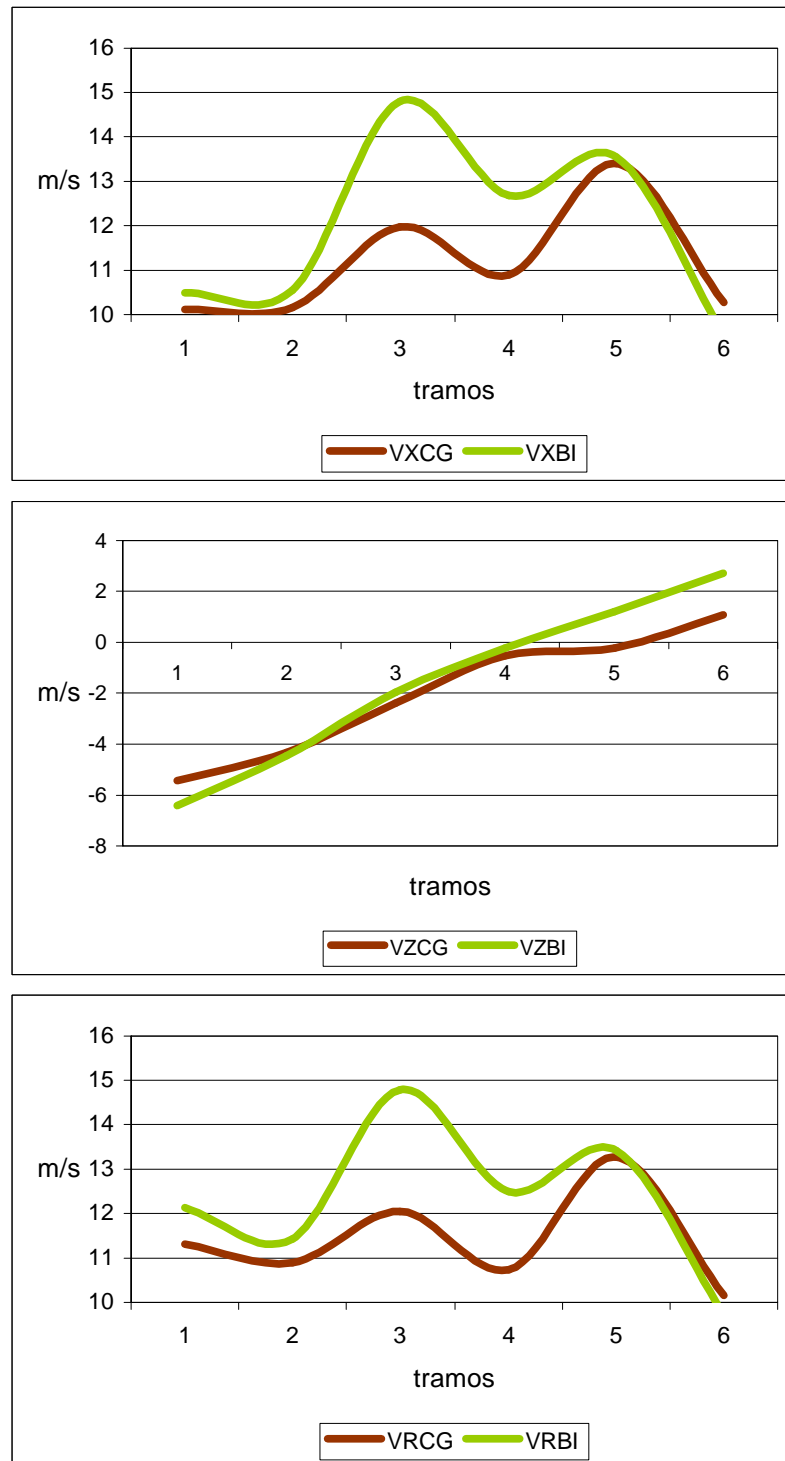
---



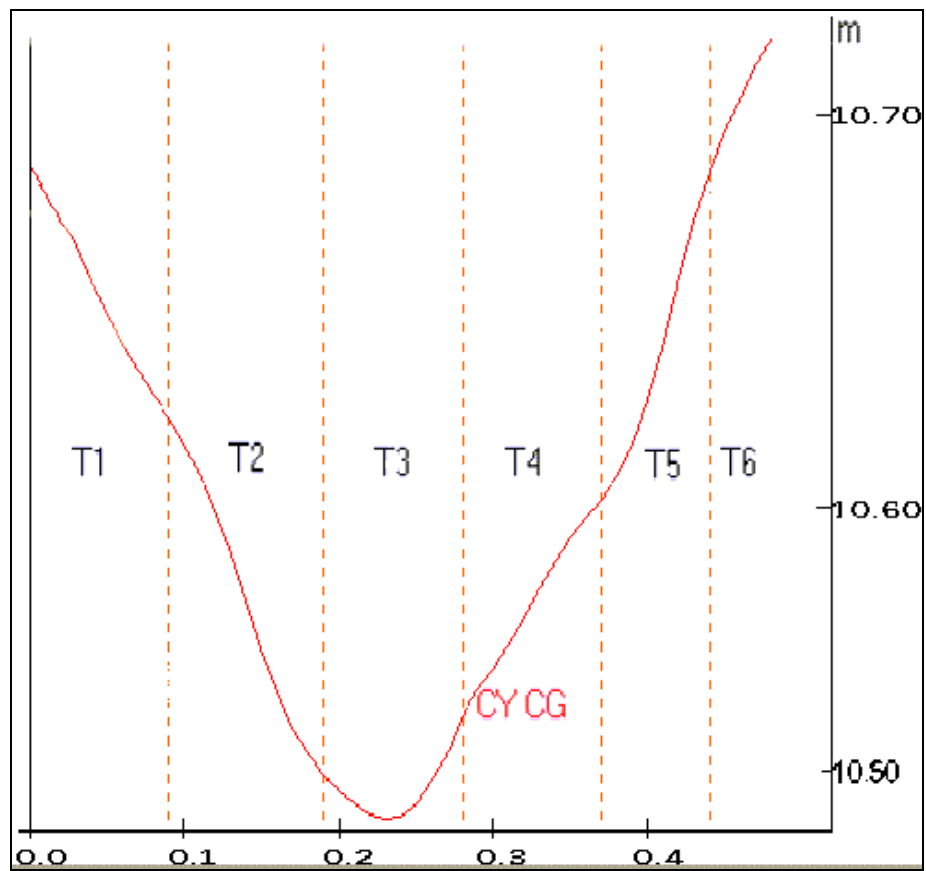
relación con las obtenidas por el CG del sistema, presentada en la **Figura 4.1.15**, podemos decir que existen comportamientos similares a los comentados anteriormente, cuando analizábamos las velocidades del CG del sistema. Este sujeto, al igual que el SH2, realiza desplazamientos laterales de los pies a gran velocidad durante la trayectoria en el viraje a diferencia de SH1, que los realiza sólo en el momento de máxima curvatura reduce la velocidad de su CG después de desplazar los esquís hacia la dirección de la pendiente.

Uno de los elementos que nos hace pensar en la problemática de paso de este esquiador por la puerta analizada, reside en el retraso del movimiento descendente de su CG, que podemos observar en la **Figura 4.1.16**. La posición más baja del CG la obtiene prácticamente en la mitad de T3. Hasta este instante el CG está descendiendo y consecuentemente reduciendo la fuerza normal contra el suelo, por lo que el sujeto continúa después de pasar la puerta alejándose de la línea de máxima pendiente. A partir de la mitad de T3 cuando el CG se está elevando, comienza el cambio de dirección de los esquís hacia la línea de la pendiente, pero esto ya debería de haberse realizado con anterioridad en T2 o T3. La consecuencia de todo esto es que al final del recorrido analizado se encuentra demasiado alejado de la trayectoria óptima para abordar la siguiente puerta.

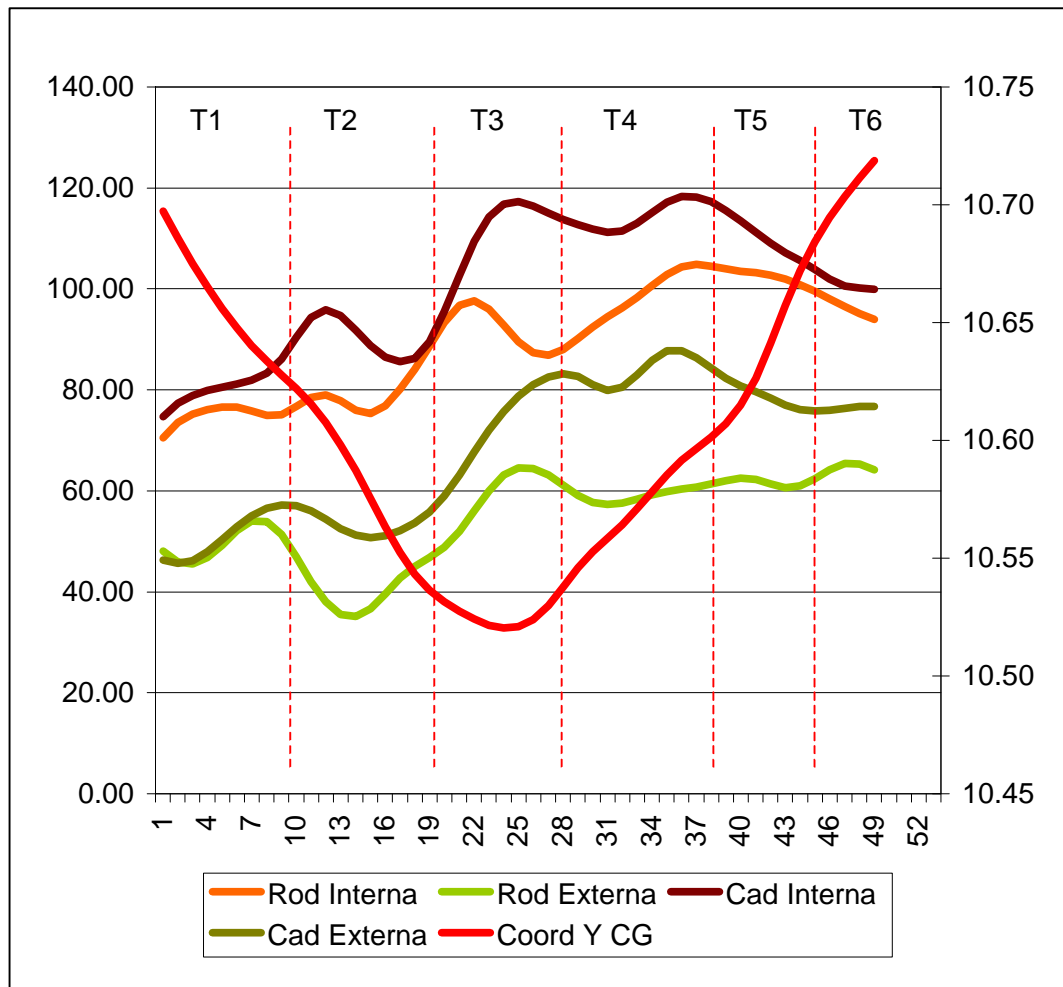
En la **Figura 4.1.17**, se presenta la goniometría de las articulaciones de rodilla y cadera internas y externas al palo de viraje de SH3. En ella se observa que este esquiador comienza esta puerta con unos valores goniométricos muy inferiores a los otros sujetos analizados lo que le hace flexionar la rodilla externa por debajo de  $40^\circ$  al final de T1 y a partir de este instante, todas las articulaciones comienzan a extenderse, mientras que el CG continúa descendiendo. Este descenso del CG mientras que las articulaciones de rodilla y cadera se extienden, sólo puede estar motivado por el aumento de la



**Figura 4.1.15.** Representación gráfica de las velocidades medias horizontal, transversal y resultante de la punta de la bota de la pierna externa ( $VX_{BI}$ ,  $VZ_{BI}$  y  $VR_{BI}$ , respectivamente) en SH3 por tramos del viraje analizado con respecto a sus homónimas del CG ( $VX_{CG}$ ,  $VZ_{CG}$  y  $VR_{CG}$ , respectivamente) del sistema, expresados en valor absoluto ( $\text{ms}^{-1}$ ).



**Figura 4.1.16.** Representación gráfica de la coordenada Y del CG ( $CY_{CG}$ ) en SH3, por tramos del viraje analizado.



**Figura 4.1.17.** Goniometría de las articulaciones de cadera y rodilla ( $q_{Cd}$  y  $q_{Rd}$ , interna y externa, respectivamente) y coordenada Y del CG ( $CY_{CG}$ ) en SH3, por tramos del viraje analizado.

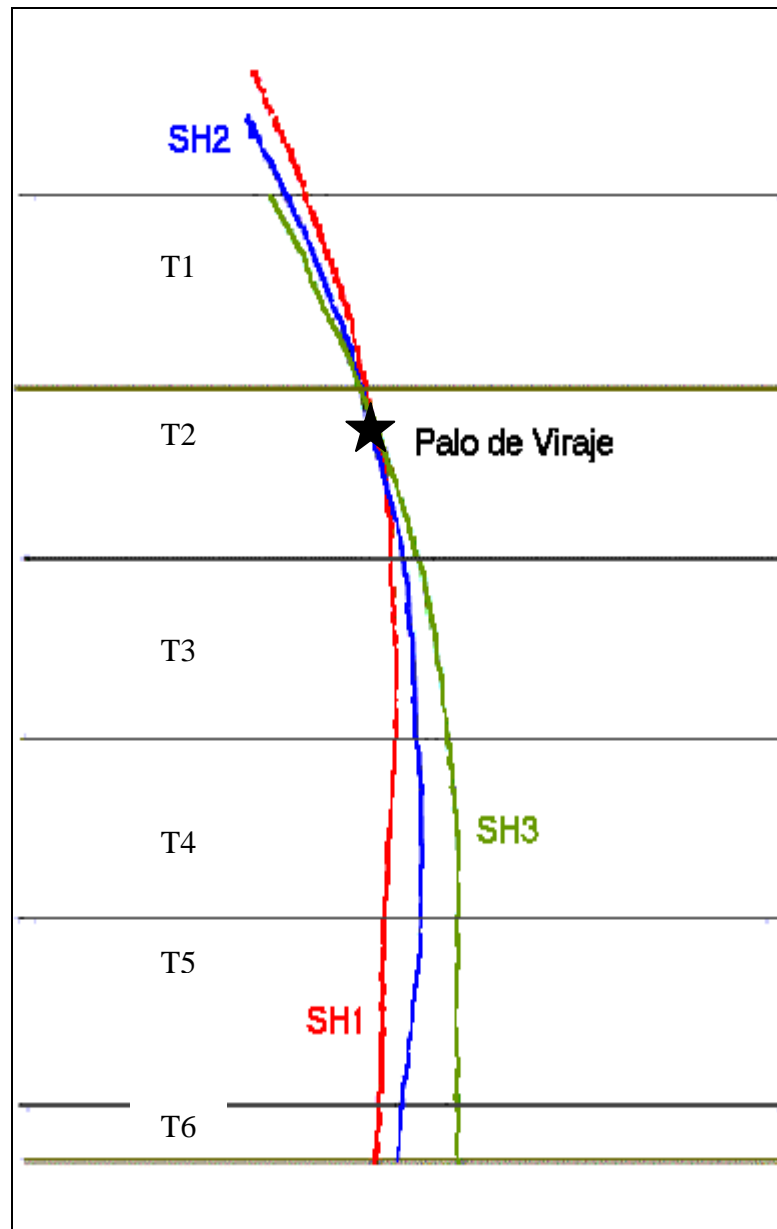
inclinación del esquiador hacia el interior de la curva al final del viraje analizado, consiguiendo una inclinación final excesiva.

#### **4.1.5. Análisis de las trayectorias en sujetos hombres (SH)**

Finalmente, en la **Figura 4.1.18**, se presentan las trayectorias de los tres sujetos analizados donde se comprueba como SH1 cambia su dirección hacia la línea de la pendiente en T2, tramo coincidente con la ubicación de la puerta de viraje obteniendo a partir de este momento una trayectoria orientada hacia la pendiente y con una predisposición espacial óptima para abordar la siguiente puerta.

Por el contrario, SH2 recorre más espacio que SH1 como consecuencia de retrasar a T4 el mayor cambio de dirección hacia la pendiente, aunque en este caso también se puede considerar que se encuentra en una buena predisposición para la siguiente puerta.

Con respecto a SH3, además de retrasar, como le sucedía a SH2 el cambio de dirección hacia la pendiente al final de su trayectoria, no parece encontrarse en unas condiciones óptimas para abordar la siguiente puerta, habiéndose alejado demasiado de la línea vertical del palo de viraje. Se observa como es el único de los esquiadores que mantiene velocidades medias con valores negativos en la componente transversal en T5, lo que implica que aún en ese tramo continúa alejándose de la vertical. Esto se traducirá, seguramente, en problemas a la hora de abordar la siguiente puerta. Por este motivo, SH2 y SH3 obtienen velocidades altas durante toda su trayectoria en el desplazamiento lateral de los pies, ya que tratan de recuperar la línea más eficaz, procurando de esta forma anticipar el inicio de la siguiente curva. Este ejemplo puede servirnos para mostrar que estos corredores van tarde de línea y



**Figura 4.1.18.** Representación gráfica de las trayectorias del CG en sujetos hombres (SH).

que tratan, con el movimiento rápido de sus pies, de buscar mejor línea y recuperar tiempo perdido.

## **4.2. Resultados del análisis del viraje en Slalom en sujetos damas (SD).**

### **4.2.1. Relativos al análisis temporal**

En la **Tabla 4.2.1** se expresa la estadística descriptiva del estudio de análisis temporal del Slalom Damas del Campeonato del Mundo de Sierra Nevada 1996.

En ella se aprecia que el tiempo medio de bajada (TB) conseguido por todas las esquiadoras analizadas es de 47.78 s, con una  $DT= 1.022$  s. Debemos considerar que la desviación típica que presenta el grupo de deportistas analizadas en esta competición de gran relevancia internacional, es excesiva. Esto quiere decir que aun siendo las mejores esquiadoras del mundo en este momento, su nivel es relativamente variable. Posiblemente este hecho se deba a que se ha incluido dentro del grupo a deportistas no especialistas en esta disciplina, como ha sido la esquiadora española SD9, que obtiene tres segundos más que la ganadora de la bajada (SD5). Si no tuviéramos en cuenta el tiempo de bajada obtenido por la esquiadora española, el tiempo medio de bajada del resto de esquiadoras se reduciría en 0.27 s, y la desviación típica en 0.29 s.

Este mismo hecho sucede con el tiempo intermedio (TI), donde el tiempo medio es de 23.49 s y la  $DT= 0.366$  s. En este caso aun se incrementan las diferencias entre sujetos, donde por poner un ejemplo, la esquiadora española (SD9) ya pierde 2.08 s con respecto a la esquiadora más rápida en este tramo de la bajada (SD4). La estadística descriptiva del tiempo intermedio sin considerar a la

**Tabla 4.2.1.** Análisis temporal y estadística descriptiva en Sujetos Damas, expresado en valor absoluto (s), donde **TB** es el Tiempo de Bajada; **TI** es el Tiempo intermedio; y **TS** es el Tiempo de Secuencia de viraje analizado.

<b>SUJETO</b>	<b>TB (s)</b>	<b>TI (s)</b>	<b>TS (s)</b>
<b>SD1</b>	48.90	24.1	0.57
<b>SD2</b>	48.39	23.6	0.53
<b>SD3</b>	47.12	23.0	0.52
<b>SD4</b>	46.86	22.9	0.52
<b>SD5</b>	46.90	23.0	0.51
<b>SD6</b>	47.07	23.3	0.49
<b>SD7</b>	46.97	23.1	0.50
<b>SD8</b>	47.89	23.7	0.51
<b>SD9</b>	49.91	24.9	0.55

<b>ESTADISTICA</b>	<b>TB (s)</b>	<b>TI (s)</b>	<b>TS (s)</b>
<b>MAXIMO</b>	49.91	24.93	0.57
<b>MINIMO</b>	46.86	22.85	0.49
<b>MEDIA</b>	47.78	23.49	0.52
<b>DT</b>	1.022	0.636	0.023

---

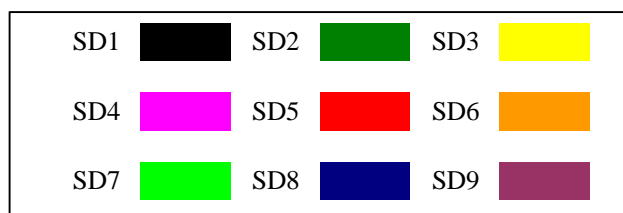
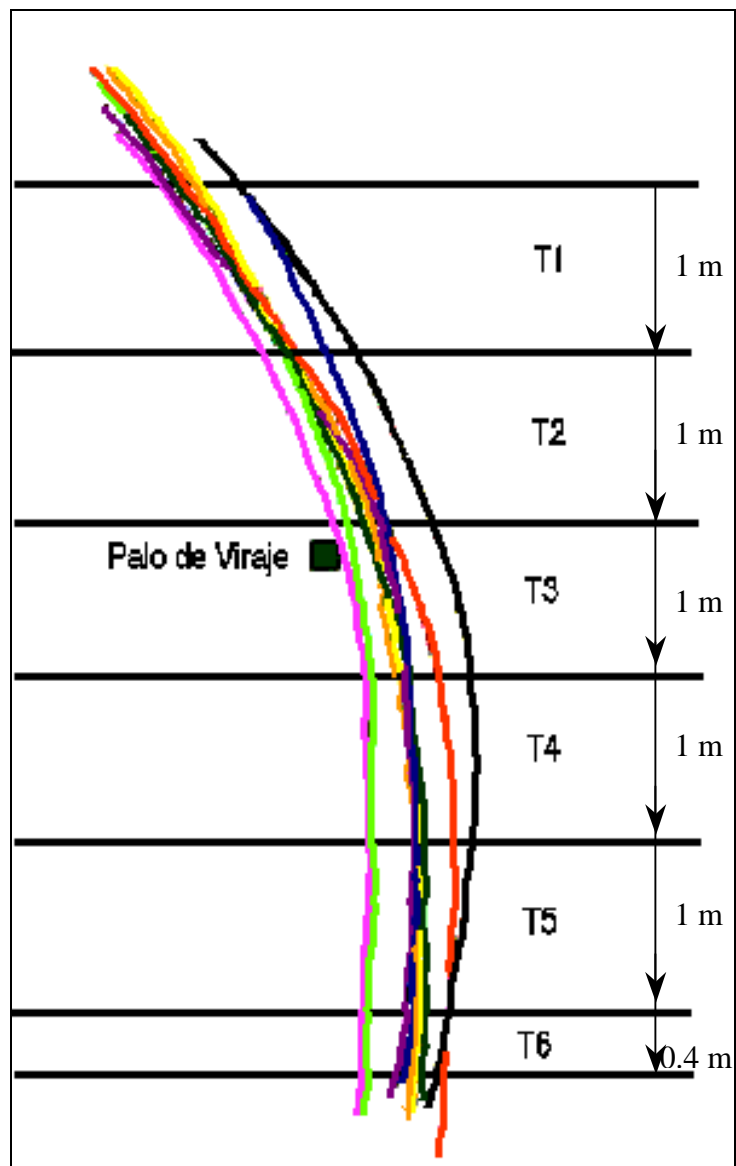


deportista española, se reduciría en 0.18 s en el tiempo medio y en 0.09 s su desviación típica. Sin embargo en el viraje analizado las diferencias de tiempo (TV) entre sujetos no pueden considerarse excesivas, siendo la que tarda menos tiempo en realizar el viraje SD6 con 0.49 s y la que tarda más tiempo en recorrer este mismo espacio SD1 con 0.57 s. En el tiempo de viraje, la esquiadora española consigue el octavo mejor tiempo, y su inclusión en la estadística descriptiva no varía los valores medios y de desviación típica de este tiempo.

Si consideramos a SD5 como la esquiadora que gana la bajada (TB) con un tiempo de 46.9 s, ésta mantiene el segundo mejor tiempo intermedio y el tercer mejor tiempo de viraje, junto a SD8 (0.51s) en el trayecto analizado, por lo que podemos considerar que esta esquiadora mantiene una cierta regularidad en los tiempos empleados en su descanso por el recorrido establecido mientras que la esquiadora española (SD9) a pesar de tener peores tiempos en la primera parte de la bajada, donde se encuentra el viraje analizado, su ejecución no es demasiado mala ya que incluso supera a SD1 en dos centésimas.

#### ***4.2.2. Relativos al análisis de las trayectorias realizadas***

En la **Figura 4.2.1**, se presentan las trayectorias descritas por el CG por cada una de las esquiadoras analizadas. En esta figura, podemos observar que las esquiadoras SD4 y SD7 son las que su CG pasa más cerca del palo de viraje. Estas a su vez son las deportistas que parecen estar más tiempo en la dirección de la pendiente una vez pasado el palo de viraje. También podemos apreciar como la esquiadora SD1, es la que más alejada pasa del palo de viraje, realizando mayor arco de curva, lo que nos hace pensar que en puertas anteriores ha tenido problemas de línea que sigue manteniendo en este viraje analizado. La consecuencia es que realiza el peor tiempo de viraje (0.57 s). El resto de deportistas se encuentra entre las tres sujetos mencionados.



**Figura 4.2.1.** Representación gráfica de las trayectorias del CG en sujetos damas (SD).

Si tenemos en cuenta que la esquiadora que mejor tiempo de viraje ha sido la SD6 (0.49 s), estamos en disposición de afirmar que la trayectoria eficaz es aquella que se mantiene cerca de la dirección de la línea de la pendiente durante el mayor tiempo posible y que pasa relativamente cerca del palo de viraje sin provocar un excesivo cambio de dirección tal y como puede apreciarse en la trayectoria que realiza esta esquiadora.

#### **4.2.3. Relativos al análisis de las velocidades**

##### **4.2.3.1. Análisis de la velocidad media del centro de gravedad (CG)**

###### **4.2.3.1.1. Análisis descriptivo**

En las **Tablas 4.2.2, 4.2.3 y 4.2.4**, podemos observar los valores de la velocidad media de la componente horizontal, transversal y resultante ( $VX_{CG}$ ,  $VZ_{CG}$  y  $VR_{CG}$ , respectivamente) en cada uno de los tramos en los que hemos dividido el viraje analizado con su estadística descriptiva. En general se observa como la velocidad media resultante (Tabla 4.2.2) disminuye progresivamente del T1 al T4 incrementándose ligeramente a partir de este instante. La mayor reducción de velocidad se produce entre T1 y T2 ( $-0.62 \text{ ms}^{-1}$ ). Considerando que el palo de viraje se encuentra al inicio de T3, parece lógico pensar que en esta puerta las esquiadoras tienden a cambiar de dirección antes de tomar contacto con el palo de viraje.

Para analizar con detalle la velocidad de desplazamiento del CG de las esquiadoras, se ha recurrido a la representación gráfica de su velocidad instantánea con respecto a los porcentajes del tiempo total requerido en el viraje analizado, tal y como comentamos en el método. En la **Figura 4.2.2**,

**Tabla 4.2.2.** Velocidad media resultante por tramos del CG ( $VR_{CG}$ ) alcanzada en sujetos damas (SD) y estadística descriptiva, expresado valor absoluto ( $ms^{-1}$ )

	<b>T1</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T2</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T3</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T4</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T5</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T6</b> ( $ms^{-1}$ )
<b>SD1</b>	10.99	10.77	10.32	9.71	9.64	9.47
<b>SD2</b>	11.57	11.41	10.79	10.34	10.16	9.80
<b>SD3</b>	11.27	10.80	10.25	10.34	10.87	11.13
<b>SD4</b>	11.67	11.32	10.77	10.60	10.60	10.73
<b>SD5</b>	12.55	12.00	11.41	10.55	10.23	10.02
<b>SD6</b>	12.16	11.84	11.26	11.13	11.13	11.45
<b>SD7</b>	12.50	12.10	11.29	11.06	11.07	10.91
<b>SD8</b>	11.30	10.95	10.68	10.49	10.76	11.04
<b>SD9</b>	12.02	9.20	10.82	10.67	10.82	10.74

<b>ESTADISTICA</b>	<b>T1</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T2</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T3</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T4</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T5</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T6</b> ( $ms^{-1}$ )
<b>MAX</b>	12.55	12.10	11.41	11.13	11.13	11.45
<b>MIN</b>	10.99	9.20	10.25	9.71	9.64	9.47
<b>MEDIA</b>	11.78	11.16	10.84	10.54	10.59	10.59
<b>DT</b>	0.52	0.84	0.39	0.40	0.46	0.63

**Tabla 4.2.3.** Velocidad media alcanzada por tramos, del CG en sujetos damas (SD) en la componente X ( $VX_{CG}$ ) y estadística descriptiva, expresado en valor absoluto ( $ms^{-1}$ ).

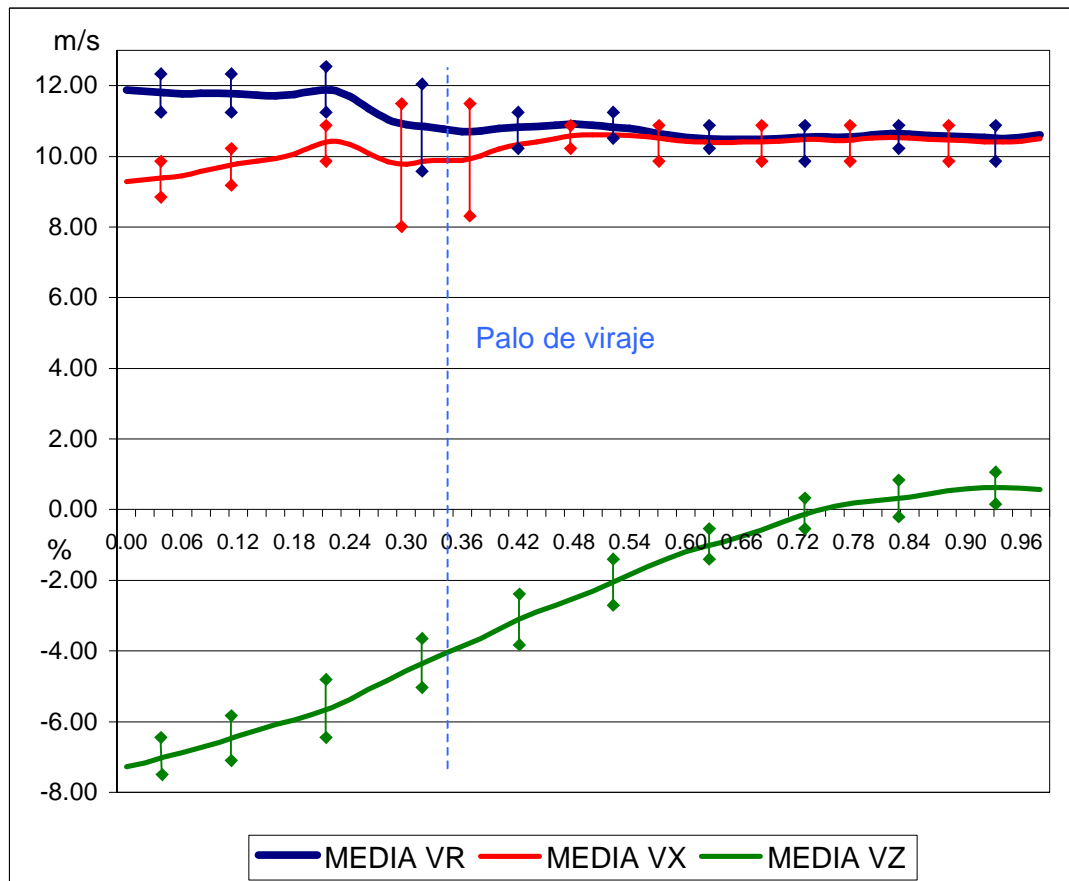
	<b>T1</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T2</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T3</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T4</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T5</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T6</b> ( $ms^{-1}$ )
<b>SD1</b>	8.57	9.65	9.97	9.65	9.41	9.26
<b>SD2</b>	9.52	10.35	10.33	10.21	10.07	9.65
<b>SD3</b>	9.54	10.19	10.14	10.27	10.80	11.07
<b>SD4</b>	9.51	10.33	10.47	10.55	10.51	10.63
<b>SD5</b>	10.01	10.49	10.79	10.45	10.11	9.89
<b>SD6</b>	10.22	10.86	10.90	11.03	11.07	11.39
<b>SD7</b>	10.19	10.85	10.96	10.95	10.99	10.85
<b>SD8</b>	9.80	10.36	10.51	10.42	10.69	11.00
<b>SD9</b>	9.61	7.55	10.59	10.60	10.69	10.66

<b>ESTADISTICA</b>	<b>T1</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T2</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T3</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T4</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T5</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T6</b> ( $ms^{-1}$ )
<b>MAX</b>	10.22	10.86	10.96	11.03	11.07	11.39
<b>MIN</b>	8.57	7.55	9.97	9.65	9.41	9.26
<b>MEDIA</b>	9.66	10.07	10.52	10.46	10.48	10.49
<b>DT</b>	0.47	0.95	0.31	0.39	0.50	0.68

**Tabla 4.2.4.** Velocidad media alcanzada por tramos, del CG en sujetos damas (SD), en la componente Z ( $VZ_{CG}$ ) y estadística descriptiva, expresado en valor absoluto ( $ms^{-1}$ ).

	<b>T1</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T2</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T3</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T4</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T5</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T6</b> ( $ms^{-1}$ )
<b>SD1</b>	-6.74	-4.71	-2.57	-0.13	1.54	1.65
<b>SD2</b>	-6.47	-4.74	-3.08	-1.35	0.03	0.66
<b>SD3</b>	-5.86	-3.42	-1.00	-0.17	0.05	0.01
<b>SD4</b>	-6.63	-4.53	-2.43	-0.62	0.45	0.83
<b>SD5</b>	-7.44	-5.72	-3.65	-1.20	0.62	1.07
<b>SD6</b>	-6.50	-4.66	-2.75	-1.23	-0.10	0.04
<b>SD7</b>	-7.12	-5.31	-2.60	-0.93	0.23	0.38
<b>SD8</b>	-5.52	-3.52	-1.74	-0.28	0.22	0.20
<b>SD9</b>	-7.12	-5.02	-2.05	-0.23	0.56	0.57

<b>ESTADISTICA</b>	<b>T1</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T2</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T3</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T4</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T5</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T6</b> ( $ms^{-1}$ )
<b>MAX</b>	-5.52	-3.42	-1.00	-0.13	1.54	1.65
<b>MIN</b>	-7.44	-5.72	-3.65	-1.35	-0.10	0.01
<b>MEDIA</b>	-6.60	-4.63	-2.43	-0.68	0.40	0.60
<b>DT</b>	0.58	0.71	0.72	0.47	0.47	0.50



**Figura 4.2.2.** Representación gráfica de la velocidad media resultante, horizontal, transversal del CG ( $VR_{CG}$ ,  $VX_{CG}$ ,  $VZ_{CG}$  respectivamente) y desviación típica en Sujetos damas (SD) por % de tiempo en el viraje analizado, expresado en valor absoluto ( $ms^{-1}$ )

presentamos la representación gráfica de la velocidad media horizontal, transversal y resultante del CG del sistema en damas. En ella se observa como efectivamente la velocidad media instantánea de la componente transversal del CG ( $VZ_{CG}$ ), tiende a reducirse como consecuencia del cambio de dirección mientras que la componente horizontal tiende a mantenerse e incluso llega a incrementarse ligeramente hasta el tramo 3. Sin embargo, los valores negativos de la componente transversal y los cambios que se producen en ella hasta el T4, nos indican que está existiendo un cambio de dirección hacia la línea de la pendiente a expensas de reducir su velocidad transversal, produciéndose la mayor reducción de la componente transversal y consecuentemente el mayor cambio de dirección entre T2 y T3. Se constata que el cambio de dirección no debería incidir en la velocidad media de componente horizontal.

La consecuencia es que hasta el palo de viraje la velocidad media instantánea resultante tiende a reducirse. La mayor desviación típica encontrada en la componente horizontal de la velocidad se producen en paso del palo de viraje así como su reducción, mientras que parece existir un comportamiento muy estable con respecto a la componente horizontal y resultante a la salida del palo de viraje. Este hecho pone de manifiesto que un elemento técnico esencial que diferencia el resultado de los esquiadores, reside en el tramo donde está el palo de viraje.

Esto último, queda ratificado por la componente transversal de la velocidad (Tabla 4.2.4) que se reduce en  $1.97 \text{ ms}^{-1}$  entre T1 y T2 aunque ésta continúe incrementándose entre T2 y T3, donde se encuentra el palo de viraje y hasta T4. A partir del T4 la velocidad resultante se mantiene a pesar de que la componente transversal sigue una tendencia a la reducción lo que nos indica que aún mantiene ligeramente la línea de la pendiente para la preparación del cambio de dirección siguiente.



#### ***4.2.3.1.2. Análisis inferencial***

Para comprobar la existencia de diferencias significativas en la velocidad media resultante por tramo, en la **Tabla 4.2.5.** se presenta la estadística inferencial de medidas repetidas. En ella se observa que efectivamente existen diferencias significativas entre tramos a un nivel de  $p < 0.0001$ . Dicha significación general entre los sujetos y tramos pone de manifiesto que el grupo se comporta de forma diferente con respecto a sus velocidades medias en cada tramo.

Comprobamos las diferencias concretas entre tramos contiguos con la prueba parcial de contrastes que podemos observar en la **Tabla 4.2.6.** En ella se observa que existen diferencias significativas de  $p < 0.05$  entre T1 y T2, T2 y T3, T3 y T4, mientras que no existían diferencias significativas entre T4 y T5; T5 y T6.

Esta estadística de contraste nos permite confirmar un patrón general en la velocidad media de desplazamiento, con un nivel de confianza del 95%. Por lo tanto, podemos afirmar que hasta el tramo cuarto (T4) la velocidad tiende a reducirse. Posiblemente debido a que en estos tramos se encuentra el palo de viraje y la necesidad de realizar el cambio de dirección. Se confirmaría que para esquiadores de alto nivel se requieren cuatro metros para cambiar de dirección que provoca el palo de viraje a una velocidad media resultante de  $10.50 \text{ ms}^{-1}$ .

**Tabla 4.2.5.** Estadística inferencial de medidas repetidas de la velocidad media alcanzada resultante del CG ( $VR_{CG}$ ) en sujetos damas (SD) del viraje analizado.

variables	suma cuadrados	d.f	medias cuadrados	F-ratio	significación
SUJETOS DAMAS	80.48472	8	10.060590	29.254	.0000
TRAMOS DAMAS	101.91164	5	20.382329	59.268	.0000
RESIDUAL	159.91472	465	.3439026		
TOTAL	341.17905	478			

0 missing values have been excluded.

All F-ratios are based on the residual mean square error.

**Tabla 4.2.6.** Prueba parcial de contraste en sujetos damas (SD) y niveles de significación entre tramos analizados.

CONTRASTE	DIFERENCIA +/-	LÍMITE	SIGNIFICACIÓN
T1-T2	0.67861	0.16743	*
T2-T3	0.25805	0.17349	*
T3-T4	0.30445	0.17634	*
T4-T5	-0.03542	0.17581	
T5-T6	0.00954	0.23881	

\* diferencia significativa ( $p < .05$ ).

**4.2.3.2. Análisis de la velocidad media del extremo anterior del pie externo o punta de la bota externa (BI)**

En las **Tablas 4.2.7, 4.2.8 y 4.2.9**, se representa la velocidad media instantánea por tramos de viraje analizado del extremo anterior de la bota externa así como su estadística descriptiva. En ellas se observan como hasta el tramo 3 (T3) la tendencia es reducir la velocidad aunque las desviaciones típicas existentes no nos permiten confirmar este hecho, aunque la media de la velocidad resultante por tramos de la punta de la bota ( $VR_{BI}$ ) es mayor que la del CG, hasta el tramo 5 (T5). A partir de éste, tienden a igualarse. Al comparar las velocidades medias resultante del CG por tramos de viraje analizado con la velocidad media resultante del CG, se observan como al final del viraje analizado la  $VR_{BI}$  se reduce para igualarse a la del CG. La componente transversal de la velocidad media de la punta de la bota ( $VZ_{BI}$ ), mantiene la misma tendencia que la del CG, es decir, reduce su velocidad. La mayor reducción de la componente transversal se produce entre T2 y T3 al igual que sucedía en el CG, con un valor superior ( $-3.29 \text{ ms}^{-1}$ ). La componente horizontal ( $VX_{BI}$ ) tiende a mantenerse aunque con valores ligeramente superiores a los obtenidos por la componente horizontal del CG hasta el T6, donde los valores de la  $VX_{CG}$  tiende a igualarse a los de la  $VX_{BI}$ .

Por último, en la **Figura 4.2.3**, presentamos la velocidad media resultante, horizontal, transversal de la punta de la bota externa ( $VR_{BI}$ ,  $VX_{BI}$ , y  $VZ_{BI}$ , respectivamente) en la muestra de damas analizada. Del mismo modo que hiciéramos con el CG, hemos representado su velocidad instantánea con respecto a los porcentajes del tiempo total requerido en el viraje analizado. Cuando se analiza la estadística descriptiva de la velocidad media resultante instantánea, así como la velocidad de las componentes horizontal y transversal del extremo anterior de la bota externa, se observa como tanto la velocidad resultante como la horizontal alcanzan valores relativamente altos en sus

**Tabla 4.2.7.** Velocidad media resultante por tramos de viraje de la punta de la bota externa ( $VR_{BI}$ ) alcanzada en Sujetos Damas y estadística descriptiva, expresado en valor absoluto ( $ms^{-1}$ ).

	<b>T1</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T2</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T3</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T4</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T5</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T6</b> ( $ms^{-1}$ )
<b>SD1</b>	11.59	12.54	11.49	11.06	11.44	9.11
<b>SD2</b>	12.00	12.97	12.23	11.09	9.95	9.82
<b>SD3</b>	12.17	11.61	12.05	10.64	10.86	10.70
<b>SD4</b>	12.95	12.48	12.02	11.69	13.28	9.67
<b>SD5</b>	13.32	12.55	12.44	11.82	11.70	10.16
<b>SD6</b>	13.42	13.41	12.52	11.42	12.01	11.41
<b>SD7</b>	14.00	13.08	12.63	12.17	11.67	10.56
<b>SD8</b>	12.34	12.14	11.95	11.17	11.47	12.01
<b>SD9</b>	12.50	11.54	12.40	12.45	10.86	10.25

<b>ESTADISTICA</b>	<b>T1</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T2</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T3</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T4</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T5</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T6</b> ( $ms^{-1}$ )
<b>MAX</b>	14.00	13.41	12.63	12.45	13.28	12.01
<b>MIN</b>	11.59	11.54	11.49	10.64	9.95	9.11
<b>MEDIA</b>	12.70	12.48	12.19	11.50	11.47	10.41
<b>DT</b>	0.73	0.60	0.33	0.55	0.87	0.84

**Tabla 4.2.8.** Velocidad media alcanzada por tramos de viraje de la punta de la bota externa (BI) en Sujetos Damas en la componente X ( $VX_{BI}$ ) y estadística descriptiva, expresado en valor absoluto ( $\text{ms}^{-1}$ ).

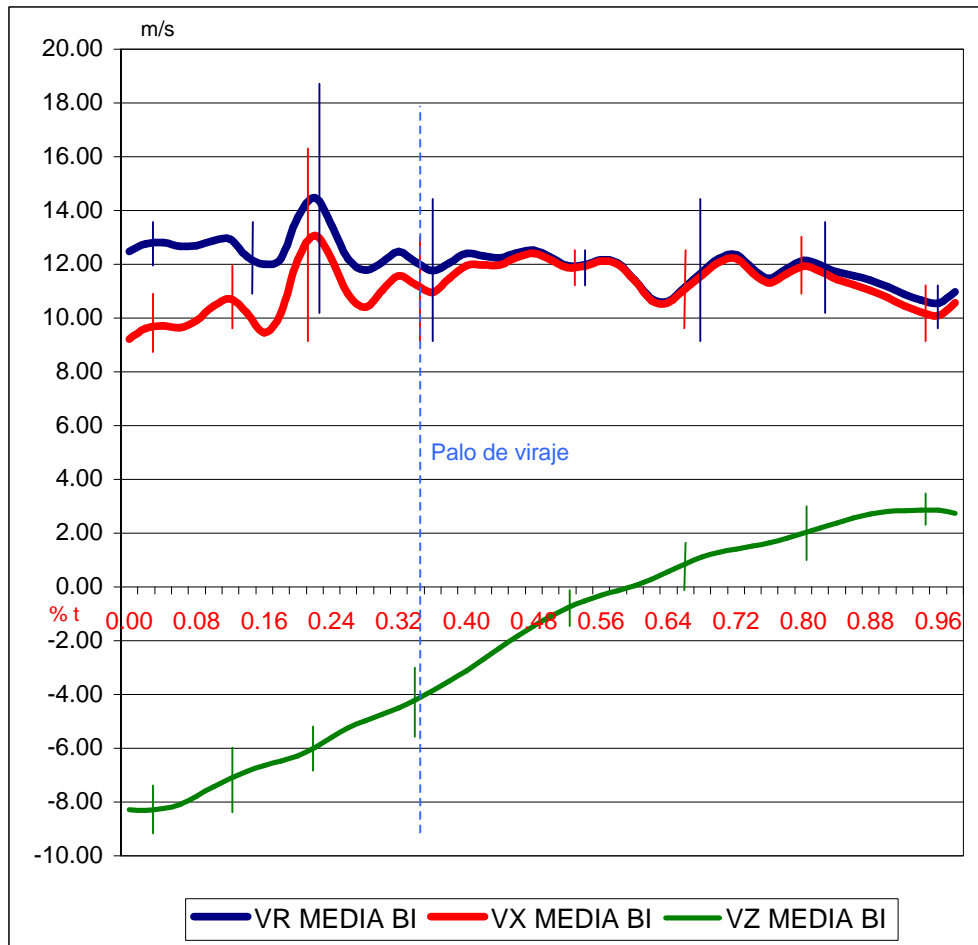
	<b>T1</b> ( $\text{ms}^{-1}$ )	<b>T2</b> ( $\text{ms}^{-1}$ )	<b>T3</b> ( $\text{ms}^{-1}$ )	<b>T4</b> ( $\text{ms}^{-1}$ )	<b>T5</b> ( $\text{ms}^{-1}$ )	<b>T6</b> ( $\text{ms}^{-1}$ )
<b>SD1</b>	8.92	11.47	11.34	10.72	10.55	8.59
<b>SD2</b>	9.80	11.86	12.14	11.01	9.69	9.22
<b>SD3</b>	10.29	11.13	12.03	10.53	10.59	10.43
<b>SD4</b>	10.49	11.66	11.92	11.56	12.85	8.82
<b>SD5</b>	10.10	11.10	12.15	11.78	11.25	9.50
<b>SD6</b>	11.24	12.57	12.38	11.41	11.86	11.20
<b>SD7</b>	11.38	12.05	12.52	12.14	11.52	10.27
<b>SD8</b>	10.95	11.76	11.84	11.01	11.28	11.74
<b>SD9</b>	8.93	10.14	12.31	12.33	10.59	9.94

<b>ESTADISTICA</b>	<b>T1</b> ( $\text{ms}^{-1}$ )	<b>T2</b> ( $\text{ms}^{-1}$ )	<b>T3</b> ( $\text{ms}^{-1}$ )	<b>T4</b> ( $\text{ms}^{-1}$ )	<b>T5</b> ( $\text{ms}^{-1}$ )	<b>T6</b> ( $\text{ms}^{-1}$ )
<b>MAX</b>	11.38	12.57	12.52	12.33	12.85	11.74
<b>MIN</b>	8.92	10.14	11.34	10.53	9.69	8.59
<b>MEDIA</b>	10.23	11.53	12.07	11.39	11.13	9.97
<b>DT</b>	0.85	0.65	0.33	0.59	0.86	1.00

**Tabla 4.2.9.** Velocidad media alcanzada por tramos de viraje de la punta de la bota externa (BI) en Sujetos Damas. en la componente Z ( $VZ_{BI}$ ) y estadística descriptiva, expresado en valor absoluto ( $ms^{-1}$ ).

	<b>T1</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T2</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T3</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T4</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T5</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T6</b> ( $ms^{-1}$ )
<b>SD1</b>	-7.21	-5.04	-1.39	2.47	4.30	2.99
<b>SD2</b>	-6.78	-5.17	-1.26	-0.20	2.02	3.23
<b>SD3</b>	-6.41	-2.98	0.16	1.41	2.18	2.21
<b>SD4</b>	-7.48	-4.41	-1.25	1.41	3.07	3.84
<b>SD5</b>	-8.62	-5.77	-2.40	0.34	3.16	3.59
<b>SD6</b>	-7.28	-4.57	-1.75	-0.16	1.81	2.15
<b>SD7</b>	-8.12	-4.98	-1.49	0.50	1.72	2.31
<b>SD8</b>	-5.62	-2.81	-0.49	1.80	1.92	2.27
<b>SD9</b>	-7.98	-4.48	-0.72	1.48	2.35	2.46

<b>ESTADISTICA</b>	<b>T1</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T2</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T3</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T4</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T5</b> ( $ms^{-1}$ )	<b>T6</b> ( $ms^{-1}$ )
<b>MAX</b>	-5.62	-2.81	0.16	2.47	4.30	3.84
<b>MIN</b>	-8.62	-5.77	-2.40	-0.20	1.72	2.15
<b>MEDIA</b>	-7.28	-4.47	-1.18	1.00	2.50	2.78
<b>DT</b>	0.87	0.93	0.70	0.87	0.80	0.61



**Figura 4.2.3.** Representación gráfica de la velocidad media resultante, horizontal y transversal de la punta de la bota izquierda ( $VR_{BI}$ ,  $VX_{BI}$  y  $VZ_{BI}$ , respectivamente) y desviación típica en sujetos damas por % de tiempo de viraje analizado.

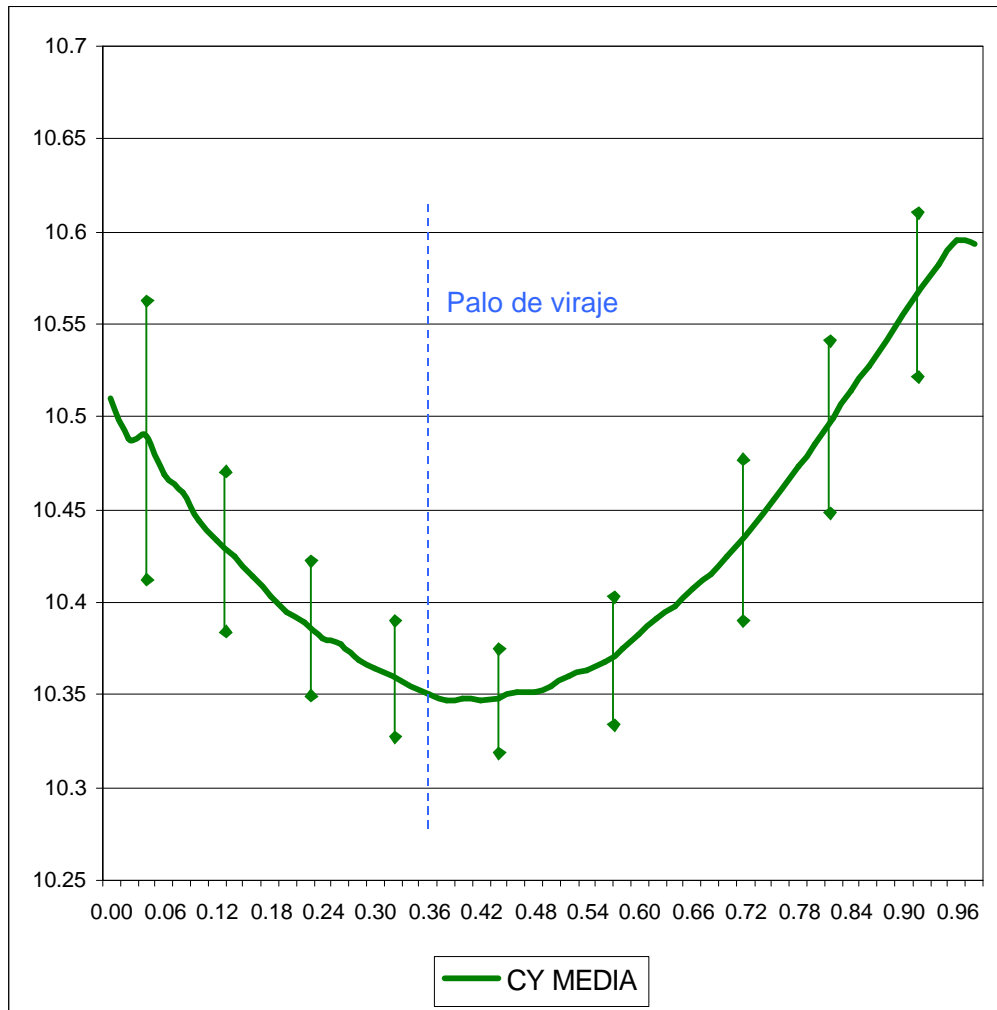
desviaciones típicas en el instante anterior al palo de viraje lo que nos permite inferir que la resolución adecuada de los movimientos de los pies instantes previos al paso del palo de viraje son determinantes en la ejecución técnica del viraje, existiendo en todo caso un incremento y posterior reducción en el 10% del tiempo total. Con respecto a la componente transversal de la velocidad (VZ BI), el comportamiento es similar al obtenido por el CG.

#### **4.2.4. Relativas al análisis de las posiciones espaciales**

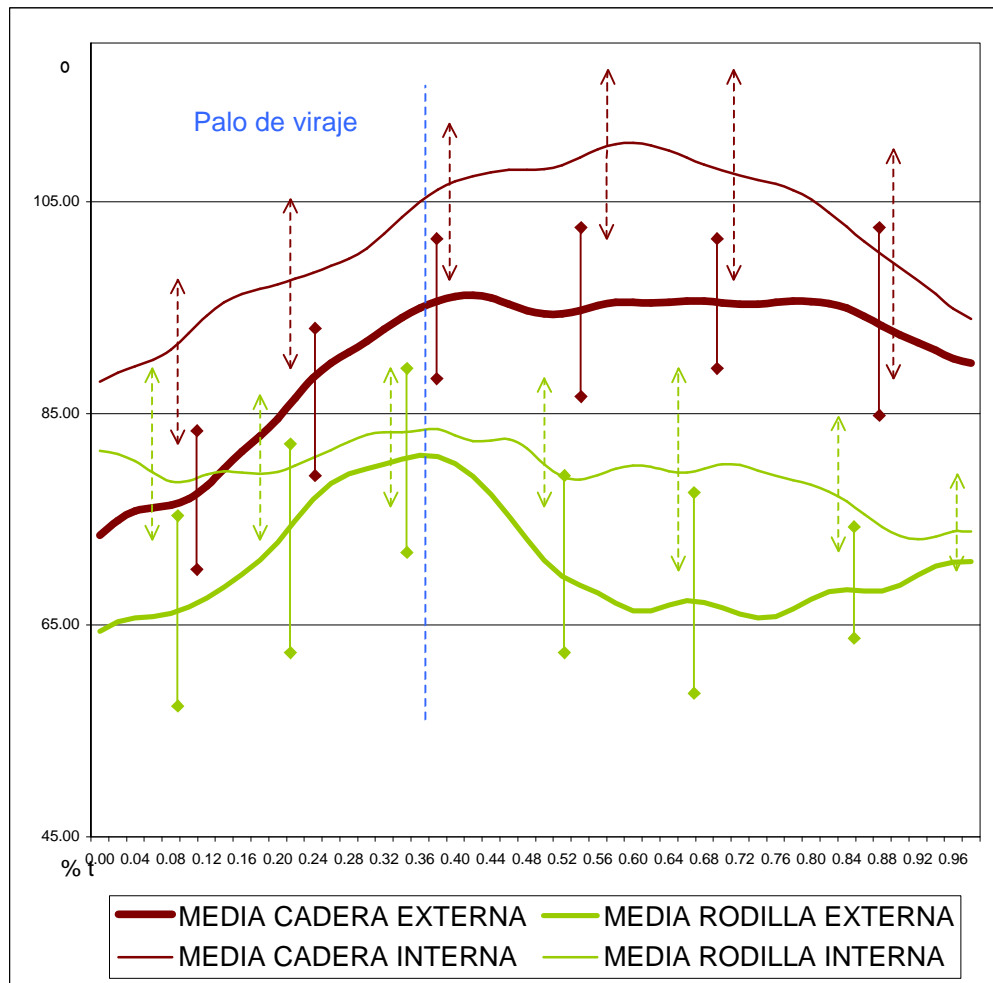
En la **Figura 4.2.4**, podemos observar la trayectoria media del CG del sistema atendiendo a la Coordenada Y de las deportistas analizadas por porcentaje del tiempo total. En ésta, podemos comprobar que hay una tendencia a descender el CG hasta el palo de viraje, a partir del cual la tendencia se invierte comenzando su ascenso. El máximo desplazamiento es de 0.25 m desde el palo de viraje hasta el final del viraje analizado, una amplitud de desplazamiento del CG que se puede considerar excesiva.

Para saber las causas que producen esta variación de la componente vertical acudimos a la goniometría media instantánea de las articulaciones de rodilla y cadera (externa e interna) que podemos observar en la **Figura 4.2.5**, respectivamente. En ésta, se constata que dicho descenso del CG hasta el palo de viraje no puede producirse a expensas de la flexión de las articulaciones de rodilla y cadera ya que se comprueba que estas tienden a extenderse mientras que el CG está descendiendo. Por lo tanto el descenso del CG sólo puede estar provocado por la inclinación de los miembros inferiores con respecto a la horizontal (ver **Figura 4.2.6**), lo que a su vez producirá un incremento de la fuerza en su componente transversal que es contrarrestada con el incremento en el rozamiento debido al canteo de los esquís y que se manifiesta en la reducción de la componente transversal de la velocidad del CG y de la punta de la bota externa.

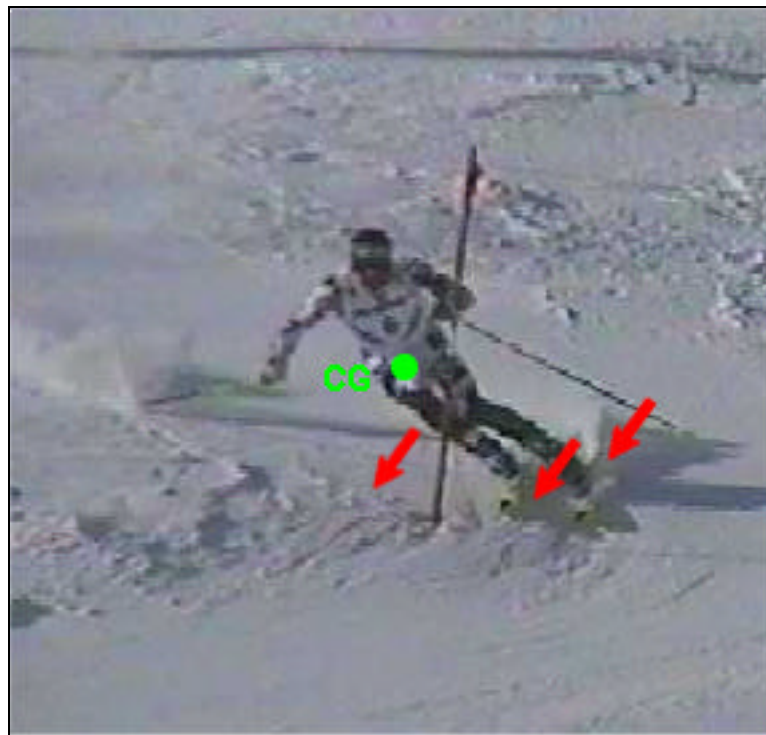




**Figura 4.2.4.** Representación gráfica de la Coordenada Y media del CG ( $CY_{CG}$ ) en sujetos damas y desviación típica por % de tiempo del viraje analizado.



**Figura 4.2.5.** Goniometría media y desviación típica de la articulación de cadera y rodilla (interna y externa) en Sujetos Damas, por porcentaje del tiempo total del viraje analizado.



**Figura 4.2.6.** Inclinación de los miembros inferiores hacia el interior de la curva y aumento del rozamiento al apoyar los esquís sobre los cantos.

---

CAPITULO 5

DISCUSIÓN

## **5. Discusión**

En este apartado se pretende evaluar los resultados obtenidos en el análisis biomecánico de la técnica del viraje en la disciplina del Slalom en el esquí alpino realizado en esta Tesis, deduciendo aquellos factores que hemos considerado relevantes para una correcta realización del viraje, estableciendo la concordancia que nuestros resultados han tenido con respecto a la documentación científica indicada en los capítulos precedentes e indicando las causas de aquellos resultados que no han sido coincidentes con la bibliografía referenciada.

Además, consideramos importante en este estudio, deducir aquellas transferencias que puedan tener estos resultados en el entrenamiento de la alta competición y en el aprendizaje de la técnica.

Debido a que los resultados se han presentado en función de las dos muestras utilizadas (hombres y damas), hemos considerado que la discusión también debe mantener esta secuencia, aunque se tendrán en cuenta en todo momento ciertos aspectos relevantes y comunes en ambas muestras que nos permitan establecer ciertas teorías explicativas de la técnica del viraje estudiado en Slalom.

Comenzamos con el análisis de la muestra de hombres, que corresponde a un estudio de la técnica individual de tres esquiadores que podemos considerar de alta competición y continuaremos con el análisis de la muestra de damas.

### **5.1. Discusión de los resultados en la muestra de hombres analizada.**

En nuestro análisis se observa que el esquiador que gana la competición (SH1), lo hace a expensas de obtener el mejor tiempo en la segunda parte de la bajada ya que el esquiador que mejor tiempo intermedio (TI) obtiene es el SH2 con 25.8 s (Tabla 4.1.1). Considerando que la puerta de viraje analizada se encontraba en la primera parte de la bajada, parece lógico pensar que tanto SH1 como SH2 obtengan el mismo tiempo de viraje (TV), en la puerta analizada con 0.46 s. Por esta razón, debemos considerar a ambos esquiadores al mismo nivel técnico en esta puerta. Por el contrario y con respecto a SH3, debemos considerar que tuvo ciertos problemas al obtener 0.02 s más de tiempo de viraje, que los otros dos sujetos en la puerta analizada.

Desde el punto de vista teórico, la trayectoria del CG más adecuada en el viraje de Slalom analizado debería comenzar en el tramo 1 (T1) lo más perpendicular posible al palo de viraje, lo que supondría haber resuelto la puerta anterior de una forma correcta y terminar el último tramo en los que hemos dividido la curva para su análisis (T6) lo más cerca posible de la perpendicular de la siguiente puerta, es decir, que la trayectoria ha de ser alta desde el punto de vista del entrenamiento técnico-táctico de la disciplina del Slalom

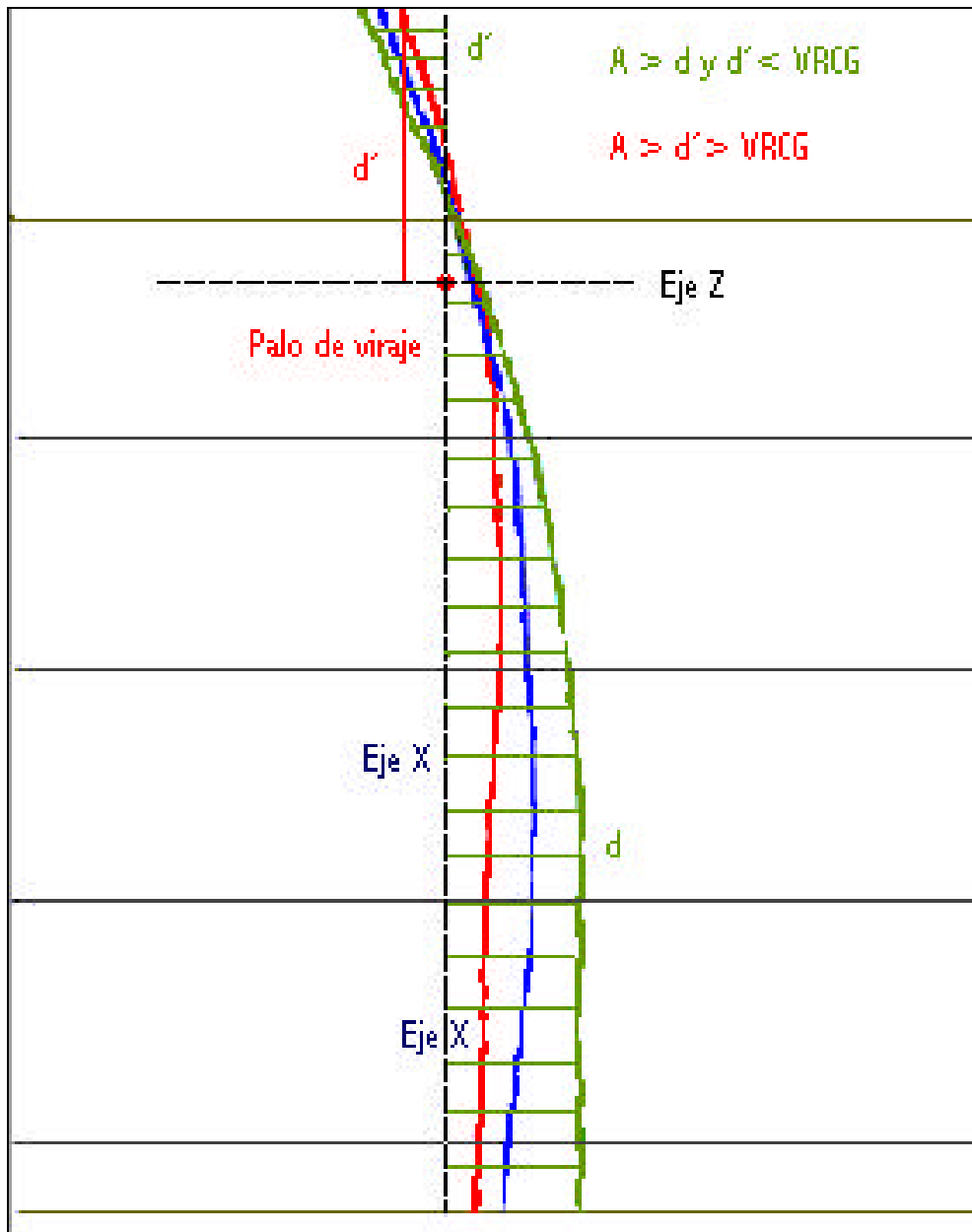
Según esta teoría, el esquiador SH1 es quien mejor resuelve esta situación (ver Figura 4.1.18) ya que se encuentra al inicio de T1 más vertical con respecto al palo de viraje que el resto de la muestra de hombres analizados y además termina en una buena orientación para abordar la siguiente puerta al dirigir su CG hacia la vertical de la siguiente puerta de viraje al final del T6. Por el contrario, SH3, es claramente el que peor resuelve el viraje en cuanto a la trayectoria descrita por su CG, lo que puede traducirse también con los

peores registros temporales de tiempo de bajada, intermedio y de viraje, que se exponían en la Tabla 4.1.1, con una pérdida temporal de 0.02 s.

Esta coincidencia existente en este estudio entre los datos temporales y la trayectoria descrita por el CG del sistema en este viraje de Slalom deben analizarse desde el punto de vista biomecánico utilizando variables cinemáticas para poder consolidar esta hipótesis de partida.

Así, analizando la velocidad media resultante del CG alcanzada en cada tramo de viraje y que podemos observar en la Tabla 4.1.2, 4.1.3 y 4.1.4, para SH1, SH2, y SH3, respectivamente, se observa que ésta es similar para SH1 y SH2 en T1. Sin embargo, en T2, SH1 obtiene una pérdida media de  $0.19 \text{ ms}^{-1}$ , con respecto a T1, mientras que SH2 la incrementa en  $0.65 \text{ ms}^{-1}$ . Esta reducción de la velocidad media resultante del CG en SH1, pensamos que es debida a que este esquiador se dirige en el T2 hacia la pendiente, mientras que SH2 retrasa hasta comienzo del T3 su orientación hacia la línea de la pendiente, posiblemente debido a la ubicación del palo de viraje. A partir de T3, SH1 mantiene la velocidad prácticamente constante mientras que SH2 comienza a reducir su velocidad ya que continua girando el resto del tramo hasta el final, ocasionándole una pérdida de velocidad. En cuanto a SH3, podemos decir que es el que más reducción de velocidad media resultante tiene de la muestra de hombres analizada. Pensamos que esta reducción de la velocidad media resultante puede deberse a la siguiente afirmación y que representamos en la **Figura 5.1**: cuanto más alejada es la trayectoria con respecto a la vertical del palo de viraje antes y después de su paso, mayor es la reducción de la velocidad.

Si observamos las gráficas de la velocidad media resultante del extremo anterior del pie o punta de la bota externa (Figuras 4.1.8, 4.1.13 y 4.1.17, para SH1, SH2 y SH3, respectivamente), por tramo de viraje de Slalom analizado,



**Figura 5.1.** Reducción e incremento de la  $V_{RCG}$  como consecuencia del aumento de la distancia ( $d$ ) en el Eje X y Eje Z a la trayectoria descrita por el CG. Según esta figura, la trayectoria roja es la que menos reducción de velocidad tiene y la verde la que más.



podemos ver claramente que a partir del palo de viraje (situado al principio del T2), todos los esquiadores aumentan la velocidad media horizontal de la punta de la bota ( $V_{X_{BI}}$ ) con respecto a la velocidad media horizontal del CG ( $V_{X_{CG}}$ ). Esto podría entenderse como que los esquiadores adelantan los esquís con respecto a su CG, pero interpretamos que este incremento de velocidad se debe a la trayectoria parabólica que realiza todo el sistema. Dicha trayectoria implica la existencia de una aceleración centrípeta que el esquiador contrarresta inclinándose hacia el interior de la curva, aproximándose hacia el centro de giro de la trayectoria y reduciendo su radio, mientras que los esquís mantienen teóricamente su trayectoria y su radio de giro, el cual será mayor que el que tiene su CG. Si todo este sistema gira a la misma velocidad angular ( $\omega$ ), la velocidad tangencial se reducirá, si el radio de giro del CG es menor que el de los esquís, de acuerdo a la siguiente Expresión (E-7).

---

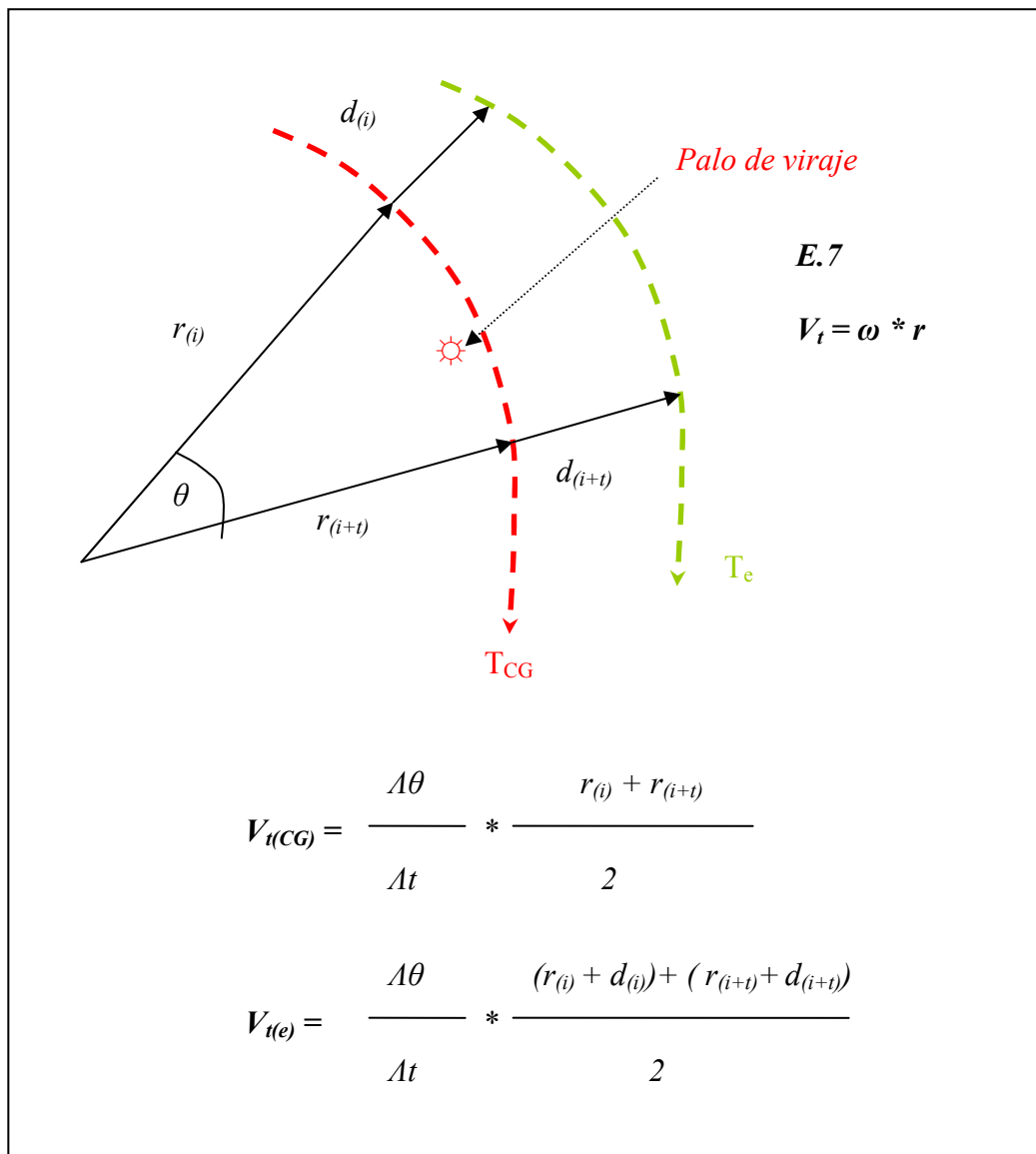
(E.7)

$$V_T = \omega * r$$

donde  $V_T$  es la velocidad tangencial,  $\omega$ , es la velocidad angular, y  $r$ , es el radio de giro del sistema.

---

Esto pone de manifiesto que el esquiador que más se inclina hacia el interior en la curva, reduce momentáneamente y en mayor medida su velocidad media resultante, o lo que es lo mismo, cuanto mayor sea la diferencia entre el radio de giro del CG del sistema y los esquís, mayor reducción de velocidad media resultante padecerá. En la **Figura 5.2** podemos observar las trayectorias descritas por el CG del sistema y el pie izquierdo (pie externo) de un esquiador en la realización del viraje analizado. En ella podemos ver como cuando la distancia entre la trayectoria del CG y la del pie del esquiador es menor, ambas



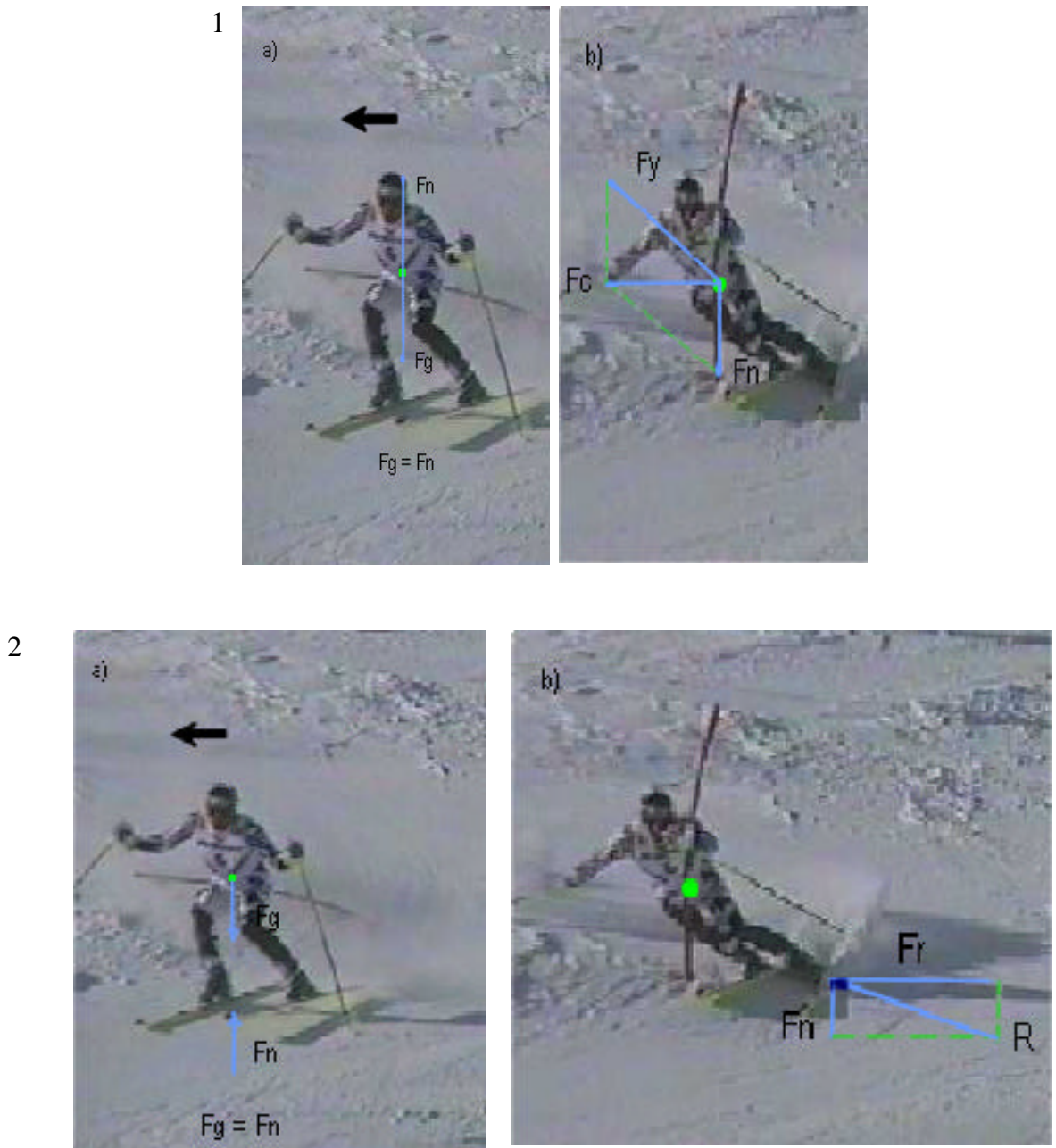
**Figura 5.2.** Cálculo de la Velocidad tangencial ( $V_t$ ) del CG y del pie externo, donde  $V_{t(CG)}$  es la velocidad tangencial del centro de gravedad del sistema;  $V_{t(e)}$  es la velocidad tangencial del pie externo;  $r_{(i)}$  y  $r_{(i+t)}$  es el radio de giro de la trayectoria del CG;  $d_{(i)}$  y  $d_{(i+t)}$  es la distancia que separa la trayectoria del pie externo con respecto a la trayectoria del CG;  $t$  es el tiempo transcurrido;  $\theta$  es el desplazamiento angular; y  $T_e$  y  $T_{CG}$  son las trayectorias del pie externo y el centro de gravedad, respectivamente.

trayectorias se acercan más a la vertical. Esto se constata con el incremento de la  $VR_{CG}$  en los últimos tramos de viraje. También podemos observar como la tendencia de la trayectoria de los pies al final de la curva es la de acercarse a la del CG debido principalmente a que se está preparando el inicio del viraje hacia la próxima puerta, lo que provocará que estas trayectorias se crucen.

También tenemos que tener en cuenta que cuando el esquiador se inclina hacia el interior de la curva aumenta la fuerza transversal ejercida por el sistema (según Teorema del Centro de Masas), que a su vez es contrarrestada por el incremento de la fuerza de reacción en ese sentido al aumentar el ángulo de canteo de los esquís, lo que también reduce la velocidad resultante del sistema (**Figura 5.3**).

En las Figuras 4.1.5, 4.1.11 y 4.1.15, se observa como en todos los casos existe un desplazamiento del CG en el Eje Y, es decir, el CG disminuye su altura coincidiendo su punto más bajo con el máximo cambio en la trayectoria descrita por el CG. Como se había indicado, el SH1 es el primero que realiza el máximo cambio en el palo de viraje coincidiendo con la altura mínima del CG. En el sujeto siguiente, SH2, que retrasaba su máximo cambio en la trayectoria descrita por su CG hasta instantes después de la salida del palo de viraje, también ocurre lo mismo. Y en SH3, que aún retrasaba más el máximo cambio de la trayectoria, esta coincidencia se produce a mediados del tramo 3.

Considerando que el máximo cambio de la trayectoria debe coincidir con la máxima inclinación lateral del cuerpo y que el estudio goniométrico articular de la rodilla y cadera (interna y externa) presentado en las Figuras 4.1.7, 4.1.12 y 4.1.16, no se puede decir que dicho desplazamiento del CG está acompañado de una reducción de los ángulos de dichas articulaciones. Por lo



**Figura 5.3.** Diagrama de fuerzas en el plano frontal en un esquiador realizando un viraje. **1)** con respecto al CG del esquiador, donde  $F_n$  es la fuerza normal,  $F_g$  es la fuerza de la gravedad  $F_y$  es la fuerza de componente vertical; y  $F_c$  es la fuerza centrípeta generada al inclinarse el esquiador hacia el interior de la curva. **2)** con respecto al apoyo, donde  $F_r$  es la fuerza de rozamiento contra el sistema;  $F_n$  es la fuerza de reacción normal y  $R$  es la fuerza de reacción resultante, que tiene que pasar por el CG del sistema. Cuanto mayor es  $F_c$ , mayor es  $F_r$  y  $R$ .

tanto el desplazamiento en el Eje Y del CG del esquiador es producto de la inclinación del cuerpo hacia el interior de la curva en todos los casos.

Teniendo en cuenta este hecho, no podemos estar de acuerdo con Müller (1994) cuando pone de manifiesto la existencia de un incremento de la fuerza de reacción normal como consecuencia de las aceleraciones que se producen en el desplazamiento vertical del CG, al hablar de los movimientos por los que se inicia diferentes virajes en el esquí alpino. En realidad, las fuerzas que se producen no son normales al plano de inclinación sino que aparecen tangenciales con una componente transversal relativamente importante, debido fundamentalmente a la aceleración tangencial que se produce al inclinar el cuerpo hacia el interior de la curva las cuales deben contrarrestarse incrementando el rozamiento de los esquís con la superficie gracias a la acción del canteo (Figura 5.3).

El estudio goniométrico de las cuatro articulaciones analizadas (rodilla interna y externa; cadera interna y externa, respectivamente) muestra un patrón similar, donde las articulaciones externas presentan un cierto incremento en su ángulo entre T1 y T3, mientras que a partir de ese instante tiende a reducirse. Y con respecto a las articulaciones internas de rodilla y cadera, se observa como su comportamiento es al contrario. Esta situación sólo se produce como una consecuencia inevitable de la inclinación del cuerpo hacia el interior de la curva.

### ***5.2. Discusión de los resultados en la muestra de damas analizada.***

Al contrario de lo que se ha hecho en la discusión relativa a la muestra de hombres donde se ha partido del análisis individual, en este apartado donde se discutirán los resultados obtenidos por las mujeres en el viraje de Slalom

analizado en el Campeonato del Mundo de la disciplina (Sierra Nevada, 1996), el planteamiento tendrá en cuenta el análisis del grupo de esquiadores (N=9) con el propósito de distinguir ciertos patrones o factores comunes en la técnica de viraje en el Slalom. Para ello debemos considerar que se trata de una muestra natural que corresponde a esquiadoras con gran nivel técnico que compiten en el Campeonato del Mundo de la disciplina aunque, a pesar de ello, podemos observar (Tabla 4.2.1) como existen diferencias relativamente importantes entre los tiempos de bajada (TB), intermedio (TI) y de viraje (TV).

Pensamos que estas diferencias se deben principalmente a la variabilidad del medio donde se desarrolla la competición (estado de la nieve, siempre cambiante) y a la existencia de elementos extrínsecos como el factor suerte en este deporte. Para paliar este efecto, la ganadora de la competición de Slalom, es la mejor de dos bajadas sobre dos trazados diferentes. Posiblemente este hecho se constata con el tiempo de viraje obtenido por SD1, el cual no corresponde a su excesivo tiempo intermedio y a su tiempo de bajada, tal y como hemos podido ver en la Tabla 4.2.1, ya que a pesar de tener un TV de 0.02 s más que SD9, su TB es 0.99 s menor que el de SD9.

Por lo tanto, se trata de una muestra homogénea en sus características técnicas aunque ciertos elementos externos ocurridos en el viraje analizado nos pueden hacer que algún sujeto de esta muestra no sea válido para el estudio, como posiblemente pase con SD1.

La variabilidad encontrada en los tiempos de viraje obtenidos se constata en la Figura 4.2.1, donde se presentan las trayectorias descritas por el CG de la muestra estudiada y donde podemos observar como SD1 mantiene una trayectoria curva en todo su recorrido con una separación excesiva con respecto al palo de viraje.

Con respecto a los resultados obtenidos de las velocidades medias del CG y en concreto de la velocidad media resultante ( $VR_{CG}$ ), en la Figura 4.2.2 se constata que el tramo crítico, tramo 3 (T3), es coincidente con el lugar donde está situado el palo de viraje, es decir, es en este tramo donde mayor pérdida de velocidad media resultante se produce. Posiblemente por la ubicación del palo de viraje, pero especialmente por lo que este condiciona el cambio de dirección.

A partir de este tramo, observamos como la velocidad media no tiende a incrementarse, tal y como sucedía en la muestra de hombres, posiblemente debido a las peculiaridades del trazado como puede ser la existencia de una menor inclinación de la pista en el viraje analizado en damas que en hombres, ya que al ser menor el plano de inclinación de la pendiente la fuerza horizontal que produce la aceleración del sistema también es menor.

Según se pone de manifiesto en la Tabla 4.2.4, donde se analiza la componente transversal de la velocidad del CG ( $VZ_{CG}$ ), observamos como en general esta componente tiende a reducirse en todo el recorrido aunque especialmente entre el T2 y T3 lo que quiere decir que las esquiadoras estudiadas adoptan una trayectoria curva en todo el recorrido que es más acentuada en el tramo donde se encuentra el palo de viraje como parece lógico.

En la Figura 4.2.2, se muestra lo más relevante del estudio de las velocidades medias resultante, horizontal y transversal del CG. Si observamos las desviaciones típicas que nos presentan estas gráficas, las mayores desviaciones se producen en el instante previo y posterior al palo de viraje, donde además coincide con el máximo cambio de la trayectoria y con el tramo crítico (T3), mientras que en el resto de los tramos las velocidades medias de las esquiadoras parecen más estables reduciéndose las desviaciones típicas. El

incremento de la desviación típica en el tramo crítico (T3) nos confirma que el rendimiento en cada puerta de viraje está muy relacionado con la solución individual que cada esquiadora ha dado en dicho tramo lo que viene a confirmar que la utilización de patrones generales de técnica general debe estar condicionada a las soluciones individuales, siendo estas las que determinen las diferencias entre ellas en este tramo ya que antes y después del palo de viraje, las velocidades medias tienen comportamientos similares.

La estadística inferencial en la prueba de contraste que presentamos en la Tabla 4.2.5, constata este hecho al encontrarse diferencias significativas (a nivel de  $p < 0.05$ ) entre las velocidades medias resultantes en los tres primeros tramos y especialmente entre T1 y T2, T2 y T3, y T3 y T4.

Con respecto a la representación gráfica de la Figura 4.2.3, donde presentamos las velocidades medias de la punta de la bota externa por porcentaje de tiempo empleado en el viraje analizado, podemos constatar la existencia de un comportamiento similar al de las velocidades medias del CG antes del palo de viraje, si bien en este momento las damas parecen tener su máxima inclinación, como prueban las gráficas pertenecientes al estudio goniométrico de las cuatro articulaciones estudiadas (rodilla interna y externa y cadera interna y externa) de la Figura 4.2.5 y el desplazamiento del CG por el Eje Y (Figura 4.2.4).

El incremento de velocidad media de la punta de la bota externa que presenta en los momentos previos y su posterior descenso al pasar el palo de viraje, puede interpretarse también como consecuencia de la inclinación hacia el interior de la curva, tal y como ha sucedido en el estudio individual de hombres, y un adelantamiento de los pies que puede constatarse cuando observamos la gráfica del estudio goniométrico de las articulaciones externas



(rodilla y cadera) que se extienden más que en hombres en este mismo momento con respecto a las articulaciones internas que parecen flexionarse.

## CAPITULO 6

### CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DE FUTURO

## **6. Conclusiones y perspectivas de futuro**

En este último apartado estableceremos las conclusiones que hemos obtenido en el análisis biomecánico de la técnica de viraje en Slalom en el esquí alpino, mencionando algunos aspectos tratados en los diferentes apartados en los que hemos estructurado nuestro estudio. Por último hablaremos de las líneas de investigación futuras que nos han surgido durante la realización de este estudio.

Desde el punto de vista metodológico, las técnicas fotogramétricas basadas en la utilización del vídeo para el análisis del movimiento siguen siendo actualmente la forma de obtener un análisis descriptivo de la técnica deportiva. Siendo conscientes de que se deben mejorar los procesos metodológicos para reducir el tiempo requerido para obtener información que pueda servir para mejorar el aprendizaje y el entrenamiento de la técnica, pensamos que la mejor alternativa de tecnología futura debería basarse en la utilización de sistemas de visión artificial en donde la digitalización no requiera marcadores, ya que en la situación real de competición no es posible, que detecta los puntos anatómicos automáticamente. Estos sistemas están basados en la detección de la silueta del deportista y posteriormente y de forma inteligente, detectando los puntos anatómicos para el estudio tridimensional.

Otro aspecto que consideramos importante a la hora de analizar la técnica de los virajes en el esquí alpino ha sido el que se deben realizar estudios individuales que tengan por objetivo el detectar factores o patrones de movimiento que sean relevantes para la obtención del rendimiento de los mejores esquiadores del momento. En esta Tesis se presentan dos estudios diferentes en cuanto a la muestra y su diseño, pero similares en cuanto a los resultados y su discusión, lo que pone de manifiesto que aunque la muestra haya sido reducida (principalmente en hombres), el análisis de las variables seleccionadas para su estudio nos han confirmado algunos aspectos comunes en trazados diferentes sobre una misma pista y sobre puertas de

viraje distintas, consiguiendo de esta forma cumplir con los objetivos marcados en el inicio del estudio.

Con respecto al análisis biomecánico, en primer lugar y aunque habíamos partido de estudio del viraje de Slalom en dos muestras diferentes (hombres y damas), hemos podido ver como existen ciertos factores o patrones de la técnica que son comunes en ambas muestras, independientemente del trazado y de los elementos externos que hemos comentado en alguna ocasión a lo largo de la exposición de esta Tesis. Estos factores que tienen que ver con el rendimiento en el viraje de Slalom estudiado han sido, tanto para el estudio individual realizado en hombres como para el estudio de grupo realizado en damas, los siguientes:

En cuanto al estudio de las velocidades alcanzadas por el CG del sistema:

- a) En los esquiadores estudiados, hemos comprobado que existe una mayor reducción de la velocidad media resultante cuanto más curva es la trayectoria del CG. Es decir, cuanto más se aleja la trayectoria descrita por el CG de la vertical del palo de viraje, mayor es la pérdida de velocidad.
- b) Del mismo modo, cuando el viraje se inicia sobre la vertical del palo y lo más alejado de este (línea alta), mayor podrá ser la velocidad resultante media alcanzada, siempre y cuando la trayectoria del CG no se aleje demasiado del palo de viraje y discurra lo más paralelo posible a la vertical del palo, o lo que es lo mismo, la dirección de la pendiente.
- c) El comportamiento de las velocidades medias del extremo anterior del pie o punta de bota externa, con respecto al de las velocidades medias del CG, experimenta una ligera variación en el tramo previo y posterior al palo de

viraje posiblemente como consecuencia de la trayectoria parabólica que experimentan todos los puntos articulares del sistema con respecto al eje de giro. Cuanto mayor sea la distancia al centro de giro de estos puntos, mayor será la reducción de la velocidad tangencial media resultante. Esto quiere decir que el esquiador está inclinándose hacia el interior.

En cuanto a la trayectoria ideal del CG:

- d) La trayectoria del CG más adecuada en el viraje de Slalom analizado debería comenzar lo más perpendicular posible al palo de viraje, lo que supondría haber resuelto la puerta anterior de una forma correcta y terminar la curva lo más cerca posible de la perpendicular de la siguiente puerta.

Y por último, y en cuanto a la posición del CG en el Eje Y y el estudio goniométrico, podemos decir que:

- e) Los cambios de posición del CG del sistema sobre el eje Y, no son consecuencia directa de los movimientos de extensión-flexión de las articulaciones de la rodilla y cadera (externas y entrenas), sino que son consecuencia directa del movimiento de inclinación que el esquiador realiza hacia el interior de la curva.
- f) Por último, podemos decir que un factor de eficacia que afecta al rendimiento del viraje en Slalom tiene que ver con una menor reducción de la velocidad resultante. Pero esta reducción existe como consecuencia del cambio de dirección que produce una reducción de su componente transversal sin que afecte a la componente horizontal de la velocidad.

Para finalizar, decir que los resultados que hemos obtenido nos incitan a pensar en las recomendaciones siguientes para estudios futuros:

1. El sistema de referencia debe completarse con más módulos con el objeto de que puedan evaluarse un mayor número de cambios de dirección entre los palos de viraje. Así mismo y vistas las diferencias de tiempo analizadas, convendría analizar para próximos estudios una secuencia de virajes también en la segunda parte de la bajada, próximas a la línea de meta.
2. Ya que la inclinación resulta ser un aspecto importante en el Slalom, deberíamos completar nuestros próximos estudios con la información sobre el ángulo de inclinación del sistema con respecto al sistema de referencias “cuasi-inercial” que se desplazaría con el sujeto.
3. Debido a que la técnica ha evolucionado paralelamente a la evolución del material en estos últimos años y desde el Campeonato del Mundo de Esquí Alpino de 1996, deberíamos repetir este estudio de Slalom en la actualidad para comprobar si ha variado la técnica o simplemente ha habido una adaptación al nuevo material por parte de los esquiadores. La inclusión de la Estación de Esquí y Montaña de Sierra Nevada como estación organizadora de pruebas de Copa del Mundo de Esquí durante los próximos cinco años, nos darán la oportunidad de analizar de nuevo a los mejores esquiadores del mundo.

4. Los modelos de obtención de fuerza, impulso, energía y otras variables cinéticas deberían completar las investigaciones cinemáticas para proporcionar un mejor conocimiento de la técnica de los esquiadores de alto rendimiento.
  
5. Dada la escasez de estudios biomecánicos en el esquí alpino en España y la escasez de documentación científica de estudios relacionados con el esquí alpino en nuestro idioma, la difusión de este tipo de trabajos entre los profesionales de la nieve en nuestro país está poco asentada. Posiblemente este estudio sea pionero en España, y sea la llave que nos permita acercarnos a las federaciones de los deportes de invierno.

## CAPITULO 7

# REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



## 7. Referencias bibliográficas

En este apartado se expondrán las referencias bibliográficas por orden alfabético que han sido utilizadas para la realización de esta Tesis Doctoral.

- Abdel-Aziz, Y.I. y Karara, H.M. (1971). Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. *Proc ASP/UI. Symp. Close-Range Photogrammetry*. Urbana, Ill. Fall Church, V.A.: American Society of Photogrammetry, 1-18.
- Angulo, R.M. y Dapena, J. (1992). Comparison of film and video techniques for estimating three-dimensional coordinates within a large field. *International Journal of Sport Biomechanics*. 10, 147-165.
- Antón, J. et al. (1989). *Entrenamiento deportivo en la edad escolar*. Unisport. Málaga.
- Arellano, R. (1992). Evaluación de la fuerza propulsiva en natación y su relación con el entrenamiento y la técnica. *Tesis Doctoral*. Universidad de Granada. Granada.
- Arnaud, J.P. (1991). Fondamentaux, exigences, entraînement. *Education Physique Sportive*. Nº 232. Novembre, Decembre. pp.75-77.
- Arndt, A.N.; Milburn, P.D. (1993): A three dimensional kinematic analysis of alpine skiing in moguls. *Abstracts of the XIVth Congress of the International Society of Biomechanics in Sports*. Paris, France. 234 - 235.
- Asociación Suiza para el Esquí (1985). *Ski Suisse*. Interassociation Suisse pour le Skí. Berna (Suiza).
- Aucouturier (1985). *La práctica psicomotriz*. Científico-médica. Barcelona.
- Babiel, St. ; Hartmann, U. ; Spitzenpfeil, P. ; Mester, J. (1996): Ground reaction forces in alpine skiing, cross-country skiing and ski jumping- measurement methods and declaration possibilities. *Abstracts of the 1st International*

- Congress on Skiing and Science*. January 7-13, 1996. St. Christoph a. Arlberg, Austria. 82-83.
- Berg,H.E.; Eiken,O.; Ericson,T. y Tesch,P.A. (1994). Muscle activation and movement pattern during competitive alpine skiing in elite racers. (*Abstract 1095*) *Medicine and Science in Sports and Exercises*. 26(5): S194. U.S.A.
- Berne,N.; Capozzo,A. y Meglan,J. (1990). Rigid Body mechanics as applied to human movement studies: Kinematics. *Biomechanics of human movement: appications in rehabilitation, aports and ergonomics*. Bertec Corporation 89-102. Wothington, Ohio.
- Blanchi,J.P.; Bouvet,A y Mont,J.P. (1985). Etude biomecanique du ski alpin. (Biomechanical study of alpine skiing.). *Revue des sciences et techniques des activites physiques et sportives*. STAPS. 6(11), juin 1985, 19-22. Grenoble, Francia.
- Bornat,P. (1991). Esquí alpino: el aprendizaje en los niños. *Revista de educación Física*. 52/53. 17-19.
- Briglia y Vallet (1989).
- Broadfoot,R.G. (1981). Biomechanical analysis of superior and inferior alpine ski racers making a carved turn. *Microfiche (neg.) of typescript. Thesis (M.P.E.)*. Microform Publications, International Institute for Sport and Human Performance, University of Oregon, Eugene, U.S.A.
- Candau,R.; Tavernier, M.; Aubail, R.; Lacour, J.R. (1993): Relationships between performance, aerodynamic resistance, ski-snow friction resistance, and anatomic characteristics of lower limbs in 12 elite alpine skiers. *Abstracts of the XIVth Congress of the International Society of Biomechanics in Sports*. Paris, France. 530-531.
- Casolo,F.; Lorenzi,V.; Vallatta,A.; y Zappa,B. (1996): A biomechanic model for skiing techniques analysis and simulation. *Abstracts of the 1st International Congress on Skiing and Science*. January 7-13, 1996. St. Christoph a. Arlberg, Austria. 66-67.

- Chevalier,P.y Schori,B. (1995). *Ski alpin. Technique de compétition et méthodes d'entraînement*. Fédération Suisse de Ski. Muri/Berne. Suisse.
- Clarys,J.P.; Zinzen,E. y Van roy,P. (1996): The effect of different use of the upper limb on the whole body coordination during rhythmic parallel turning. *Abstracts of the 1st International Congress on Skiing and Science*. January 7-13, 1996. St. Christoph a. Arlberg, Austria. 74-75.
- D'Alessio,F. y Serafin, R. (1992) *Curso de esquí. Las técnicas más actuales en descenso y fuera de pista*. De Vecchi, S.A. Barcelona. España.
- Díez,C. (1996). Consideraciones acerca del entrenamiento en la iniciación al esquí. *I Jornadas sobre Esquí Alpino y Nórdico*. I.A.D., Málaga. Granada.
- Dillman,C.J. (1982). Applied Biomechanics Research for the United states Ski Team. *Journal of Phisycal Education, recreation and dance*. January 1982. 27-29.
- Federación Alemana para la enseñanza del esquí (1981). *El esquí -3 - Teoría. Escuela de campeones*. Hispano-europea. Barcelona, España.
- Federación Española de Deportes de Invierno FEDI (1992). Plan anual. Federación Española de Deportes de Invierno. Madrid.
- Federazione Italiana Sport Invernali FIS (1991). *Slalom*. Scuola Tecnici Federali. F.I.S.I./ C.O.N.I. Apuntes Curso Entrenadores (paper).
- Federazione Italiana Sport Invernali FIS (1991). *Tecnici di base*. Scuola Tecnici Federali. F.I.S.I./ C.O.N.I. Apuntes Curso Entrenadores (papers).
- Ferrario,V.F.; Sforza,C.; Michielon,G. y Mauro, F. (1996): A mathematical method for the analysis of trajectories in giant slalom. *Abstracts of the 1st International Congress on Skiing and Science*. January 7-13, 1996. St. Christoph a. Arlberg, Austria. 16-17.
- Fetz, F.; Kornexl, E. (1993).*Sportmotorische Test, 3.*, überarb. und erw. Aufl., Wien.

- Fidelus,K. (1982). Aprovechamiento de la biomecánica para el análisis de la eficacia del entrenamiento en fútbol. *Revista Entrenador Español*. 16, Abril. Traducción al español de *Sport Wyczynowy*. 11, 3-10.
- Fontana, J. (1968). *Mecánica de Esquí*. Escuela Española de Esquí. Federación Española de Deportes de Invierno (F.E.D.I.). Madrid.
- Forg-Rob,W. y Nachbauer,W. (1988). Use of spline-functions in the smoothing of film data for slalom ski racers. *Internacional Journal of Sport Biomechanics*. 4, 166-177.
- Foster,E P. (1994): *Race skills for alpine skiing*. Turning Point Ski Foundation, USA.
- Foster,E P. (1995): *Technical Skills for Alpine Skiing*. Turning Point Ski Foundation, USA.
- Frick,U.; Schmidtbleicher,D.; Raschner,Chr.y Müller,E. (1996): Types of muscle action of leg and hip extensor muscles in slalom. *Abstracts of the 1st International Congress on Skiing and Science*. January 7-13, 1996. St. Christoph a. Arlberg, Austria. 96-97.
- Gautier,G. (1991). Análisis y tratamiento didáctico del esquí alpino. *Revista de Educación Física*. Nº 52/53. 11-16.
- Gianikellis, K. Y Gutiérrez, M. (1998). Estado actual de conocimientos de las técnicas de tratamiento de los datos posición-tiempo en el campo de la biomecánica del aparato locomotor. *Revista Motricidad*. 4, 7-25.
- Gómez, Pablo J. (1996). El esquí alpino de competición. *Motricidad*. FCCAFD Universidad de Granada. Nº 2, 211-229.
- Gómez-Mascaraque y González Millán (1989) . *Iniciación al esquí*. Alhambra Mexicana, S.A. .México D.C.
- Goodwin,D.A. (1994). *Kinematic considerations of elite alpine slalom ski racers*. Thesis (Ph.D.) - Western Michigan University, 1994; University Microfilms International, Ann Arbor, 1990

- Grösser y Neumaier. (1986). *Técnicas de Entrenamiento*. Martínez-Roca, S.A. Barcelona.
- Gutiérrez,M. (1990). Desarrollo de un sistema computerizado de análisis cinematográfico y su sincronización con los registros directos para el análisis del movimiento humano. *Tesis Doctoral*. Granada. Servicio de Publicaciones, Universidad de Granada.
- Gutiérrez,M. (1998). *Biomecánica deportiva, bases para el análisis* Ed. Síntesis. Madrid.
- Gutiérrez, M.; Soto, V.M. y Martínez, M. (1991). *Sistema de análisis computerizado para el movimiento humano*. Unisport, Málaga.
- Gutiérrez, M. y Martínez, J.A. (2000). Desarrollo de algoritmos de sincronización de las cámaras para la reconstrucción espacial mediante DLT. *Biomecánica*. (En prensa).
- Haid,Ch.; Müller,E.y Raschner,Ch. (1993): Forces in the knee during the steering phase in alpine skiing. *Proceedings of the XIVth Congress International Society of Biomechanics*. 4-8 July, Paris, France. Vol. 1 530-531.
- Hintermeister,R.A.; Suplizio,C.L.; Dillman,C.J.y Steadman,J.R. (1993): A case study of muscle activity in Giant Slalom skiing. *Proceedings of the XIth Symposium of the International Society of Biomechanics in Sports*. Amherst, Mass., USA. 149-153.
- Hintermeister,R.A.; Lange,G.W.; O´connor,D.D.; Dillman,C.J. y Steadman,J.R. (1996): Muscle activity of the inside and outside leg in Slalom and Giant Slalom Skiing. *Abstracts of the 1st International Congress on Skiing and Science*. January 7-13, 1996. St. Christoph a. Arlberg, Austria. 70-71.
- Hirano,Y. y Tada,N. (1994). Mechanics of a turning snow ski *International journal of mechanical sciences*. 36(5), May 1994, 421-429. (Tarrytown, N.Y.)
- Ikai, M. (1970). Scientific Report for Sapporo Olympic Games. *Committe of Sport Sciences of Japan Amateur Sports Association*. Tokio, Japan. 1-54.

- Jacenda (1992). *Step to succes.Alpine Skiing*. Human Kinetic Published. Illinois, USA.
- Jahn, R. (1982). *Manual práctico del esquí*. Ed. Everest. León.
- Jelen,K. y Pribramsky,M. (1987). Biomechanicka hlediska slalomovych oblouku. (Biomechanics of slalom turns.). *Teorie a praxe telesne vychovy*; 35(10), 1987, 629-632. (Prague,-Czech).
- Kano, K. (1996): The social influences of ski areas developments in Japan. *Abstracts of the 1st International Congress on Skiing and Science*. January 7-13, 1996. St. Christoph a. Arlberg, Austria. 216-217.
- Kaske,R.; Nemessuri,M. y Bretz,K. (1993). The ability of direction change of ski competitors. *International Society of Biomechanics. Congress (14th : 1993 : Paris, France)*. 666-667.
- Kassat, G. (1996): Turning the skis without “mecanismos of turning”. *Abstracts of the 1st International Congress on Skiing and Science*. January 7-13, 1996. St. Christoph a. Arlberg, Austria. 62-63.
- Klinger, G.; Leitner, R.; Hofmann, P. (1996). Body strain in slalom-training consequences for regulation in sl-training. *Abstracts of the 1st International Congress on Skiing and Science*. January 7-13, 1996. St. Christoph a. Arlberg, Austria. 332-333.
- Cráter, G. y Marta, E. (1992). *Ski para jóvenes. Método para progresar en la competición*. Tutor, S.A. Madrid.
- Larsson, O. (1991). Hip angulation crucial in the slalom *Ski-racing-*; 23(15), Feb 1991, 20. (Battleboro,-Vt.)
- Leach, R.E. (1994). *Handbook of Sport Medicine and Science. Alpine Skiing*. Blackwell Scientific Publications. Massachusetts, U.S.A.
- Leva, P de. (1994). Adjustements to the Zatsiorsky et al. ´s (1990) mean segment inertia parameters. (sin publicar).
- Lieu,D.K. y Mote,C.D. (1985). Mechanics of the turning snow ski. *International Symposium on Skiing Trauma and Skiing Safety (5th : 1983 : Keystone, Colo.)*.

- Major, J. (1980). How Phil Mahre won his silver. A photo analysis of our top U.S. ski racer's form during his two medal-winning slalom runs at Lake Placid. *Skiing*. 33(2), Oct 1980, 186-188.
- Mäser, B.; Kneisl, P. (1996): Travel motives and quality for alpine winter holidays. *Abstracts of the 1st International Congress on Skiing and Science*. January 7-13, 1996. St. Christoph a. Arlberg, Austria. 222-223.
- McDonald, C y Dapena, J (1991). Linear kinematics of the men's 110 m. and women's 100m hurdles races. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 23, 12, 1382-1391.
- McDonald, C y Dapena, J (1991). Angular momentum in the men's 110 m. and women's 100m hurdles races. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 23, 12, 1392-1402.
- McMurtry, J.G. (1990). *Biomechanics of alpine skiing*. En, Casey, M.J. (ed.) et al., Winter sports medicine, Philadelphia, Pa., F.A. Davis Co., c1990, 344-350
- Melero, C. (1996). Principios médico-fisiológicos en la práctica del esquí. *I Jornadas sobre esquí alpino y nórdico*. FCCAFD, Granada.
- Mester, J. (1996): Movement regulation in alpine skiing. *Abstracts of the 1st International Congress on Skiing and Science*. January 7-13, 1996. St. Christoph a. Arlberg, Austria. 16-17.
- Miller, N.R.; Shapiro, R. y McLaughlin, T.M. (1980). A technique for obtaining spatial kinematics parameter of segments of biomechanical system from cinematographic data. *Journal of Biomechanics*. 13, 533-547.
- Miller, M.K.; Porcari, J.; Auder, D.; Csontos, C. (1993): A comparison of hip and knee kinematics between two alpine ski ergometers. *Proceedings of the XIth Symposium of the International Society of Biomechanics in Sports*. Amherst, Mass. USA. 154 - 158.
- Mössner, M.; Kaps, P.; Nachbauer, W.; (1995): Smoothing the dlt-parameters for moved cameras. *XV Congress of the International Society of Biomechanics*. Fignösluglä, Finland. 642-643.

- Müller, E. (1994). Analysis of the biomechanical characteristics of different swinging techniques in alpine skiing. *Journal of sports sciences*. 12(3), June 1994, London. 261-278.
- Müller, E.; Brunner, F.; Kornexl, E y Raschner, C. (1991), Biomechanical analysis of starting techniques in alpine ski racing. In Fetz, F y Müller, E. (Eds) *Biomechanik des alpinen Skilaufs*. 112-123. Stuttgart, Alemania: Ferdinand Enke Verlag.
- Müller, E.; Schwameder, Raschner, C; H; Lindinger, S. y Kornexl, E (2001). *Science and Skiing II*. Tagungsband, Universität Salzburg, 2st International Congress on Skiing and Science. Hamburg Verlag Dr Kovac.
- Nachbauer, W. (1987). Fahrlinie in Torlauf und Riesentorlauf. (The fall line in slalom and giant slalom.). *Leistungssport*. 17(6), Nov 1987, 17-21. (Muenster,-FRG).
- Nachbauer, W. (1988). Skireaktionskräfte im Torlauf und Riesentorlauf. (Ski reaction forces in slalom and giant slalom.) *Leistungssport*; 18(6), Nov 1988, 12-18. (Muenster,-FRG)
- Nachbauer, W. (1989): Biodynamische Technikanalyse in Torlauf und Riesentorlauf. *Sportmotorische Diagnoseverfahren*. In : Fetz- Mayer- Müller- Nachbauer, Österreichischer Bundesverlag, Sportmotorische Diagnoseverfahren. Wien. 181-201.
- Nachbauer, W.; Kaps, P.; Mössner, m. (1992). Determination of kinetic friction in downhill skiing. *VIII Meeting of European Society of Biomechanics*. Rome, Italy. June 21-24. 333.
- Nachbauer, W.; Kaps, P.; Nigg, B.; Brunner, F.; Lutz, A.; Obkircher, G. y Mössner, M. (1996). A video Technique for Obtaining 3-D Coordinates in Alpine Skiing. *Journal of applied biomechanics*. 1, 12, 104-115.
- Nachbauer, W.; Rauch, A. (1991). In *Biomechanik des Alpinen Skilaufs (Biomechanick der Sportarten, Vol. 2)*. Fetz and Müller (eds.). Stuttgart. 50-100.



- Nachbauer, W.; Kaps, P. (1995). Cruciate ligament forces during landing in downhill skiing. *XV Congress of the International Society of Biomechanics*. Fignösluglä, Finland . 654-655.
- Niessen, W.; Müller, E.; Raschner, Chr.; Schwameder, H. (1996): *Structural dynamic analysis of alpine skis during turns. Abstracts of the 1st International Congress on Skiing and Science*. January 7-13, 1996. St. Christoph a. Arlberg, Austria.138-139.
- O'Connor, D.D.; Hintermeister, R.A.; Lange, G.W.; Steadman, J.R.; Dillman, C.J. (1996): A comparison of muscle activity during parallel and wedge ski turns. *Abstracts of the 1st international congress on skiing and science*. January 7-13, 1996. St. Christoph a. Arlberg, Austria. 270-271.
- Oña, A. (1994). *Comportamiento Motor. Bases Psicológicas del Movimiento Humano*. Granada. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Granada.
- Pereda, S (1987). *Psicología Experimental*. Ediciones Pirámide, S.A. Madrid.
- Parlebas, P. (1988). *Elementos de sociología del deporte*. Unisport. Málaga.
- Plagenhoef, S. (1971). *Patterns of human motion, a cinematographic analysis*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Pribramsky, M.; Jelen, K. (1992): Mutual comparison of biomechanical aspects of the course of the tight-radius and wide-radius slalom turns- Part 1.
- Pribramsky, M.; Jelen, K. (1992): Mutual comparison of biomechanical aspects of the steering at the tight-radius and wide-radius slalom turns and wide-radius slalom turns- Part 2.
- Raschner, Ch.; Müller, E.; Schwameder, H. (1996): Kinematic and kinetic analysis of slalom turns as a basis for the development of specific training methods to improve strength and strength-endurance. *Abstracts of the 1st International Congress on Skiing and Science*. January 7-13, 1996. St. Christoph a. Arlberg, Austria. 92-93.

- Raschner, Ch; Müller, E.; Kösters, A.;Chevalier, P. (1998). Dynamische und Kinematische Technikanalyse im Riesenslalom. Institut Für Sportwissenschaften der Universität Salzburg. Swiss Ski Federation.
- Renshaw,A.A. y Mote,C.D. (1989). Model for the turning snow ski. *International Journal of mechanical science*. 31(10), 1989, 721-736. (Elmsford,-N.Y.)
- Reinisch,G. (1990). La physique des trajectoires en ski alpin. Recherche des trajectoires optimales: vers la trajectoire Z? (The physics of trajectories in alpine skiing. An investigation on the optimal trajectories: towards trajectory << Z >>.). *Science et motricite*. 11, juil 1990, 24-39. (Paris)
- Rieder, H. (1987). Mejorar la Técnica. *Revista de Entrenamiento Deportivo*. Vol. I. N° 1. 47-56.
- R.I.S. (1996). *Los Reglamentos de los Concursos Internacionales de Esquí*. Libro IV. Federación Internacional de Esquí (F.I.S). Edición 1996. Adoptadas por el 39º Congreso Internacional de Esquí. .
- R.I.S. (2000). *Los Reglamentos de los Concursos Internacionales de Esquí*. Libro IV. Federación Internacional de Esquí (F.I.S). Edición 2000. Adoptadas por el 40º Congreso Internacional de Esquí. .
- Roldán,E. (1993). *El esquí*. Comité Olímpico Español. Madrid.
- Schaff,P. y Hauser,W. (1993). 3-D video motion analysis on the slope - a practical way to analyze motion patterns in alpine skiing. *International Symposium on Skiing Trauma and Safety (9th: 1991, Thredbo, N.S.W., Australia)*
- Scharfenberg,A y Neumaier,A. (1992). Retroalimentación simultánea y rápida mediante el uso de tecnología avanzada y del computador en el entrenamiento de la técnica del esquí. *Actas de Congreso. I Congreso de Informática y Nuevas Tecnologías en el Deporte*. Torremolinos.
- Schmidt, R. A. (1988). *Motor Learning and Control. A behavioral emphasis*. 2ª ed. Champaign, Illinois: Human Kinetics.

- Schmidtbleicher, D.; Frick, U.; Wiesemann, C., (1990). Leistungsdiagnostik und Traininssteuerung der Sprungkraft im Volleyball. *Sportwissenschaft* 20, 415-426.
- Soto,V.M. (1995). Desarrollo de un sistema para el análisis biomecánico tridimensional del deporte y la representación gráfica realista del cuerpo humano. *Tesis Doctoral*. Granada. Facultad de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte. Universidad de Granada.
- Soulier,P.B. y Mischel,A. (1991). *Manual Tutor del esquí*. Tutor, S.A. Madrid.
- Tejada-Flores, L. (1989). *Esqui fuera de pista*. Martinez Roca, S.A. .Barcelona.
- Tortosa, B. (1987). Análisis cinemático tridimensional de imágenes captadas por dos cámaras cinematográficas. Técnicas de Transformación Lineal Directa. *Proyecto fin de carrera*. Valencia. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.
- Twardokens,G. (1986). Speed variations during a carved turn. *American ski coach*. 9(3), Feb 1986, 9. (Park-City,-Utah)
- U.S.S.C.A. (1994). *Roockie coaches ski racing. Guide*. United States ski coaches association. American coaching effectiveness program (ACEP). Human Kinetics Publischers. U.S.A.
- Vera,P. (1989). Técnicas de análisis en biomecánica deportiva: estado actual y perspectivas. *Jornadas Unisport sobre Tecnología en el deporte*. Unisport, Málaga.
- Wedan,W. (1996). Metodología del entrenamiento de la técnica en el esquí de competición. *I Jornadas sobre esquí alpino y nórdico*. FCCAFD, , Granada.
- Weiss, O. (1996): Skiing in Austria: Trends, image and identity. *Abstracts of the 1st International Congress on Skiing and Science*. January 7-13, 1996. St. Christoph a. Arlberg, Austria. 208-209.
- Briglia, J-P; Vallet, B. (1989). *Ski Alpin*. Revue E.P.S. Paris
- Wood, G.A. & Jennings (1979). On the use of splines functions for data smoothing. *Journal of Biomechanics*. Vol. 12, 477-479.

- Wunderly, M.; Hull, M.L. y Maxwell, S. (1988). A second generation microcomputer controlled binding system for alpine skiing research. *Journal of biomechanics*. 21, 4. pp. 299-318. Gran Bretaña.
- Yeadon, M.R., (1990). The simulation of aerial movement-I. The determination of orientation angles from film data. *Journal of Biomechanics*. 23, 1, 59-66.
- Yeadon, M.R., (1990). The simulation of aerial movement-II. The determination of orientation angles from film data. *Journal of Biomechanics*. 23, 1, 67-74.
- Yeadon, M.R., (1990). The simulation of aerial movement-III. The determination of orientation angles from film data. *Journal of Biomechanics*. 23, 1, 75-83.
- Yeadon, M.R. (1994). Twisting techniques used in dismounts from the rings. *Journal of applied biomechanics*. 10. 178-188.
- Yatabe, Y. (1972). Simultaneous, multi-directional cinematography of a skiing turn. *Scientific study of skiing in Japan. The Society of Ski Science*. Tokio, Japan. Pp. 30-38.

# ANEXOS

<b>Figuras Capítulo 2</b>	<b>Página</b>
<b>Figura 2.1.</b> Diferentes tipos de puertas en las disciplinas de esquí alpino según el RIS (1996, 2000).	19
<b>Figura 2.2.</b> Palo articulado y flexible en su base. La base del palo debe estar bajo la superficie de la nieve.	22
<b>Figura 2.3.</b> Palos que componen una puerta de Slalom. (RIS, 1996, 2000).	23
<b>Figura 2.4.</b> Puertas, combinaciones de puertas, distancias entre puertas y anchura de puertas permitidas por el Reglamento de los concursos alpinos en Slalom (RIS, 1996, 2000)	24
<b>Figura 2.5.</b> Viraje en cuña utilizando la <i>Técnica Cristiania</i> (extraído de Foster, 1995).	28
<b>Figura 2.6.</b> <i>Viraje Paralelo</i> en el que se basa la técnica de competición analizada (extraído de Foster, 1995)	29
<b>Figura 2.7.</b> Separación de los esquís a la anchura de caderas: Posición equilibrada en un viraje paralelo desde una visión frontal.	31
<b>Figura 2.8.</b> Proyección del CG sobre la base de sustentación: Posición centrada en un viraje paralelo desde una visión lateral.	33
<b>Figura 2.9.</b> Posición alta del esquiador acercándose al palo de viraje, vista desde una visión lateral.	34
<b>Figura 2.10.a.</b> Inclinación lateral de las rodillas para dirigir los esquís hacia la trayectoria deseada y conducción en un viraje de Slalom (adaptada de Chevalier y Schori, 1995).	63
<b>Figura 2.10.b.</b> Inclinación lateral de las rodillas hacia el interior de la curva y conducción en un viraje de Slalom ( adaptada de Chevalier y Schori, 1995).	37
<b>Figura 2.11.</b> Apoyo sobre cantos internos debido a la inclinación lateral de rodillas o angulación.	38
<b>Figura 2.12.</b> Movimiento de extensión-basculo-rotación en un viraje. (adaptada de Chevalier y Schori, 1995). El esquiador extiende sus piernas al final de un viraje para <i>bascular</i> sobre los esquís planos,	41

transferir el peso del esquí exterior del viraje anterior (I) al nuevo (II), cambiar de cantos y comenzar a inclinar lateralmente las rodillas y dirigir los esquís hacia el interior de la siguiente curva.

- Figura 2.13.** Movimiento de flexión-pivotación en un viraje. (adaptada de Chevalier y Schori, 1995). El esquiador flexiona sus piernas al final de un viraje para *pivotar* sobre los esquís planos, transferir el peso del esquí exterior del viraje anterior (I) al nuevo (II), cambiar de cantos y comenzar a inclinar lateralmente las rodillas y dirigir los esquís hacia el interior de la siguiente curva. 42
- Figura 2.14.** Abatimiento del palo con el brazo interior en un viraje de Slalom (fotos extraídas de la revista *Sciare*, 1989). 44
- Figura 2.15.** Abatimiento del palo con el brazo exterior en un viraje de Slalom. 45
- Figura 2.16.** Abatimiento del palo con las extremidades inferiores (adaptado de ráter y Marta, 1992). 46
- Figura 2.17.** Apoyo del bastón izquierdo para iniciar el siguiente viraje, visto desde una visión frontal. 48
- Figura 2.18.** Fuerzas que originan un desplazamiento circular. 50
- Figura 2.19.** Fuerzas horizontales que generan y se oponen al desplazamiento rectilíneo del esquiador sobre la nieve (adaptada de Roldán, 1993). 52
- Figura 2.20.** Fuerzas que actúan sobre un esquiador que se desplaza a una cierta velocidad por una pendiente (Gutiérrez, 1998). 53
- Figura 2.21.** Fuerzas que intervienen en la realización de un viraje, provocada al apoyar los esquís sobre los cantos. Cuanto mayor es la inclinación del sistema al final de a curva, mayor  $A_c$  y  $S_i$ . 55
- Figura 2.22.** Posición en equilibrio del esquiador, ángulo de inclinación hacia el interior de la curva y resultante de las fuerzas que aplica el esquiador sobre los esquís, donde  $F_G$ . Fuerza gravedad,  $F_{zf}$ . Fuerza centrífuga,  $F_R$ . Fuerza resultante y  $d$ . Angulo inclinación. (adaptada de Chevalier y Schori, 1995). 56
- Figura 2.23.** Disminución de la presión ejercida sobre la superficie al final de un movimiento de extensión de las piernas atendiendo a las 58

fuerzas compresivas (adaptada de Müller, 1994), donde  $F_n$  es la fuerza normal y  $F_a$  es la fuerza que provoca la aceleración del CG.

**Figura 2.24.** Disminución de la presión ejercida sobre la superficie al inicio de un movimiento de flexión de piernas atendiendo a las fuerzas compresivas (adaptada de Müller, 1994), donde  $F_n$  es la fuerza normal y  $F_a$  es la fuerza que provoca la aceleración del CG. 59

**Figura 2.25.** Distribución de la presión ejercida sobre los cantos de los esquís en un viraje iniciado desde el esquí del valle. (adaptado de Müller, 1994). El sector rojo muestra la transferencia de peso y el cambio de cantos del canto interior del esquí del valle al canto interno del esquí del monte. 61

**Figura 2.26.** Distribución de la presión ejercida por el esquiador sobre los cantos de los esquís en un encadenamiento de curvas (adaptado de Raschner et al, 1998) 62

**Figura 2.27.** Representación gráfica del incremento de la fuerza externa resultante ( $F_R$ ), cuando se aceleran, en ese mismo sentido, ciertos segmentos que constituyen el sistema de estudio, según Teorema del Centro de Masas (Gutiérrez, 1998). 64

**Figura 2.28.** Representación gráfica del impulso vertical de aceleración desarrollado durante un salto vertical sin (a) y con impulso previo (b), (adaptado de Gutiérrez, 1998) que explica el Principio de Fuerza Inicial de Hochmuth. 65

**Figura 2.29.** Detalle del diagrama de fuerza en un esquiador que se desliza por la pendiente (a) donde  $Fg$  es la fuerza de la gravedad;  $m$  es la masa del esquiador;  $g$  es la gravedad;  $Fy$  es la fuerza vertical;  $Fx$  es la fuerza horizontal y  $f$  es el ángulo de inclinación de la pista. Y Teorema del Centro de Masas adaptado a los movimientos y las aceleraciones que se producen en el deslizamiento del esquiador en dirección a la pendiente (b), donde  $Fg$  es la fuerza de la gravedad;  $Fy$  es la fuerza vertical;  $Fx$  es la fuerza horizontal;  $F_n$  es la fuerza de reacción normal, perpendicular al plano de la pendiente;  $F_c$  es la fuerza compresiva; y  $a$  es la aceleración que produce el movimiento. 66

**Figura 2.30.** Iniciación de un viraje alternativo iniciado desde ambos esquís o viraje *acíclico* (adaptado de Müller, 1994). También es denominado viraje *pedalè* y/o *diverging step turn*. El movimiento alternativo se realiza en dos partes: 1º transfiere el peso (del canto interior del esquí del valle, al canto interior del esquí del monte 71



*downhill ski inside edge* al *uphill ski inside edge*), y 2º cambia de cantos (los cantos interiores del viraje extinguido se convierten en los exteriores, y los exteriores, en interiores del nuevo viraje).

**Figura 2.31.** Iniciación de un viraje simultáneo iniciado desde ambos esquís, también viraje *acíclico* (extraído de Müller, 1994). Es denominado viraje *parallele* y/o *dynamic turn*. La transferencia del peso y el cambio de cantos se realiza al mismo tiempo. 72

**Figura 2.32.** Viraje de radio corto o cíclico iniciado con ambos esquís. (adaptado de Müller, 1994). También es un viraje paralelo, dinámico y simultáneo, al realizar la transferencia de peso y el cambio de cantos, al mismo tiempo. 73

**Figura 2.33.** Iniciación de un viraje por movimiento de flexión de las rodillas (adaptado de Müller, 1994). Viraje paralelo, dinámico y simultáneo, al realizar la transferencia de peso y el cambio de cantos al mismo tiempo. 74

**Figura 2.34.** Iniciación de un viraje por movimiento de flexión de las rodillas entre bañeras (adaptado de Müller, 1994). También es un viraje paralelo, dinámico y simultáneo, al realizar la transferencia de peso y el cambio de cantos al mismo tiempo. 75

**Figura 2.35.** Iniciación de un viraje por movimiento de flexión de las rodillas en nieve profunda (adaptado de Müller, 1994). Es un viraje paralelo, dinámico y simultáneo ya que la transferencia del peso y el cambio de cantos se realizan al mismo tiempo. 76

**Figura 2.36.** Secuencia de fotogramas en el viraje de Slalom analizado. 78

**Figura 2.37.** Estructuración de un viraje en fases para su análisis descriptivo. (Grösser y Neumaier, 1986). 80

**Figura 2.38.** Estructuración de un viraje en Slalom en fases atendiendo a la distribución de la presión sobre la superficie de deslizamiento, donde LTP es la fase de transferencia del peso ; UP es la fase de disminución de la presión; LBP es la fase de incremento de la presión; y LP es la fase máxima presión (adaptado de Nachbauer y Rauch, 1991). 83

**Figura 2.39.** Aumento de la presión sobre el canto interno del esquí exterior y desplazamiento angular de la rodilla y cadera derecha en un viraje en Slalom. (adaptado de Frick et al ,1996). 85

<b><i>Tablas Capítulo 2</i></b>	<b><i>Página</i></b>
<b>Tabla 2.1.</b> Principales pruebas alpinas y características técnicas (Gómez, 1996).	20
<b>Tabla 2.2.</b> Cuadro resumen de los tipos de viraje a partir del movimiento que lo origina.	79
<b>Tabla 2.3.</b> Estructuración del viraje en fases y característica para su análisis, según diversos autores.	89

<b>Figuras Capítulo 3</b>	<b>Página</b>
<b>Figura 3.1.</b> Metodología secuencial del sistema fotogramétrico empleado en esta Tesis (adaptado de Soto, 1995).	103
<b>Figura 3.2.</b> Fases secuenciales del proceso de captación y computerización de los datos utilizado para el análisis del viraje en el Slalom (adaptado de Soto, 1995).	105
<b>Figura 3.3.</b> Visualización del momento de contacto del esquiador con el palo de viraje en el Slalom en la filmación desde la cámara lateral y frontal.	107
<b>Figura 3.4.</b> Módulo de sincronización basado en la detección de eventos visuales del sistema CYBORG v. 2.0.	108
<b>Figura 3.5.</b> Segmentos utilizados para el modelado humano del esquiador alpino en la disciplina del slalom.	115
<b>Figura 3.6</b> Puntos utilizados para el modelado humano del esquiador alpino en la disciplina del slalom.	116
<b>Figura 3.7.</b> Implementos deportivos en un esquiador: bastones, botas y esquís.	119
<b>Figura 3.8.</b> Sistema de referencia inercial utilizado en esta Tesis, donde LMP es la Línea de Máxima Pendiente.	121
<b>Figura 3.9.</b> Sistema de referencia modular construido para el análisis biomecánico del viraje en el Slalom.	122
<b>Figura 3.10.</b> Detalle de las crucetas diseñadas para el sistema de referencia construido en el análisis del viraje en Slalom.	123
<b>Figura 3.11.</b> Sistema de referencia para el análisis biomecánico del viraje en Slalom utilizado en esta Tesis.	124
<b>Figura 3.12.</b> Magnetoscopio S-VHS Panasonic MS5 utilizado.	126
<b>Figura 3.13.</b> Material empleado en la digitalización manual con el software CYBORG versión 2.0 y 3.0, basado en la superposición de la imagen de vídeo filmada con un programa de digitalización mediante ratón.	127 128

<b>Figura 3.14.</b> Superposición de la estructura alámbrica digitalizada sobre la imagen de vídeo con los caracteres de la pantalla del programa de digitalización CYBORG v. 3.0, en una visión frontal (a) y lateral (b).	
<b>Figura 3.15.</b> Representación gráfica de la ubicación de las cámaras estáticas, el sistema de referencias y el volumen filmado en esta Tesis, en la puerta de viraje analizada	132
<b>Figura 3.16.</b> Colocación del sistema de referencia en la puerta de viraje de Slalom analizada vista desde una visión frontal (a) y lateral (b).	133
<b>Figura 3.17.</b> División de la trayectoria del CG del sistema en tramos para el análisis biomecánico del viraje en Slalom.	135
<b>Figura 3.18.</b> Determinación del CG de la bota de esquiar a partir del método de suspensión (Gutiérrez, 1998) y ubicación de los puntos articulares del pie.	139

<b>Tablas Capítulo 3</b>	<b>Página</b>
<b>Tabla 3.1.</b> Características de los deportistas analizados, donde <b>COD</b> , es el número de licencia internacional de corredor alpino; y <b>EXP</b> , se refiere a los años de experiencia en competición.	95
<b>Tabla 3.2.</b> Resultados entre los 10 primeros clasificados en Copa del Mundo de Slalom en sujetos hombres (SH), antes del Campeonato del Mundo de Esquí Alpino de Sierra Nevada, 1996.	96
<b>Tabla 3.3.</b> Resultados entre las 10 primeras clasificadas en Copa del Mundo de Slalom en sujetos damas (SD), antes del Campeonato del Mundo de Esquí Alpino de Sierra Nevada, 1996.	97
<b>Tabla 3.4.</b> Parámetros inerciales del esquiador obtenidos a partir de los valores medios del vector posición y el peso relativo del equipamiento específico para la práctica del esquí en Slalom.	117

<b>Figuras Capítulo 4</b>	<b>Página</b>
<b>Figura 4.1.1.</b> Tiempos del análisis temporal utilizados en el estudio del Slalom, donde <b>TB</b> es el Tiempo de Bajada; <b>TI</b> es el Tiempo intermedio; y <b>TV</b> es el Tiempo del viraje analizado.	149
<b>Figura 4.1.2</b> Análisis temporal de los Sujetos Hombres (SH), expresado en valor absoluto (s), donde <b>TB</b> es el Tiempo de Bajada; <b>TI</b> es el Tiempo intermedio; y <b>TV</b> es el Tiempo del viraje analizado.	150
<b>Figura 4.1.3.</b> Representación gráfica de la trayectoria del CG en SH1, posiciones espaciales analizadas (eventos) por tramos del viraje analizado y tramo crítico (en rojo) donde <b>1</b> , se corresponde con el momento de inicio de la secuencia; <b>2</b> , es la posición más baja del CG; <b>3</b> , es la posición en donde la proyección vertical de CG está más alejada de la puerta de viraje; <b>4</b> , es el momento de contacto con el palo de viraje; <b>5</b> , es el momento donde el esquí exterior cambia de trayectoria hacia el interior de la curva; y <b>6</b> , se corresponde con el momento final de la secuencia.	153
<b>Figura 4.1.4.</b> Representación gráfica de las velocidades medias resultante, horizontal y transversal del CG ( $VR_{CG}$ , $VX_{CG}$ y $VZ_{CG}$ , respectivamente) en SH1 por tramos del viraje analizado.	156
<b>Figura 4.1.5.</b> Representación gráfica de las velocidades medias horizontal, transversal y resultante de la punta de la bota de la pierna externa ( $VX_{BI}$ , $VZ_{BI}$ y $VR_{BI}$ , respectivamente) en SH1 por tramos del viraje analizado con respecto a sus homónimas del CG del sistema ( $VX_{CG}$ , $VZ_{CG}$ y $VR_{CG}$ , respectivamente), expresadas en valor absoluto ( $ms^{-1}$ ).	158
<b>Figura 4.1.6.</b> Representación gráfica de la coordenada Y del CG ( $CY_{CG}$ ) en SH1 por tramos del viraje analizado. En rojo, tramo crítico.	159
<b>Figura 4.1.7.</b> Goniometría de las articulaciones de cadera y rodilla ( $q_{Ca}$ y $q_{Ra}$ , interna y externa, respectivamente) y la coordenada Y del CG ( $CY_{CG}$ ) en SH1, por tramos del viraje analizado.	161
<b>Figura 4.1.8.</b> Inclinación del tronco y de las extremidades inferiores del esquiador (hacia el exterior y hacia el interior y hacia delante de la curva, respectivamente), vista desde una visión posterior.	162
<b>Figura 4.1.9.</b> Representación gráfica de la trayectoria del CG en SH2,	164

posiciones espaciales analizadas (eventos) por tramos del viraje analizado y tramo crítico (en rojo) donde **1**, se corresponde con el momento de inicio de la secuencia; **2**, es la posición más baja del CG; **3**, es la posición en donde la proyección vertical de CG está más alejada de la puerta de viraje; **4**, es el momento de contacto con el palo de viraje; **5**, es el momento donde el esquí exterior cambia de trayectoria hacia el interior de la curva; y **6**, se corresponde con el momento final de la secuencia.

**Figura 4.1.10.** Representación gráfica de las velocidades medias resultante, horizontal y transversal del CG ( $VR_{CG}$ ,  $VX_{CG}$  y  $VZ_{CG}$ , respectivamente) en SH2 por tramos del viraje analizado. En rojo, tramo crítico. 166

**Figura 4.1.11.** Representación gráfica de la coordenada Y del CG ( $CY_{CG}$ ) en SH2, por tramos del viraje analizado y tramo crítico en rojo. 168

**Figura 4.1.12.** Representación gráfica de las velocidades medias horizontal, transversal y resultante de la punta de la bota de la pierna externa ( $VX_{BI}$ ,  $VZ_{BI}$  y  $VR_{BI}$ , respectivamente) en SH2, por tramos del viraje analizado con respecto a sus homónimas del CG ( $VX_{CG}$ ,  $VZ_{CG}$  y  $VR_{CG}$ , respectivamente) del sistema, expresados en valor absoluto ( $ms^{-1}$ ). 169

**Figura 4.1.13.** Goniometría de las articulaciones de cadera y rodilla ( $q_{Ca}$  y  $q_{Rd}$ , interna y externa, respectivamente) y coordenada Y del CG ( $CY_{CG}$ ) en SH2, por tramos del viraje analizado. 171

**Figura 4.1.14.** Representación gráfica de la trayectoria del CG en SH3, posiciones espaciales analizadas (eventos) por tramos del viraje analizado donde **1**, se corresponde con el momento de inicio de la secuencia; **2**, es la posición más baja del CG; **3**, es la posición en donde la proyección vertical de CG está más alejada de la puerta de viraje; **4**, es el momento de contacto con el palo de viraje; **5**, es el momento donde el esquí exterior cambia de trayectoria hacia el interior de la curva; y **6**, se corresponde con el momento final de la secuencia. 172

**Figura 4.1.15.** Representación gráfica de las velocidades medias horizontal, transversal y resultante de la punta de la bota de la pierna externa ( $VX_{BI}$ ,  $VZ_{BI}$  y  $VR_{BI}$ , respectivamente) en SH3 por tramos del viraje analizado con respecto a sus homónimas del CG ( $VX_{CG}$ ,  $VZ_{CG}$  y  $VR_{CG}$ , respectivamente) del sistema, expresados en valor absoluto 175

( $\text{ms}^{-1}$ ).

<b>Figura 4.1.16.</b> Representación gráfica de la coordenada Y del CG ( $CY_{CG}$ ) en SH3, por tramos del viraje analizado.	176
<b>Figura 4.1.17.</b> Goniometría de las articulaciones de cadera y rodilla ( $q_{Cd}$ y $q_{Rd}$ , interna y externa, respectivamente) y coordenada Y del CG ( $CY_{CG}$ ) en SH3, por tramos del viraje analizado.	177
<b>Figura 4.1.18.</b> Representación gráfica de las trayectorias del CG en sujetos hombres (SH).	179
<b>Figura 4.2.1.</b> Representación gráfica de las trayectorias del CG en sujetos damas (SD).	183
<b>Figura 4.2.2.</b> Representación gráfica de la velocidad media resultante, horizontal, transversal del CG ( $VR_{CG}$ , $VX_{CG}$ , $VZ_{CG}$ respectivamente) y desviación típica en Sujetos damas (SD) por % de tiempo en el viraje analizado, expresado en valor absoluto ( $\text{ms}^{-1}$ )	188
<b>Figura 4.2.3.</b> Representación gráfica de la velocidad media resultante, horizontal y transversal de la punta de la bota izquierda ( $VR_{BI}$ , $VX_{BI}$ y $VZ_{BI}$ , respectivamente) y desviación típica en sujetos damas por % de tiempo de viraje analizado.	196
<b>Figura 4.2.4.</b> Representación gráfica de la Coordenada Y media del CG ( $CY_{CG}$ ) en sujetos damas y desviación típica por % de tiempo del viraje analizado.	198
<b>Figura 4.2.5.</b> Goniometría media y desviación típica de la articulación de cadera y rodilla (interna y externa) en Sujetos Damas, por porcentaje del tiempo total del viraje analizado.	199
<b>Figura 4.2.6.</b> Inclinación de los miembros inferiores hacia el interior de la curva y aumento del rozamiento al apoyar los esquís sobre los cantos.	200

**Tablas Capítulo 4**

**Página**

<b>Tabla 4.1.1</b> Análisis temporal de los Sujetos Hombres (SH), expresado en valor absoluto (s), donde <b>TB</b> es el Tiempo de Bajada; <b>TI</b> es el Tiempo intermedio; y <b>TV</b> es el Tiempo del viraje analizado.	151 154
--	------------

<b>Tabla 4.1.2.</b> Velocidad media alcanzada del CG en SH1, en la dirección de la pendiente ( $VX_{CG}$ ), en la componente Z ( $VZ_{CG}$ ) y resultante ( $VR_{CG}$ ) por tramos del viraje analizado, expresados en valor absoluto ( $ms^{-1}$ ).	
<b>Tabla 4.1.3.</b> Velocidad media alcanzada del CG en SH2, en la dirección del movimiento ( $VX_{CG}$ ), en la componente Z ( $VZ_{CG}$ ) y resultante ( $VR_{CG}$ ) por tramos del viraje analizado, expresado en valor absoluto ( $ms^{-1}$ ).	165
<b>Tabla 4.1.4.</b> Velocidad media alcanzada del CG en SH3, en la dirección del movimiento ( $VX_{CG}$ ), en la componente Z ( $VZ_{CG}$ ) y resultante ( $VR_{CG}$ ) por tramos del viraje analizado, expresados en valor absoluto ( $ms^{-1}$ ).	173
<b>Tabla 4.2.1.</b> Análisis temporal y estadística descriptiva en Sujetos Damas, expresado en valor absoluto (s), donde <b>TB</b> es el Tiempo de Bajada; <b>TI</b> es el Tiempo intermedio; y <b>TS</b> es el Tiempo de Secuencia de viraje analizado.	181
<b>Tabla 4.2.2.</b> Velocidad media resultante por tramos del CG ( $VR_{CG}$ ) alcanzada en sujetos damas (SD) y estadística descriptiva, expresado valor absoluto ( $ms^{-1}$ )	185
<b>Tabla 4.2.3.</b> Velocidad media alcanzada por tramos, del CG en sujetos damas (SD) en la componente X ( $VX_{CG}$ ) y estadística descriptiva, expresado en valor absoluto ( $ms^{-1}$ ).	186
<b>Tabla 4.2.4.</b> Velocidad media alcanzada por tramos, del CG en sujetos damas (SD), en la componente Z ( $VZ_{CG}$ ) y estadística descriptiva, expresado en valor absoluto ( $ms^{-1}$ ).	187
<b>Tabla 4.2.5.</b> Estadística inferencial de medidas repetidas de la velocidad media alcanzada resultante del CG ( $VR_{CG}$ ) en sujetos damas (SD) del viraje analizado.	191
<b>Tabla 4.2.6.</b> Prueba parcial de contraste en sujetos damas (SD) y niveles de significación entre tramos analizados.	191
<b>Tabla 4.2.7.</b> Velocidad media resultante por tramos de viraje de la punta de la bota externa ( $VR_{BT}$ ) alcanzada en Sujetos Damas y estadística descriptiva, expresado en valor absoluto ( $ms^{-1}$ ).	193
<b>Tabla 4.2.8.</b> Velocidad media alcanzada por tramos de viraje de la	194



punta de la bota externa (BI) en Sujetos Damas en la componente X ( $VX_{BI}$ ) y estadística descriptiva, expresado en valor absoluto ( $ms^{-1}$ ).

**Tabla 4.2.9.** Velocidad media alcanzada por tramos de viraje de la punta de la bota externa (BI) en Sujetos Damas. en la componente Z ( $VZ_{BI}$ ) y estadística descriptiva, expresado en valor absoluto ( $ms^{-1}$ ). 195

**Figuras Capítulo 5**

**Página**

**Figura 5.1.** Reducción e incremento de la  $V_{R_{CG}}$  como consecuencia del aumento de la distancia (d) en el Eje X y Eje Z a la trayectoria descrita por el CG. Según esta figura, la trayectoria roja es la que menos reducción de velocidad tiene y la verde la que más. 205

**Figura 5.2.** Cálculo de la Velocidad tangencial ( $V_t$ ) del CG y del pie externo, donde  $V_{t(CG)}$  es la velocidad tangencial del centro de gravedad del sistema;  $V_{t(e)}$  es la velocidad tangencial del pie externo;  $r_{(i)}$  y  $r_{(i+t)}$  es el radio de giro de la trayectoria del CG;  $d_{(i)}$  y  $d_{(i+t)}$  es la distancia que separa la trayectoria del pie externo con respecto a la trayectoria del CG;  $t$  es el tiempo transcurrido;  $\dot{\theta}$  es el desplazamiento angular; y  $T_e$  y  $T_{CG}$  son las trayectorias del pie externo y el centro de gravedad, respectivamente. 207

**Figura 5.3.** Diagrama de fuerzas en el plano frontal en un esquiador realizando un viraje. **1)** con respecto al CG del esquiador, donde  $F_n$  es la fuerza normal,  $F_g$  es la fuerza de la gravedad  $F_y$  es la fuerza de componente vertical; y  $F_c$  es la fuerza centrípeta generada al inclinarse el esquiador hacia el interior de la curva. **2)** con respecto al apoyo, donde  $F_r$  es la fuerza de rozamiento contra el sistema;  $F_n$  es la fuerza de reacción normal y  $R$  es la fuerza de reacción resultante, que tiene que pasar por el CG del sistema. Cuanto mayor es  $F_c$ , mayor es  $F_r$  y  $R$ . 209