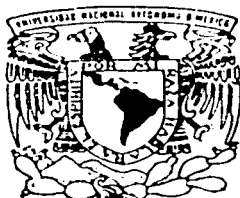


15



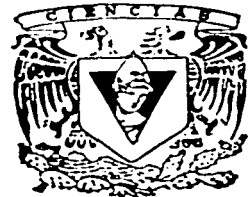
# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

"ANALISIS DINAMICO DEL SALTO VERTICAL Y SU CORRELACION CON LA FUERZA MUSCULAR DEL GRUPO CUADRICEPS".

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
F I S I C O  
P R E S E N T A :  
RAMON GUSTAVO CONTRERAS MAYEN



FACULTAD DE CIENCIAS UNAM

DIRECTOR DE TESIS: DR. ENRIQUE SALVADOR BUZO CORDOVA

2002  
FACULTAD DE CIENCIAS  
SECCION ESCOLAR



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
MARACAIBO

**M. EN C. ELENA DE OTEYZA DE OTEYZA .**

Jefa de la División de Estudios Profesionales de la  
Facultad de Ciencias  
Presente

Comunico a usted que hemos revisado el trabajo escrito:

"Análisis dinámico del salto vertical y su correlación con la  
fuerza muscular del grupo cuádriceps"

realizado por Ramón Gustavo Contreras Mayén

con número de cuenta 9011865-2 , quién cubrió los créditos de la carrera de Física

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis

Propietario

DR. ENRIQUE SALVADOR BUZO CORDOYA

Propietario

DR. MIGUEL AGUILAR CASAS

Propietario

M. EN C. OCTAVIO ALVAREZ FREGOSO

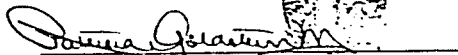
Suplente

DRA. CLARA ESQUIVEL HUESCA

Suplente

FIS. PLUTARCO ALEJANDRO GONZALEZ Y HERNANDEZ

Consejo Departamental de Física

  
DRA. PATRICIA GOLDSTEIN MENACHE  
Coordinadora de Licenciatura

**Agradezco a mis tutores y sinodales de tesis su participación en la revisión de este trabajo, tomando su ejemplo para continuar mi desarrollo profesional y personal.**

**Al Dr. Enrique Buzo Córdova, director de mi trabajo de tesis, por su amistad, paciencia, e interés en mi desarrollo como físico.**

**Al Dr. Miguel Aguilar Casas, Jefe del Departamento de Biomecánica de la Subdirección de Investigación y Medicina del Deporte de la UNAM. Por su asesoría y las facilidades proporcionadas del Laboratorio que dirige para la elaboración esta tesis.**

**Al M. en C. Octavio Alvarez Fregoso, del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM.**

**A la Dra. Clara Esquivel Huesca, del Departamento de Biología de la Facultad de Ciencias.**

**Al Fís. Plutarco Alejandro González, Coordinador del los Laboratorios de Mecánica del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias.**

## **Dedicatorias.**

**A mi Papá y a mi Mamá. De quienes he tomado la convicción de ser mejor cada día y me han dado las herramientas para lograr esta meta.**

**A mis hermanos y hermanas: Rita, Ricardo, Alejandra, Rosario & Juan Carlos, Gabriel & Angélica, Francisco & Patricia y Martha. Por apoyarnos, enfrentando los retos y compartir los resultados.**

**A lo largo de la carrera dentro y fuera de la Facultad he tenido voces de aliento, de impulsos para seguir, a todas esas personas les agradezco su interés y sus palabras para continuar en este camino. Entre ellas:**

**A la familia Pérez Olguín por compartirme su amistad y dejarme ser parte de ellos.**

**A Alicia & Pablo Ruiz Pérez con quienes mantengo un especial lazo de amistad y compadrazgo, para Lalito mi ahijado para que más adelante la senda que él vaya a recorrer le sea más accesible de andar.**

**A la memoria de Eduardo, un gran amigo y colega.**

**A las familias Rosas Toledo (Hugo & Familia), Olvera Rosas (José Luis & Claudia), Olvera Cantera (Claudia & Familia), Morales Velázquez (Manolo & Familia), Castruita López (Roberto & Juanita), García Hernández (Rogelio & Familia), Hernández Gutiérrez (Salvador & Angela), Agundiz Pedraza (Angelina & Familia), Cervantes Agundiz (Eduardo & Cristina).**

**A mis compañeros de:**

- CCH plantel Vallejo: Sandra, Diana, Ericka, Nancy, Edmundo, Iván, Gloria, Maribel, Sandra Susana, Evelyn.
- Generación y amigos de la carrera: Nacho, Memo, Hugo (q.e.p.d.), Jorge, Marianne, César, Mónica Ibonne, Oscar, David Velázquez, Alejandra, Luis Angel, Enrique Méndez, Erick & Norma, Mónica Rojas, Emylie, Alejandro, Magdalena, Benjamín Morales. Por aquéllos juegos de fútbol en las islas o en el frontón.

Un agradecimiento especial a:

A la M. en C. Alicia Zarzosa Pérez quien me dio la oportunidad de integrarme al equipo de trabajo de Biofísica y Física Médica en la Facultad, por su compañerismo y dirección.

Al Dr. César González Beltrán, quien me aceptó para participar en la labor docente dentro de la Facultad y en la carrera de Física.

Al Biól. Armando Muñoz Comonfort, profesor que me acercó al fascinante estudio de la fisiología humana.

A la Lic. Angelina Agundiz por su amistad y apoyo.

Al Quím. Victoriano Rodríguez, amigo y compañero.

A la Facultad de Ciencias. A sus profesores.

Al Centro Mascarones de la DGSCA (Mat. Miguel Angel Flores, Lic. Beatriz Jiménez, Ing. Sergio Alva, a los departamentos de Control Escolar e Infraestructura), por confiar en mi y dejarme ser parte del proceso educativo en cómputo.

La Universidad me dio la oportunidad de lograr una meta, ésta se ha alcanzado y que gusto de seguir avanzando y participar en el gran proyecto que es la UNAM. No sólo tengo la camisa bien puesta para ir a los partidos de fútbol y apoyar a los Pumas, esa camisa se ha convertido en parte de mi vida profesional y personal.

# Indice

|                       |   |           |
|-----------------------|---|-----------|
| <b>Capítulo 1</b>     | <b>BIOMECÁNICA DE LA CONTRACCIÓN MUSCULAR</b>   | <b>3</b>  |
| 1.1                   | Biomecánica funcional   | 3         |
| 1.2                   | Fisiología del músculo  | 7         |
| 1.3                   | Proteínas contráctiles  | 8         |
| 1.4                   | Biomecánica de la contracción muscular  | 9         |
| 1.5                   | Fuerza muscular   | 12        |
| 1.5.1                 | La ecuación de Hill   | 13        |
| 1.5.2                 | La relación fuerza - longitud de acortamiento en el músculo   | 14        |
| <b>Capítulo 2</b>     | <b>MODELO BIOMECÁNICO DEL SALTO VERTICAL</b>  | <b>18</b> |
| 2.1                   | Modelo inicial  | 18        |
| 2.2                   | La plataforma de fuerzas  | 22        |
| 2.2.1                 | Calibración de la plataforma antes del salto  | 23        |
| 2.3                   | Registro de tiempo de vuelo   | 24        |
| 2.4                   | Análisis del salto vertical   | 26        |
| <b>Capítulo 3</b>     | <b>VARIABLES Y DATOS BIOMECÁNICOS Y ANTROPOMÉTRICOS</b>   | <b>31</b> |
| 3.1                   | Pruebas realizadas en laboratorio   | 31        |
| 3.2                   | Índice dinamométrico  | 32        |
| 3.3                   | Los grupos de sujetos observados  | 33        |
| 3.3.1                 | Interpretación de los resultados de las correlaciones   | 38        |
| 3.4                   | Comparación estadística de variables antropométricas y biomecánicas en tres grupos de individuos con diferente nivel de actividad deportiva | 41        |
| <b>Capítulo 4</b>     | <b>DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS</b>  | <b>48</b> |
| 4.1                   | Las variables dinamométricas  | 48        |
| 4.2                   | Los valores de fuerza muscular  | 49        |
| <b>Capítulo 5</b>     | <b>CONCLUSIONES</b>   | <b>53</b> |
| <b>Apéndice A</b>     | <b>LA PRUEBA ESTADÍSTICA SHAPIRO-WILK PARA NORMALIDAD</b>   | <b>56</b> |
| <b>Bibliografía I</b> | <b>REFERENCIAS</b>  | <b>62</b> |

## Introducción

La física como ciencia ha tenido una relación muy estrecha con el hombre y el entorno en donde se desarrolla; permitiéndole ver desde las estrellas más allá de nuestro sistema solar, hasta conocer la estructura más íntima de la materia. Logros de este tipo han permitido conocer mejor el mundo en que vivimos, hoy en día es común hablar de internet, de vuelos intercontinentales en corto tiempo, descubrir nuevos objetos celestes, comunicaciones móviles; también conocemos mejor a la naturaleza y podemos estar más prevenidos antes eventos naturales tales como: sismos, huracanes, volcanes, etc. La física junto con otras áreas del conocimiento le proveen al hombre, un conjunto de sistemas e instrumentos que exploran la composición y estado de su organismo en instantes, sin tener efectos secundarios por ser intervenciones no invasivas, tal es el caso de la resonancia magnética nuclear. La física así como otras ciencias son interdisciplinarias, tal es el caso de la biomecánica, "...la biomecánica es un término formado por la combinación de las palabras *biología* y *mecánica*, por lo tanto se puede considerar como una perspectiva científica orientada a establecer los principios y métodos de la aplicación mecánica al estudio de las estructuras y fundamentos de los sistemas biológicos."<sup>1</sup>

Este trabajo de tesis estudia en particular el salto vertical y la máxima altura alcanzada, se revisa si existe una relación, un movimiento en el que interviene la fuerza muscular generada por las piernas; en el Capítulo 1 se discute la estructura y función del músculo esquelético que interviene en la primera etapa del salto vertical. Al conocer el origen de la fuerza necesaria para elevar el cuerpo, el punto de referencia para estimar la máxima altura alcanzada es el centro de masa del sujeto (*CM*); en el Capítulo 2 se presentan: el modelo biomecánico para estudiar el salto vertical, el sistema de registro con el que se captura la información en sujetos, además de que por medio del software del sistema de registro arroja información numérica, también lo hace de manera gráfica.

En el Capítulo 3 se realiza un análisis estadístico de la información recabada, es en esta parte en donde se determinan las posibles relaciones entre variables de estudio, es decir, entre la fuerza muscular y la altura alcanzada. La interpretación de los resultados generales se da en el Capítulo 4, indicando también las características de las variables físicas y las variables somáticas en el sujeto. Las conclusiones del trabajo de tesis se encuentran en el Capítulo 5, junto con las aportaciones que ofrece el estudio de salto vertical en sujetos.

<sup>1</sup> Definición de Marcos Gutierrez en "Biomecánica deportiva", 1998.



# Capítulo 1

## Biomecánica de la contracción muscular

Al estudiar física hemos aprendido a modelar situaciones ideales que nos ayudan en el estudio de fenómenos en los campos de la misma; esos modelos incluyen suposiciones y condiciones iniciales de movimiento, de aceleración, de fuerzas, etc. Si el objeto de estudio es el cuerpo humano, debemos de hacer a un lado ese conjunto de suposiciones y entonces analizar un comportamiento más real. Existen una serie de procesos físicos, bioquímicos, biofísicos que se desarrollan dentro del cuerpo humano (debido a la complejidad de los fenómenos involucrados, no podemos dejar de hacer consideraciones para el estudio, pero inicialmente podemos limitar el alcance del mismo), por lo que no podemos hablar de un estado de reposo como estado de inactividad si estudiamos la física en el cuerpo humano.

Es importante (desde mi punto de vista) entender el origen de las fuerzas que intervienen en el desarrollo de un movimiento en específico, el del salto vertical. La fuerza muscular se genera a una escala muy pequeña en comparación a las dimensiones del hombre, no por esto debe de despreciarse; la fuerza muscular que interesa estudiar en este trabajo de tesis es la fuerza que desarrolla el grupo muscular cuádriceps; se habla de un grupo muscular precisamente porque involucra a una serie de músculos anatómicamente similares, localizados en la misma zona del cuerpo y que por su función es posible considerarlos como un único grupo más grande. En este primer capítulo se exponen las bases fisiológicas y biomecánicas de la contracción muscular, con un esbozo de los procesos bioquímicos involucrados.

### 1.1 Biomecánica funcional

Desde que nacemos hemos aprendido a controlar la mayoría de nuestros músculos para realizar movimientos y actividades como caminar, nadar, comer, etc. en donde el conjunto de músculos actúa coordinadamente. La tarea del músculo es responder mecánicamente a una señal neural u hormonal, con lo que se establece una relación activa entre nuestro sistema nervioso central (SNC) y el ambiente externo: como generar una fuerza controlada para desarrollar trabajo mecánico, al acortarse el músculo contra la fuerza, y para absorber el trabajo ofreciendo una resistencia controlada. La ubicación espacial (ver figuras 1.1 y 1.2) de los músculos en el cuerpo humano facilita su estudio en cuanto función, debido a que al dividir al cuerpo en regiones anatómicas principales, es decir en regiones de los miembros superiores, miembros inferiores, de tórax, de dorso, etc. podemos recuperar el concepto de grupo muscular. Para los miembros superiores tenemos el grupo muscular bíceps, mientras que para los miembros inferiores se tiene al grupo muscular cuádriceps; estos dos grupos participan en la mayoría de los movimientos que realiza una persona.

En la figura 1.3 se observa el arreglo para estimar la fuerza muscular del

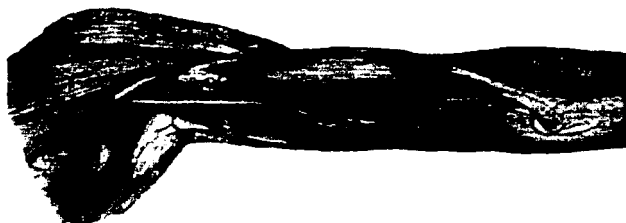


Figura 1.1. Ubicación espacial del grupo muscular bíceps.



Figura 1.2. Ubicación espacial del grupo muscular cuádriceps.

grupo bíceps del brazo izquierdo. La tarea en este caso consiste en levantar el brazo lentamente y con el máximo esfuerzo, para vencer el juego de poleas que está conectado a un dinamómetro; para conocer el estimado de la fuerza muscular podemos recurrir a una analogía del sistema, en donde los huesos son palancas rígidas, existe un punto de apoyo anatómico y la fuerza de resistencia corresponde al sistema de poleas y al dinamómetro.

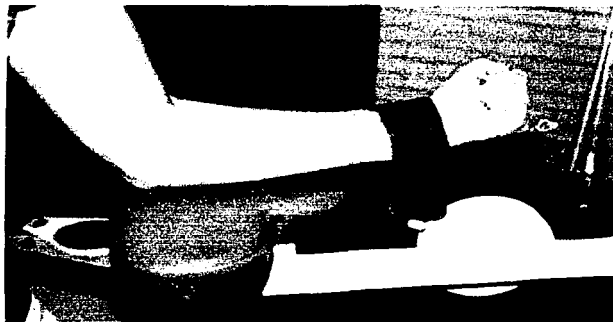


Figura 1.3. Disposición del brazo y antebrazo para estimar la fuerza muscular del grupo bíceps.

Un primer modelo para estimar el valor de la fuerza muscular del grupo bíceps por medio de palancas se muestra en la figura 1.4. Utilizando el análisis de palancas rígidas: en todo instante la distancia entre los elementos que conforman a los huesos (radio, cúbito y húmero) es la misma. El valor estimado para la fuerza muscular  $F$  se calcula con las siguientes condiciones iniciales: la fuerza muscular ( $F$ ) en estudio es la fuerza resultante del grupo muscular del bíceps (integrado por: bíceps radial, vasto externo, tríceps, vasto interno), consideremos el caso en equilibrio de momentos físicos, esto es  $\sum \tau = 0$ ; el esfuerzo generado se representa por la fuerza muscular  $F$ , el brazo de palanca  $r$  es perpendicular a la línea de acción de  $F$ , el valor de  $r$  ya está determinado a partir de estudios anatómicos y radiológicos y es de 4 cm (ver figura 1.4), el extremo distal de  $r$  es el tendón en donde inserta el paquete muscular al hueso (a el radio).

La *torca muscular* viene dada por  $\tau_m = F \times r$ ; la resistencia que en este caso proviene del dinamómetro  $D$  y que actúa sobre el antebrazo, tiene una longitud de brazo de palanca  $d$  generando por tanto, una *torca de extensión*  $\tau_e = D \times d$ .

Cuando el sistema está en equilibrio, las torcas deben ser iguales; considerando la convención de signos para las torcas, esto es, tienen signo positivo cuando están en

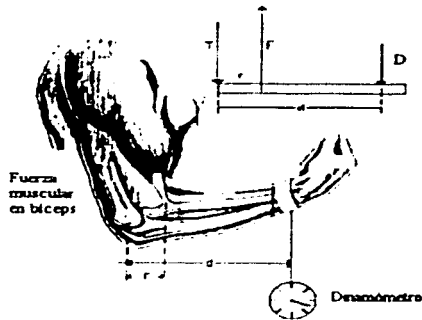


Figura 1.4. Diagrama de fuerzas para el cálculo de la fuerza muscular a partir de palanca rígidas.

sentido horario y negativo en caso contrario, resulta que:

$$\tau_m = \tau_e \quad (1.1)$$

$$(F \times r) + (-D \times d) = 0 \quad (1.2)$$

$$(F \times r) - (D \times d) = 0 \quad (1.3)$$

$$F = \frac{D \times d}{r} \quad (1.4)$$

En una primera aproximación podemos estimar el valor de la fuerza muscular del grupo bíceps en un sujeto, claro es que hemos ocupado un conjunto de condiciones iniciales para poder obtener la ecuación. Como se comentó anteriormente, la fuerza muscular desarrollada es una resultante total del grupo muscular, en ningún momento podemos afirmar que el valor \$F\$ fue desarrollado sólo por el músculo bíceps ya que intervienen otros músculos pero no nos es posible con el dispositivo utilizado estimar el valor de cada uno de ellos, por eso asumimos que de todo el paquete muscular el valor calculado corresponden a los músculos que participan. El siguiente paso a realizar es revisar el proceso por medio del cual se obtiene un registro de fuerza que corresponda a la lectura en el dinamómetro.

## 1.2 Fisiología del músculo

Un conjunto de características fisiológicas definidas permite diferenciar al músculo esquelético de los otros dos tipos de músculo (cardíaco y liso), una de ellas es la *contractilidad* (la contracción del músculo cardíaco y liso es por innervación simpática, de manera autónoma e involuntaria). Este fenómeno sigue el siguiente esquema:

- i).- se recibe un impulso nervioso<sup>2</sup>.
- ii).- se lleva a cabo un proceso de liberación de neurotransmisores y
- iii).- se presenta la contracción muscular que provoca cambios en los arreglos de la estructura de la fibra muscular.

Para comprender la forma en que se llevan a cabo los procesos antes mencionados, haremos una reducción de la escala de medida para llegar a los elementos principales del músculo. En la figura 1.5 se muestra la conformación del músculo esquelético: en la parte A (en la escala natural del hombre) se indica la estructura global, que agrupa un conjunto de fascículos musculares, claro es que, dependiendo del tamaño del músculo el número de fascículos crece proporcionalmente; la parte B muestra que cada fascículo está formado por fibras musculares que son consideradas como los "ladrillos" del sistema muscular<sup>3</sup>, la unidad denominada *retículo sarcoplásmico* es una membrana celular que rodea a cada fibra y tiene un papel importante en el proceso de contracción que se discute más adelante. Continuando con la ultraestructura de la fibra muscular (parte D), la fibra muscular está compuesta de miofibrillas, siendo esta parte de la constitución del tejido muscular en donde se aprecian bajo microscopía electrónica regiones contrastantes y líneas divisorias, en la miofibrilla se observan múltiples discos, unos claros y otros oscuros; la última etapa de división en la miofibrilla revela la existencia de filamentos de proteínas contráctiles, la miosina y actina, tropomiosina y troponina.

Las características bioquímicas y de función de los elementos anteriormente descritos (retículo sarcoplásmico, miofibrillas) de la figura 1.5, cada uno de ellos justifica el desarrollo de un capítulo de estudio<sup>4</sup>, pero en este trabajo, se indicarán las propiedades importantes que se integran para el mecanismo de contracción muscular en la siguiente sección. Para exponer el proceso de contractibilidad, se requiere revisar la arquitectura de la unidad funcional en la miofibrilla, esto es, la *sarcómera* que es la región espacial designada entre dos bandas oscuras (Banda Z) de la miofibrilla, por lo que contiene dos medios discos blancos y un disco oscuro, éste último también cuenta con una banda que lo atraviesa y que recibe el nombre de Banda H. La región comprendida entre dos discos claros se denomina Banda I (Isotrópica por su actividad con la luz polarizada), mientras que la zona que conforma dos discos oscuros tiene el

<sup>2</sup> El estudio de la conducción nerviosa, es un tema de completo interés desde el punto de vista biofísico y como tal merece un estudio aparte

<sup>3</sup> De acuerdo con Ganong, William. *Fisiología Médica*

<sup>4</sup> Se pueden revisar las referencias respectivas a bioquímica

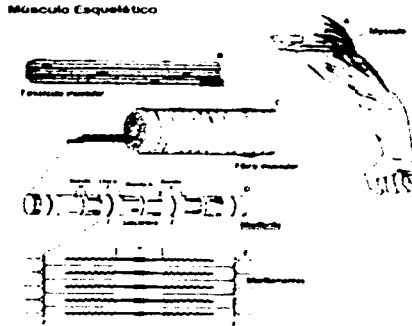


Figura 1.5. Conformación de la estructura del tejido muscular.

nombre de Banda A (Anisotrópica por su falta de actividad con la luz polarizada).

### 1.3 Proteínas contráctiles

Las proteínas sirven como material estructural en el cuerpo humano, además de ser sitios de reconocimiento y catalizadores para las reacciones químicas que ocurren dentro de las células<sup>5</sup>. En esta sección, se presenta la "ficha técnica" de las principales proteínas que intervienen en el proceso de contracción muscular. El músculo esquelético contiene cuatro proteínas principales: miosina, actina, tropomiosina y troponina. La *miosina* es la proteína más abundante en el músculo; está constituida por un par de cadenas pesadas y dos pares diferentes de cadenas ligeras. La estructura de las cadenas pesadas es una  $\alpha$ -hélice con residuos de prolina<sup>6</sup> agrupados en un solo lugar, para proporcionar una bisagra cerca del extremo de la estructura lineal. Las cadenas ligeras se localizan en la cabeza globular de la molécula de miosina. Un grupo de cadenas ligeras, posee actividad de la enzima ATPasa, necesaria para la contracción muscular.

La *actina* es una proteína de menor tamaño en comparación con la miosina (peso molecular de 45000); al ser sintetizada, la actina tiene una estructura globular y se le llama *actina G*. Después de fijar ATP<sup>7</sup> y una molécula de Ca, se convierte a la

<sup>5</sup> Aproximadamente el 15% del cuerpo humano está constituido por proteínas.

<sup>6</sup> La  $\alpha$ -hélice es igual a la hélice del DNA, da el giro hacia la derecha, esto la hace más estable. La prolina es un aminoácido que se encuentra en estado natural en las proteínas.

<sup>7</sup> El Adenosin Trifosfato (ATP) es la unidad básica y fundamental para los procesos energéticos en las células.

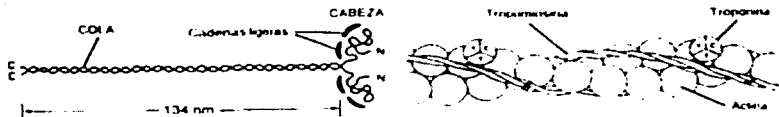


Figura 1.6. Parte Izquierda: Molécula de miosina formada por dos cadenas pesadas, entrelazadas y cuatro cadenas ligeras. Parte Derecha: Esquema de la disposición de las proteínas: actina, tropomiosina y las tres subunidades de troponina (I, C y T). Tomado de GANONG, William, Fisiología Médica.

forma en que puede polimerizarse para dar una fibra. Esta forma se llama *actina F*. Las subunidades del polímero, no están unidas entre sí por covalencia, y se ordenan en una doble hélice. En la figura 1.6 se muestra un esquema de la estructura tanto de la miosina como de la actina.

La *tropomiosina*, tercer proteína fibrosa, se compone de dos cadenas proteínicas diferentes (a y b) ordenadas en una  $\alpha$ -hélice. La tropomiosina se introduce en una hendidura de la hélice de la actina F. La *troponina*, que sólo existe en el músculo esquelético, se compone de tres subunidades diferentes. La subunidad T, une a la molécula con la tropomiosina. La subunidad I, inhibe la interacción de miosina y actina, e impide la contracción muscular. La subunidad C, es capaz de fijar cuatro iones de  $Ca^{+2}$ . (Ver la figura 1.6 en donde se presenta un esquema de las subunidades de la troponina en una cadena de actina).

La actividad contráctil se presenta en la sarcómera en donde se presenta la actividad contráctil. Revisando la figura 1.7C, se observa el arreglo entre los filamentos: los filamentos gruesos formados de miosina tienen el doble de tamaño que los filamentos delgados de actina, tropomiosina y troponina; los filamentos de miosina se alinean de tal forma para darle estructura a la banda A, mientras que los filamentos de actina están dispuestos, resultando en la banda I. la contracción resulta de un desplazamiento de los extremos de la miofibrilla, provocando un acortamiento de la sarcómera.

#### 1.4 Biomecánica de la contracción muscular

El proceso de contracción se presenta en la unidad denominada sarcómera, siendo importante señalar que en ningún momento las proteínas involucradas sufren de un acortamiento; en esta sección se presentará el modelo de contracción muscular más aceptado. El proceso de tres puntos que se señaló también en el apartado 1.1 se revisará de una manera más completa, describiendo el proceso de excitación - contracción - relajación de la miofibrilla.

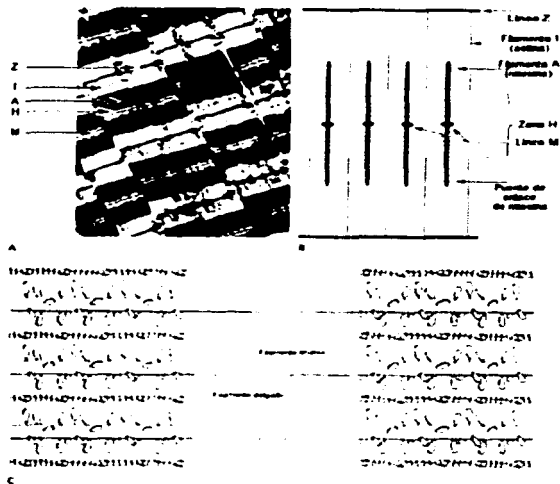


Figura 1.7. Parte A. Micrografía electrónica del músculo en donde se identifican las diversas bandas y líneas. Parte B: Esquema que muestra la disposición de los elementos en la sarcómera. Parte C. Relación entre los filamentos gruesos (miosina) y delgados (actina).

Un tema que es interesante desde el punto de vista biofísico es el de la conducción nerviosa, siendo ésta la vía de activación de los músculos; aquí se menciona la última parte de esta conducción que refiere a la inervación del músculo por medio de la acción del neurotransmisor (*acetilcolina*) con la placa terminal en el músculo. La inervación de las fibras musculares se lleva a cabo de manera independiente, es decir, que al activarse una fibra, las fibras vecinas son ajenas a la inervación; una fibra nerviosa motora puede inervar a varias fibras musculares que se contraen al mismo tiempo, permitiendo definir a la unidad motriz, que se agrupa de dos tipos:

1. *de alta precisión, en donde las unidades motrices inervan pocas fibras musculares, por ejemplo los músculos ciliares que controlan el movimiento ocular.*
2. *de poca precisión, claramente se activa un grupo mayor de fibras musculares.*

En estado de reposo, la subunidad I de la troponina, inhibe la formación de enlaces cruzados entre miosina y actina. Después de la estimulación nerviosa de la



célula muscular, el retículo sarcoplásmico libera  $\text{Ca}^{2+}$  de modo que su concentración se eleva alrededor de  $10^{-5}$  M. Esta concentración es lo suficientemente alta, para que la subunidad C de la troponina fije Ca. Con esta unión se altera la estructura de la molécula de troponina, de modo que los sitios de fijación de miosina en la actina se abren; son siete los sitios abiertos por cada subunidad C que fije Ca.

También en el estado de reposo, una ATPasa, localizada en las cadenas ligeras en la cabeza globular de miosina se une e hidroliza al ATP<sup>4</sup>. Sin embargo, no se liberan ADP y fosfato. Esta liberación tiene lugar, en el momento en que la cabeza gira y se une, a uno de los sitios para la fijación de miosina en la actina. Esta unión a la actina, coloca al grupo de la cabeza en un ángulo de  $90^\circ$ , con respecto a la porción restante de la miosina. Esta no es una orientación energéticamente favorable. El grupo de la cabeza, regresa a un ángulo de  $45^\circ$ , jalando a la molécula de actina hacia el centro de la sarcómera. En este momento, la miosina se desprende de la actina, fija e hidroliza a otro ATP, se mueve a otro sitio de fijación de la actina, y jala a ésta, todavía más, hacia la porción media<sup>9</sup>. Cada uno de estos desplazamientos, reduce el tamaño de la sarcómera aproximadamente un 1%; además cada filamento de miosina cuenta con alrededor de 500 cabezas que realizan este mismo procedimiento de interdigitación de filamentos de miosina y la actina, dando por resultado la contracción del músculo.

Después de la liberación inicial de  $\text{Ca}^{2+}$ , el retículo sarcoplásmico comienza a bombear  $\text{Ca}^{2+}$  de regreso al interior del retículo utilizando la energía proporcionada por la hidrólisis del ATP. Finalmente, esto reduce la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  a menos de  $10^{-7}$  M. A esta concentración, la subunidad C no retiene ya el Ca, y el cambio de conformación de la troponina se invierte. De nuevo, la subunidad I evita la interacción ulterior de miosina y actina. La miosina es atrapada con sus ADP y fosfatos, hidrolizados, pero no liberados, hasta que haya otro estímulo para iniciar la contracción. Debido a que, no hay fuerza alguna que sostenga a la actina contraída, ésta regresa a su posición relajada previa.

**Tabla 1.** Procesos involucrados en la activación del sistema contráctil. Los pasos 1 al 9 interesan a la etapa de contracción. Del paso 10 al 14 se lleva a cabo la contracción muscular; mientras que de los pasos 15 al 19 corresponden a la etapa de relajación.

1. *Descarga de la neurona motora*
2. *Liberación del transmisor (acetilcolina) en la placa terminal motora*
3. *Unión de la acetilcolina a los receptores nicotínicos de acetilcolina*
4. *Aumento de la conductancia de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  en la membrana de la placa terminal.*
5. *Generación del potencial de placa terminal*
6. *Generación del potencial de acción en las fibras musculares.*

• La hidrólisis de ATP consiste en la reacción entre ATP y agua, que resulta en ADP (Adenosin difosfato) y un grupo fosfato.  
• En la literatura fisiológica, también se le conoce también como "golpe de fuerza"

7. *Diseminación interna de la despolarización a través de los túbulos T*
8. *Liberación de  $Ca^{2+}$  de las cisternas terminales del retículo sarcoplásmico y difusión a los filamentos delgados y gruesos.*
9. *Difusión de  $Ca^{2+}$  en el filamento contráctil.*
10. *Fijación de  $Ca^{2+}$  a la troponina C, que descubre los sitios de unión de miosina con actina*
11. *Alteración del complejo  $Ca^{2+}$ -troponina-tropomiosina-actina para remover la supresión de la interacción de miosina con actina.*
12. *Con el complejo ADP-P-miosina localizado en los puentes de enlace de los filamentos gruesos se combinan con la actina en sitios disponibles, formando acetomiosina y ATPasa.*
13. *Cuando se hidroliza ATP, en la miosina se libera ADP y P, un "golpe de fuerza" se desarrolla en el complejo del puente de enlace entre la miosina y actina, se produce el acortamiento de la sarcómera.*
14. *El retículo sarcoplásmico bombea  $Ca^{2+}$ .*
15. *Se difunde  $Ca^{2+}$  en el retículo sarcoplásmico.*
16. *Liberación de  $Ca^{2+}$  del complejo de proteína contráctil.*
17. *Se reestablece la inhibición de troponina en la formación de enlaces de actina y miosina.*
18. *Se reduce el estado de tensión, se rompe el puente de enlace se forma miosina-ATP.*
19. *Se conforma de nuevo un complejo miosina-ADP-P.*

## 1.5 Fuerza muscular

El trabajo conjunto de un grupo muscular se refleja en una acción mecánica controlada. Los estudios fisiológicos han determinado una serie de características en los músculos en base a su contribución a los movimientos, es decir hay músculos que se activan en una actividad y otros que se oponen (músculos antagonistas). Decir que en una acción un grupo muscular opera completamente, no es tan preciso ya que resulta que hay músculos que ni siquiera se activan. En esta acción hacemos la suposición de que la fuerza muscular se genera en los grupos en donde los músculos se activan, la contribución de los músculos antagonistas -la acción de los músculos antagonistas depende del tono muscular o estado de contracción básica que se opone a la acción de los grupos activos-, debido a cuestiones técnicas de medición no nos es posible determinar el grado de participación (el registro de la actividad eléctrica muscular por medio de la *electromiografía* (EMG) no nos permite conocer qué paquetes de fascículos musculares están estimulados y contribuyen a la acción mecánica y cuáles a pesar de estar activados se oponen<sup>10</sup>).

<sup>10</sup> De acuerdo con Nigg "el medir señales de EMG de un músculo en particular en un sistema, existe siempre la posibilidad de que señales provenientes de músculos vecinos sean registradas"

### 1.5.1 La ecuación de Hill

Los experimentos que realizó Hill (1938) en el músculo *sartorius* de rana, al introducir un termopar muy sensible dentro del músculo, le permitió registrar valores de voltaje en dicho termopar conforme agregaba pesos en un extremo de su dispositivo con los que tensionaba al músculo generando una contracción, siendo ésta registrada por una plumilla que realizaba un trazo sobre papel. El voltaje que registraba el termopar, para un músculo dado, es proporcional al calor producido por el músculo.

Hay dos tipos de contracciones, una de ellas es la contracción *isométrica*, que consiste en aplicar una fuerza variable al músculo y éste mantiene su longitud constante; el otro tipo de contracción es la contracción *isotónica*, en donde la longitud del músculo es variable con la aplicación de una fuerza constante. Los experimentos concluyen que cuando el músculo se acorta, éste libera energía extra de dos maneras independientes: a) el calor de acortamiento proporcional al acortamiento, y b) trabajo mecánico.

Ya que el calor de acortamiento es proporcional a la distancia de acortamiento, se puede escribir de la siguiente forma:

$$\text{calor de acortamiento} = ax \quad (1.5)$$

donde  $x$  es la distancia de acortamiento y  $a$  es una constante con dimensiones de fuerza; debe considerarse a  $a$  como una resistencia por fricción. El calor producido por el músculo en contracción es como si el trabajo realizado por mover el músculo una distancia  $x$  en contra de una fuerza de fricción  $a$ . Es claro que la cantidad  $a$ , depende del área de sección transversal del músculo.

Si considermos a  $P$  como la carga a levantar por el músculo en una distancia de acortamiento  $x$ , el trabajo realizado es  $Px$ . Por lo que el trabajo total realizado en exceso isométrico es la suma de eso,  $(P + a)x$ . La razón de cambio de la energía liberada es la derivada de ésta cantidad con respecto al tiempo,  $(P + a)(dx/dt)$ , o  $(P + a)v$ , donde  $v$  es la velocidad de acortamiento.

Se realizaron experimentos<sup>11</sup> para determinar la dependencia de la velocidad con la carga. La velocidad se obtuvo directamente de los registros mecánicos y  $a$  era conocida de otros experimentos. Al graficar  $(P + a)v$  contra distintas cargas  $P$ , se observa una relación lineal entre las variables, es decir, entre la razón de cambio de energía y la carga. Cuando no hay un desplazamiento, es decir, cuando  $v = 0$ , se tiene que  $P = P_0$  por lo que  $P_0$  representa la fuerza generada por el músculo cuando la longitud es constante, esto es,  $P_0$  es una fuerza isométrica y  $b$  es la pendiente de la recta, la relación puede expresarse como:

$$(P + a)v = b(P_0 - P) \quad (1.6)$$

que se conoce como la ecuación de Hill. La constante  $b$  tiene dimensiones de velocidad y también es proporcional al tamaño del músculo.

<sup>11</sup> Entre otros, los experimentos que realizó Huxley.

La ecuación puede re-expresarse como

$$(P + a)(v + b) = (P_0 + a)b = \text{constante} \quad (1.7)$$

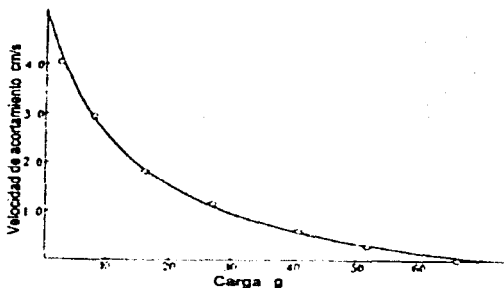


Figura 1.8. Relación entre la carga en un músculo y la velocidad de contracción; los círculos representan datos experimentales mientras que la curva suave corresponde a la expresión de la ecuación 1.

Esta es la ecuación de una hipérbola rectangular (ver figura) con asíntotas en  $P = -a$  y  $v = -b$ . La relación lineal de la ecuación involucra una medición térmica, que es el calor liberado durante el acortamiento de la cual la cantidad  $a$  se deriva, los experimentos indican que el valor de  $a$  es el mismo para distintas cargas. De cualquier forma, cuando el resultado de se escribe de la forma de la ecuación, puede verificarse por las mediciones mecánicas sólo de  $P$  y  $v$ . Cuando  $P = 0$ , ocurre que  $v = (a/b) P_0$  y esta cantidad es la máxima velocidad con la que el músculo es capaz de acortarse.

### 1.5.2 La relación fuerza - longitud de acortamiento en el músculo

Una vez que se han presentado las características fisiológicas y biofísicas del músculo, que permiten la comprensión del fenómeno de contracción a nivel microscópico, es necesario ofrecer la visión macroscópica, la que nos interesa para este trabajo, ya que es a esta escala en donde el desarrollo y aplicación de una fuerza muscular es medible (aunque el proceso de medición sea indirecto).

Nos ayuda a entender muchas de las propiedades mecánicas del músculo un modelo simplificado de su estructura: una combinación de sus componentes elásticos y contráctiles (ver figura 1.9). Los componentes elásticos, por sus propiedades mecánicas, son análogos a los resortes: para extenderlos hay que aplicar una fuerza. El trabajo de

la fuerza es igual a la energía de deformación elástica que puede convertirse, en la fase siguiente del movimiento, en trabajo mecánico. Se distinguen: *a*) los componentes elásticos paralelos (CP), que son formaciones de tejido conjuntivo que componen la membrana de las fibras musculares y de sus haces, y *b*) los componentes elásticos sucesivos (CS) que son los tendones de los músculos, los lugares en que las miofibrillas se convierten en tejido conjuntivo, así como tramos aislados de la sarcómera.

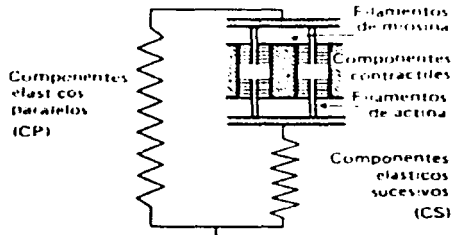


Figura 1.9. Modelo de las propiedades del músculo.

Los componentes contráctiles corresponden a aquellas partes de las sarcómeras del músculo donde los miofilamentos de actina y miosina se superponen unos a otros. En estos tramos, durante la excitación del músculo tiene lugar la interacción mecánica entre los filamentos de actina y miosina, lo que conduce a la variación de la tensión y de la longitud del músculo. Como cada miofibrilla está compuesta de gran número ( $n$ ) de sarcómeras sucesivamente dispuestas, la magnitud y la velocidad de variación de la longitud de las miofibrillas es en  $n$  veces mayor que la de una sarcómera.

La fuerza desarrollada por cada una de ellas es igual a la fuerza que se registra en el extremo de la miofibrilla (a semejanza de como son iguales las fuerzas en cada uno de los miembros de la cadena, a cuyo extremo se ha aplicado una fuerza de distensión). Estas mismas  $n$  sarcómeras, unidas paralelamente (lo que corresponde a una mayor cantidad de miofibrillas), darían un incremento de la fuerza en  $n$  veces, pero en tal caso la velocidad de variación de una sarcómera. Por eso, en igualdad de condiciones, el incremento de la sección fisiológica del músculo conduciría a un incremento de su fuerza, pero no variaría su velocidad de acortamiento; por el contrario, un incremento de longitud del músculo se reflejaría positivamente en la velocidad de contracción, pero influiría sobre la fuerza generada.

El músculo en reposo posee propiedades elásticas: si a su extremo se aplica

una fuerza externa, el músculo se distiende (aumenta su longitud) después que cesa la carga externa, recupera su longitud inicial. La dependencia entre la magnitud de la carga y la elongación del músculo no es proporcional (no se somete a la Ley de Hooke) ver figura 1.10.

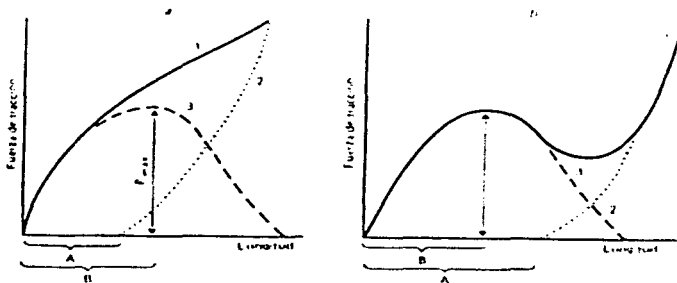


Figura 1.10. Dependencia entre la longitud y la fuerza de tracción en distintos músculos. A, longitud de equilibrio; B, longitud de reposo.

Al inicio, el músculo se extiende fácilmente, después para lograr una pequeña elongación de éste hay que aplicar cada vez una mayor fuerza (al músculo lo podemos comparar en este sentido con los objetos tejidos: si extendemos una bufanda de punto, entonces veremos que al inicio varía fácilmente su longitud, pero después se hace prácticamente inextensible).

Si el músculo se extiende reiteradamente a pequeños intervalos, entonces su longitud aumenta más que si se actúa sobre él una sola vez. Esta propiedad del músculo es aprovechada ampliamente en la práctica cuando se ejecutan ejercicios de flexibilidad (movimientos de resorte, péndulos repetidos, etc. que son muy comunes por ejemplo con los gimnastas). La longitud que trata de alcanzar el músculo cuando se encuentra libre de toda carga, se denomina de equilibrio (o libre). Cuando el músculo tiene esa longitud sus fuerzas elásticas son iguales a cero. En el organismo vivo la longitud del músculo siempre es algo mayor que la longitud de equilibrio y por eso incluso el músculo relajado conserva cierta tensión. De la figura 1.10.a, la curva 2 (línea punteada) representa a la tensión de músculo en reposo, mientras que la curva 1 corresponde a la tensión del músculo en actividad, esta tensión es la suma de la que ejerce el mecanismo contráctil más la elasticidad del músculo en reposo. Al restar la curva 1 de la curva 2, se obtiene la curva 3, que representa la tensión contráctil en el músculo. De la gráfica se observa que la tensión máxima se presenta muy cerca de la longitud de reposo del músculo. La figura 1.10.a representa a la mayoría de los músculos

de los miembros inferiores<sup>12</sup>, mientras que la figura 1.10.b expone el comportamiento para los músculos de los miembros superiores.

A partir de dos modelos de la actividad contráctil del músculo, es posible dar una explicación del origen de las curvas mostradas, uno de ellos ya se comentó y corresponde al modelo en paralelo de un elemento contráctil y uno elástico (ver figura 1.9), mientras que otro modelo en el que los elementos se encuentran en un arreglo en serie, permite la descripción de un acortamiento rápido. Hoy en día se conocen una gran variedad de modelos musculares, dependiendo del tipo de músculo el arreglo de los componentes elásticos, viscoelásticos cambia; la consideración de contribuciones viscoelásticas permite exhibir un modelo más completo, pero a la vez complica las ecuaciones de movimiento, apoyándose en las referencias de la mecánica del medio continuo en donde el estudio de materiales (y tejidos biológicos) no elásticos y viscoelásticos, el estudio biomecánico del modelo puede ser más completo.

Una vez revisada la conformación básica del músculo y de la teoría de la contracción muscular, el siguiente paso es presentar el modelo biomecánico y someterlo al análisis de la mecánica. En el siguiente capítulo se discute el modelo desde el punto de vista dinámico para posteriormente compararlo con los datos experimentales con los que ya se cuenta.

---

<sup>12</sup> Las formaciones de tejido conectivo y de músculos penniformes son mayores en los músculos de los miembros inferiores que en los de los miembros superiores.

## Capítulo 2

### Modelo biomecánico del salto vertical

Una vez que se tiene la referencia sobre la forma en que se desarrolla la fuerza muscular, en este capítulo se analizan los modelos biomecánicos para describir la evolución de un salto vertical. Se puede abordar el análisis mecánico del salto vertical y estimar la altura máxima alcanzada de tres formas distintas, en donde el uso de técnicas de registro de datos es a su vez, también diferente:

- El uso de la mecánica newtoniana para establecer las ecuaciones de movimiento.
- Usando el teorema de conservación de momento.
- Aplicando el método de trabajo - energía

En cada una de las maneras de análisis el concepto de centro de masa del sujeto ( $CM$ ) es fundamental, el  $CM$  es el punto físico y matemático que se desplaza como una partícula y cuya masa es la masa total del cuerpo. En un cuerpo rígido la posición del  $CM$  es fija, mientras que para un sistema de partículas, la posición depende de la configuración de los segmentos que conforman al sistema. Si dividimos al cuerpo humano en segmentos<sup>13</sup>, cada uno de ellos cuenta con un  $CM$  y existen técnicas para determinar su posición a partir de la longitud de los segmentos y pesos de los mismos<sup>14</sup>.

La importancia del  $CM$  en este trabajo radica en el hecho de que es el parámetro de comparación para estimar la altura máxima que alcanza durante el salto vertical.

En la figura 2.1, se observa que es independiente la posición inicial del salto, el valor de  $h$  (la diferencia de distancia del  $CM$  entre una postura de pie y cuando el está en el aire) es la altura máxima alcanzada. El problema planteado en la tesis es determinar si existe una relación entre la altura  $h$  y la fuerza muscular desarrollada por el grupo cuádriceps.

#### 2.1 Modelo inicial.

El movimiento de una partícula queda expresado por un conjunto de ecuaciones que se obtienen de la mecánica, tales ecuaciones hacen referencia a la posición, velocidad y aceleración que experimenta la partícula; con un análisis de cuerpo libre y la segunda ley de Newton las expresiones se obtienen de manera clara. En nuestro problema del salto vertical, el primer modelo que revisaremos es el de considerar el cuerpo humano como un conjunto de dos segmentos rígidos unidos por una rótula sin fricción (este sistema músculo-tendinoso permite que el ángulo entre los segmentos varíe) que soportan una masa  $M$  que corresponde a la parte superior del cuerpo

<sup>13</sup> En la referencia de RAMÉ Y M. R. *A simulation procedure for human motion studies*. El autor propone un modelo del cuerpo humano con 9 segmentos.

<sup>14</sup> Paolo de Leva realiza correcciones a los parámetros calculados previamente por Zatsiorsky-Selyanov



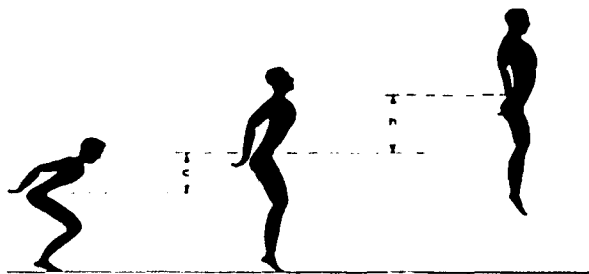


Figura 2.1. El desplazamiento  $h$  del centro de masa del sujeto, corresponde a la altura máxima alcanzada. El valor de  $c$  es la posición del CM por debajo de la postura de pie.

(suponemos que los segmentos no tienen masa), como se ve en la figura 2.2.

El objetivo de proponer este modelo inicial consiste en describir las ecuaciones de movimiento y estimar la altura máxima alcanzada; también tiene la intención de revisar cada vez que se agregan más segmentos y llegar a un modelo más cercano a la realidad, por ejemplo uno que cuenta con 4 segmentos principales, como se muestra en la figura 2.3; donde  $A$  es la articulación en el tobillo,  $K$  la articulación en la rodilla y  $H$  la articulación en la cadera.

Es importante señalar que el conjunto de ecuaciones aumenta conforme se consideran más segmentos, en esta etapa inicial no rebasaremos más de cuatro segmentos. De nueva cuenta se considera que cada uno de los segmentos no tiene masa y pueden rotar libremente en la articulación, en la figura 2.3,  $C'$  representa el centro de masa del sujeto. El salto vertical se ha dividido en tres etapas o fases para un mejor análisis y descripción, a continuación se indican tales etapas:

1. *Etapa de despegue.* Corresponde al intervalo de tiempo en donde el sujeto comienza a desarrollar un movimiento de flexión de las piernas, tronco, brazos. En este intervalo, el sujeto mantiene el contacto con el piso en todo momento.
2. *Etapa de vuelo.* El sujeto ya no tiene contacto con el piso y se encuentra en una fase de elevación, para fines prácticos, se desprecia la fricción del aire y es en esta etapa donde logra la máxima altura alcanzada; posteriormente desarrolla una caída libre hasta tocar de nueva cuenta el piso.
3. *Etapa de aterrizaje.* El sujeto realiza maniobras para equilibrarse al momento que entra en contacto con el piso. Es claro que la posición del sujeto al momento del despegue y en el aterrizaje es casi siempre distinta.

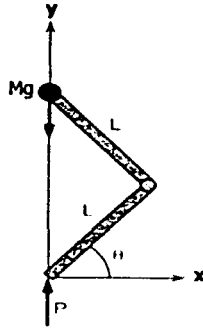


Figura 2.2. Modelo del cuerpo humano conformado por dos segmentos rígidos unidos mediante una articulación.

A continuación se hace la descripción de un modelo biomecánico para la etapa de despegue del sujeto, en esta etapa se determinan los parámetros necesarios para alcanzar la altura máxima, esto se explicará conforme se avanza en la descripción.

Conociendo la geometría del sistema de 2 segmentos (figura 2.2), se presenta la ecuación que nos proporciona el vector de posición ( $\vec{r}$ ) de la masa  $M$  para el tiempo  $t$ :

$$\vec{r} = 2L \sin \theta \hat{y} \quad (2.1)$$

donde  $L$  es la longitud del segmento,  $\hat{y}$  el vector unitario del sistema de referencia. Para estimar la velocidad y la aceleración de la masa  $M$ , debemos de tomar la primera y segunda derivada con respecto al tiempo, de la posición de dicha masa (Ec. ), por tanto:

$$\vec{v} = 2L \cos \theta \left( \frac{d\theta}{dt} \right) \hat{y} \quad (2.2)$$

$$\vec{a} = \left[ -2L \sin \theta \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2 + 2L \cos \theta \left( \frac{d^2\theta}{dt^2} \right) \right] \hat{y} \quad (2.3)$$

como se conoce la expresión para el movimiento del centro de masa de un objeto, que está dada por:

$$\sum \vec{F}_i = \left( \sum m_i \right) \vec{a}_c \quad (2.4)$$

donde  $\vec{a}_c$  es la aceleración del centro de masa del objeto. Al sustituir la Ec. en la Ec. , nos es posible expresar la fuerza  $\vec{F}$ , que ejerce la persona sobre el piso al momento

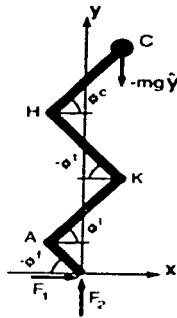


Figura 2.3. Modelo más elaborado del cuerpo humano en donde se consideran 4 segmentos rígidos.

realizar el salto<sup>15</sup>, así ocurre que:

$$[\vec{P} - M\vec{g}] \hat{y} = M \left[ -2L \sin \theta \left[ \frac{d\theta}{dt} \right]^2 + 2L \cos \theta \left[ \frac{d^2\theta}{dt^2} \right] \right] \hat{y} \quad (2.5)$$

por tanto

$$\vec{P} = M \left[ \vec{g} - 2L \sin \theta \left[ \frac{d\theta}{dt} \right]^2 + 2L \cos \theta \left[ \frac{d^2\theta}{dt^2} \right] \right] \hat{y} \quad (2.6)$$

cuando el sujeto deja de tener contacto con el piso, (se inicia la fase de vuelo) la fuerza de reacción  $\vec{P}$  es cero, y tenemos

$$\vec{g} = 2L \left[ \sin \theta \left[ \frac{d\theta}{dt} \right]^2 - \cos \theta \left[ \frac{d^2\theta}{dt^2} \right] \right] \hat{y} \quad (2.7)$$

Para estimar el máximo desplazamiento del centro de masa, se necesita calcular su velocidad al momento del despegue, con esta condición ocurre que  $d^2\theta/dt^2 = 0$ , y como:

$$g = 2L \sin \theta \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2 \quad (2.8)$$

<sup>15</sup> Veremos más adelante que este valor se registra con la plataforma de fuerzas.

$$\frac{d\theta}{dt} = \sqrt{\frac{g}{2L \sin \theta}}$$

asi que

$$\vec{v} = 2L \cos \theta \left( \frac{d\theta}{dt} \right) \hat{y} \quad (2.9)$$

sea  $\vec{v} = \vec{V}_o$  la velocidad de despegue, con ello la trayectoria del centro de masa está determinada por las ecuaciones:

$$\begin{aligned} \vec{a} &= -g \hat{y} \\ \vec{v} &= (V_o - gt) \hat{y} \\ \vec{r} &= \left( V_o t - \frac{gt^2}{2} \right) \hat{y} \end{aligned} \quad (2.10)$$

el centro de masa alcanzará la máxima altura cuando  $V_o = 0$ , y con ello  $t = V_o/g$ . La posición ( $h$ ) del centro de masa es

$$\begin{aligned} h &= V_o \left( \frac{V_o}{g} \right) - \frac{g}{2} \left( \frac{V_o}{g} \right)^2 \\ h &= \frac{(V_o)^2}{2g} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Estimar el valor de  $h$  a partir de la ecuación es sencillo si se conoce el valor de  $V_o$ ; en nuestro estudio, este valor no lo conocemos de manera directa.

La prueba de salto vertical que se lleva a cabo en el Laboratorio de Biomecánica de la Subdirección de Investigación y Medicina del Deporte de la UNAM, ocupa una plataforma de fuerzas para registrar la fuerza que el sujeto ejerce sobre el piso. El uso de esta plataforma nos permitirá exponer otro par de métodos para calcular la altura máxima a partir de la información que se tiene disponible.

## 2.2 La plataforma de fuerzas

En la figura 2.4 se ilustran las componentes de la fuerza en una plataforma de fuerzas rectangular, en cada esquina hay transductores de presión para los tres ejes, las señales de esos transductores son:

$$F_i, \quad (2.12)$$

donde el indice  $i$  corresponde a los ejes  $x, y, z$  mientras que el indice  $j = 1, 2, 3, 4$  corresponde a cada una de las esquinas de la plataforma, así se tiene que:

$$F_x = F_{x1} + F_{x2} + F_{x3} + F_{x4} \quad (2.13)$$

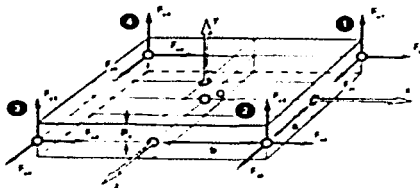


Figura 2.4. Descripción de las componentes en una plataforma de fuerzas comercial.

$$F_y = -(F_{y1} + F_{y2} + F_{y3} + F_{y4}) \quad (2.14)$$

$$F_x = -(F_{x1} + F_{x2} + F_{x3} + F_{x4}) \quad (2.15)$$

y la fuerza resultante total está dada por:

$$\vec{F} = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

existe una convención en la designación de los ejes para el análisis de movimiento con las plataformas de fuerza, tal convención es la siguiente:

$x$  = dirección de movimiento (para paso antero-posterior)

$y$  = dirección vertical

$z$  = dirección perpendicular al movimiento (para paso medio-lateral)

El uso de una plataforma de fuerzas nos provee una herramienta muy útil para el análisis del salto vertical; al estar enlazado por medio de una interfase a una computadora se tiene una base de datos con información de las variables antropométricas del sujeto y de las mediciones realizadas por la plataforma. El Laboratorio de Biomecánica cuenta con una plataforma *AMTI modelo OR6-5-1* que mide de manera simultánea las tres componentes de fuerza a lo largo de un sistema coordenado  $x,y,z$  (cuyo origen se localiza en el centro de la plataforma) y las tres componentes de momento en los ejes; la medición se realiza por medio de celdas de carga en las cuatro esquinas de la plataforma (ver figura 2.5)

### 2.2.1 Calibración de la plataforma antes del salto

El procedimiento para el registro de valores durante el salto vertical se realiza de la siguiente forma:

1. *el individuo se coloca inicialmente sobre la plataforma para registrar su peso en Newtons (cabe señalar que antes de llegar a esta etapa, se midió el peso del sujeto*

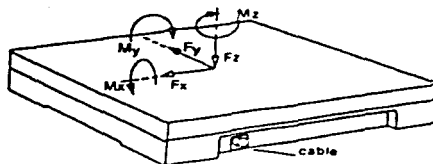


Figura 2.5. Esquema de la plataforma de fuerzas utilizada para el registro de salto vertical.

- con una báscula), es la fuerza aplicada al momento de ascenso y recuperación.*
2. *una vez que se ha tomado el valor, se le indica al sujeto que se retire de la plataforma.*
  3. *el programa ajusta el valor del peso, por lo que ahora se le solicita de nueva cuenta al sujeto que se coloque encima de la plataforma.*
  4. *espera la indicación del médico responsable para efectuar un salto vertical (debido a que el sujeto se ha estado ejercitando durante las otras pruebas, no ha sido necesario considerar un calentamiento previo al salto).*

Entre otros valores que entrega el software *BEDAS-2*, se tienen: el peso del sujeto en Newtons), la componente  $F_z$ ; el valor de altura alcanzada  $h$  que se ocupa en este estudio se obtiene del salto que efectúa el sujeto buscando todo el impulso que incluye la rotación del tronco y los segmentos superiores. Este software lo proporciona el mismo fabricante de las plataformas (AMTI). Además se genera una gráfica en donde se observa el comportamiento de las fuerzas en las tres etapas del salto vertical. En la figura 2.6, se muestran las etapas de un salto vertical.

Una variante del salto se muestra en la figura 2.7, en donde el sujeto inicia su evolución de fase de despegue con las piernas flexionadas, no contribuye con un desplazamiento del *CM* hacia abajo. En la literatura se encuentra que en los análisis de salto vertical, el sujeto coloca las manos sobre la cintura y en la sucesión de etapas de vuelo nunca despega las manos del cuerpo; en otras referencias se ha estudiado la contribución del movimiento de los brazos para la altura alcanzada<sup>16</sup>

### 2.3 Registro de tiempo de vuelo

La información disponible que nos ofrece el software de la plataforma de fuerzas no nos ofrece directamente el valor de la velocidad de despegue ( $E_c$ ), lo que sí nos proporciona es el tiempo de vuelo que se registra. A continuación se presenta

<sup>16</sup> En Felton, M.E. *Upper extremity augmentation of lower extremity kinetics during countermovement vertical jumps.*

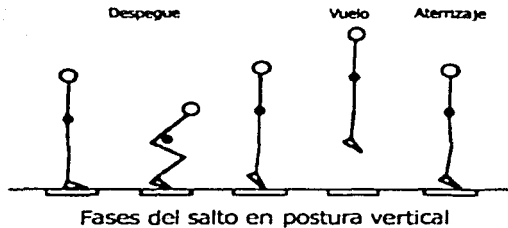


Figura 2.6. Fases durante el salto vertical, la posición inicial del sujeto es una posición erguida. El punto es el CM del sujeto, debajo se encuentra la plataforma de fuerzas.

el desarrollo de la expresión en donde interviene ese valor para calcular la velocidad y por tanto el valor de la altura máxima alcanzada.

Como se mencionó anteriormente, al despreciar la resistencia del aire cuando el sujeto comienza a elevarse en la fase de vuelo, podemos ocupar la siguiente expresión:

$$v_f - v_i = -g(t_f - t_i) \quad (2.17)$$

donde  $v_i$  y  $v_f$  son las velocidades inicial y final respectivamente en los tiempos  $t_i$  y  $t_f$ . La etapa inicial para este análisis corresponde al momento en el que sujeto despegue de la plataforma de fuerzas, mientras que la etapa final es para la fase de aterrizaje. Si suponemos que la altura del CM del sujeto al momento de aterrizar es la misma que cuando despegó, ocurre que

$$v_f = -v_i \quad (2.18)$$

por lo que la velocidad de despegue es

$$v_o = \frac{gt_o}{2} \quad (2.19)$$

donde  $t_o$  es el tiempo de vuelo del salto desde el momento que el sujeto deja de tener contacto con la plataforma, hasta que de nueva cuenta cae sobre ella.

En la figura 2.8 se muestra la gráfica que genera el software una vez que se realiza el salto vertical por el sujeto, en el eje de las abscisas la variable es el tiempo, mientras que para el eje de las ordenadas, se maneja la variable fuerza cuyas dimensiones están en Newtons; se visualizan una serie de curvas debido a que el programa registra (se indica en la letra del inciso la respectiva curva en la gráfica):

- a) si el sujeto se movió en la dirección del eje  $x$ , hacia su derecha o a la izquierda.
- b) si al momento del salto el sujeto se impulso hacia adelante o hacia atrás (dirección del eje  $y$ ).

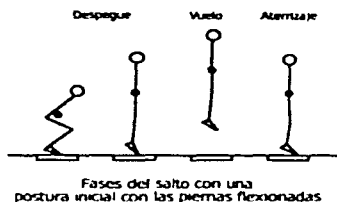


Figura 2.7. Variante del salto vertical en donde el sujeto comienza la fase de vuelo con las piernas flexionadas a diferencia del inicio del salto en la figura anterior.

- c) la fuerza sobre el eje  $z$  perpendicular al plano de la plataforma, y
- d) la torca en el eje  $z$ , que nos indica qué tanto gira los pies el sujeto al momento de despegar y de caer de nuevo sobre la plataforma.

En el ejemplo mostrado en la figura 2.8 el registro del salto se llevó a cabo en 2.01 s, en la siguiente sección se describirá los componentes importantes de la gráfica y de su relación con la pregunta de estudio de esta tesis.

## 2.4 Análisis del salto vertical

Para estimar la altura máxima alcanzada, revisaremos de manera separada la curva c) de la gráfica mostrada en la figura 2.9; debajo de la curva se indican las posiciones del sujeto durante las tres fases del salto vertical, de izquierda a derecha vemos que el sujeto se encuentra en una posición erguida y la plataforma registra el peso del sujeto ( $PS$ ). Al comenzar a desplazarse hacia abajo para tomar impulso, el sujeto desplaza su centro de masa ( $CM$ ) y por tanto lo acelera, por ello la curva se encuentra por debajo de la referencia  $PS = 1$  y la aceleración tiene un signo negativo por convención.

Conforme el sujeto continua desplazándose hacia abajo, hay una reducción en la velocidad del  $CM$  debido a que el sujeto estima que la flexión de sus piernas es suficiente (y por lo tanto su impulso para el salto), esto se refleja en la aceleración de su  $CM$  que ahora se torna positiva. La fuerza que registra la plataforma se incrementa, el  $CM$  se desplaza en dirección del eje positivo de  $F_z$ , en la evolución de la etapa del despegue, la fuerza registrada alcanza un valor máximo en el momento que la posición del  $CM$  es exactamente el mínimo de la trayectoria del  $CM$ , después de esto, comienza a elevarse y mantiene una velocidad positiva, la fuerza comienza a disminuir y tiene un valor 0 en el momento que el sujeto despegue de la plataforma, su velocidad continua incrementándose y es positiva.

Como se puede ver en la figura 2.10, a pesar de que la fuerza registrada es



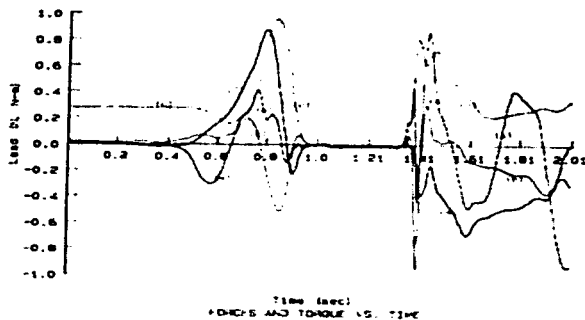


Figura 2.8. Gráfica que genera el software conectado a la plataforma de fuerzas, ver el texto para los detalles.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

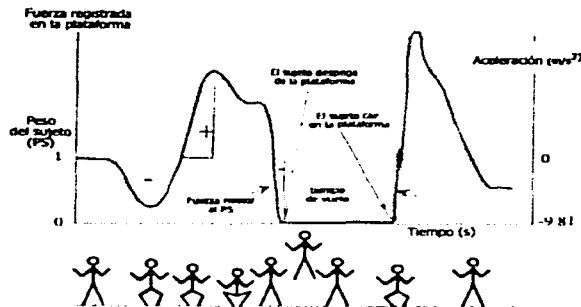


Figura 2.9. Registro de la componente  $F_x$  de la plataforma, se da la referencia con las fases de vuelo del salto vertical.

nula, se mantiene la velocidad el  $CM$  hasta punto donde  $V = 0$  y hay un máximo en la trayectoria parabólica; posteriormente la velocidad tiene una pendiente negativa y el sujeto experimenta una caída libre. El registro de fuerza en la plataforma se da nuevamente al momento que el sujeto hace contacto y maniobra para equilibrarse. Esta descripción engloba el salto vertical, como se comentó anteriormente, en el registro de la fuerza  $F_x$  de la plataforma se incluye el valor del peso del sujeto, por lo que en el análisis posterior se descontará para contemplar sólo el valor de la fuerza desarrollada por las piernas (grupo muscular cuádriceps).

La gráfica de la fuerza en la plataforma puede revisarse a través del teorema de conservación del momento lineal; la integral de una fuerza con respecto al tiempo (*impulso*) produce un cambio en el momento de un cuerpo, es decir:

$$\vec{J} = \int \vec{F} dt = \Delta \vec{p} \quad (2.20)$$

analizando la gráfica de fuerza registrada desde el inicio del movimiento ( $v_i = 0$  al tiempo  $t_i$ ) en la fase de despegue hasta que deja de tener contacto con la plataforma (al tiempo  $t_d$ ), se tiene

$$\int_{t_i}^{t_d} (F_{pl} - mg) dt = mv_d \quad (2.21)$$

el impulso debido a la fuerza resultante en el sujeto puede considerarse como dos impulsos separados:

$$\int_{t_i}^{t_d} F_{pd} dt - \int_{t_i}^{t_d} mg dt = J_{pd} - J_w = mv_{t_d} \quad (2.22)$$

donde  $J_{pd}$  es el impulso debido a la fuerza en la plataforma de fuerzas y  $J_w$  es el impulso debido al peso del sujeto.

Como se puede ver, es posible determinar la altura máxima alcanzada en el salto vertical a partir de dos métodos en los que se considera la velocidad inicial de despegue; éstos no son los únicos, hoy en día es posible encontrar comercialmente equipos de cómputo con interfases para captura de video, siendo ésta una alternativa de análisis biomecánico del salto vertical. Este trabajo contribuye al de estudio sobre un caso específico y los datos que se han obtenido han sido capturados a partir de las condiciones con las que se cuenta en el Laboratorio de Biomecánica de la UNAM<sup>17</sup>. El siguiente paso es determinar si existe o no correlación de los datos de fuerza muscular con la altura máxima alcanzada del salto.

<sup>17</sup> Se puede revisar la tesis de ESPINOSA, Sánchez. *Mastáde. Uso del video en el análisis del movimiento en biomecánica*. Septiembre de 1992, UNAM

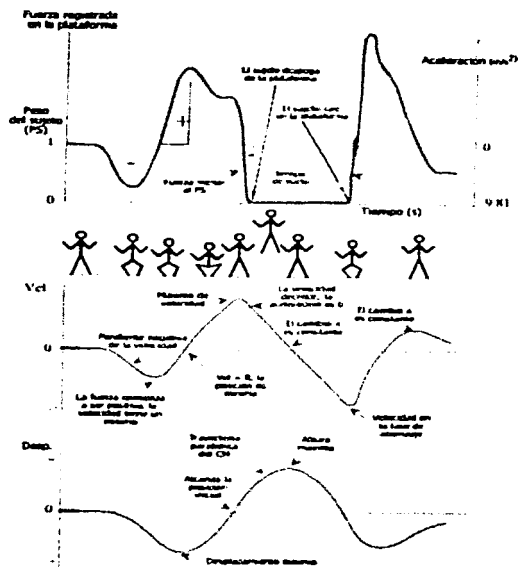


Figura 2.10. Descripción de la velocidad y de la trayectoria del *CM* del sujeto en las etapas de despegue, vuelo y aterrizaje.

## Capítulo 3

# Variables y datos biomecánicos y antropométricos

La UNAM ofrece a la comunidad estudiantil la oportunidad de practicar una actividad física "...La Dirección General de Actividades Deportivas y Recreativas (DGADyR) de la UNAM se encarga de organizar los programas de cultura física, deportiva y recreativa para los universitarios, administra los recintos que se destinan a estas actividades y promueve la formación de los equipos deportivos que representan a la Universidad."<sup>18</sup>, de hecho hay una gran variedad de disciplinas que se realizan dentro del campus universitario (alrededor de 25); el nivel de práctica varía desde aquellos sujetos que mantienen interés en su condición atlética y quienes pueden llegar a tener un nivel de selección representativa de la UNAM (y en la mayoría de los casos, representación nacional).

### 3.1 Pruebas realizadas en laboratorio

Existe en la UNAM, la Subdirección de Investigación y Medicina del Deporte<sup>19</sup> (SIMD) perteneciente a la DGADyR, en donde es posible llevar a cabo un conjunto de evaluaciones que conforman un estudio llamado *Examen morfofuncional*, que está integrado por las pruebas que se indican en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Conjunto de estudios realizados en el *Examen Morfofuncional* en la UNAM.

1. *Historia Clínica (Exploración de aparatos y sistemas)*
2. *Electrocardiograma en reposo*
3. *Espirometría (capacidad pulmonar)*
4. *Exámenes de laboratorio (colesterol, ácido úrico, glucosa y otros)*
5. *Antropometría (composición corporal, proporcionalidad y somatotipo)*
6. *Somatoscopia y plantoscopia (alteraciones de columna, miembro pélvico, pies)*
7. *Ergometría (respuesta cardiovascular, músculo esquelético y capacidad física aeróbica y anaeróbica)*
8. *Biomecánica (valora cualidades físicas, movilidad, fuerza, resistencia).*
9. *Evaluación odontológica*
10. *Evaluación nutricional*
11. *Evaluación psicológica*

<sup>18</sup> Objetivo presentado en la página de Servicios a la comunidad estudiantil [http://www.unam.mx/servicios/dep\\_comun\\_med.htm](http://www.unam.mx/servicios/dep_comun_med.htm)

<sup>19</sup> Que es parte de la Subdirección de Actividades Deportivas y Recreativas (DGADyR) de la UNAM

El examen morfofuncional "es un estudio detallado para valorar el estado de salud, las características morfológicas y las capacidades físicas (fuerza, resistencia, movilidad, rapidez, etc.)"<sup>20</sup> en un sujeto que bien puede ser deportista (la persona que no practica deporte alguno se le denomina sedentario) que se inicia a una rutina de acondicionamiento, un atleta con alto nivel de competencia y en aquellos que están clasificados como de alto rendimiento, es decir son profesionales a los que se le remunera por su participación deportiva. La valoración de un sujeto a través de este conjunto de pruebas, es una excelente referencia para darle un seguimiento a los avances que logre el sujeto, le genera un historial en donde hay la posibilidad de comparar situaciones anteriores si es que ha pasado por alguna cirugía, recuperación, rehabilitación, o sencillamente identificar los puntos débiles de su condición atlética.

### 3.2 Índice dinamométrico

El Laboratorio de Biomécanica<sup>21</sup> de la SIMD se encarga de realizar las siguientes pruebas:

- Índice y perfil dinamométrico.
- Determinación del centro de gravedad.
- Velocidad de reacción.
- Salto vertical y salto longitudinal.
- Flexibilidad articular (manos, hombros, tronco y cadera).
- Pruebas con el sistema Michecev que incluye velocidad de reacción corta y larga.
- Velocidad de repetición y evaluación de potencia anaeróbica por medio de 20 y 40 saltos repetidos con la máxima altura y velocidad de contacto con el piso.

La información que se obtiene, se envía a una base de datos para su posterior análisis e interpretación, los resultados que se presentan en este trabajo se han tomado de esa base. Para simplificar la tarea de revisión, se han dividido los campos de la base de acuerdo a la información que se requiere, es decir, se tiene una división por variables antropométricas y dinamométricas.

Las *variables antropométricas* son aquellos campos que proporcionan información sobre el sujeto, tanto para **identificación** del mismo (número, nombre, folio, fecha, sexo), así como las **características físicas** del sujeto (edad, masa, talla) y por último la información sobre la **disciplina deportiva** que practica (deporte, posición, categoría, horas, antigüedad). Las *variables dinamométricas* son los campos en donde se almacenan los datos de las fuerzas registradas por los dispositivos y aparatos disponibles en el Laboratorio de Biomecánica (plataforma de fuerza, plataforma de velocidad de reacción, plataforma de trote, dinamómetros), las fuerzas que se

<sup>20</sup> De acuerdo a la IXIADYR

<sup>21</sup> El equipo ocupado en las pruebas, fue creado por el Centro de Diseño Industrial de la Facultad de Arquitectura de la UNAM

anotan son: la de mano izquierda, mano derecha, bíceps derecho, bíceps izquierdo, cuádriceps derecho, cuádriceps izquierdo, extensores y extensores de abdomen, todos ellos mediante el uso de los dinamómetros portátiles y los fijos.

Del conjunto de valores registrados, se calcula el índice dinamométrico (UNAM-MAC)<sup>22</sup>, que es un indicador (una razón) de la fuerza en varios grupos musculares y la masa del sujeto definido por la expresión:

$$ID = \frac{\sum \text{máx}(F_g) + F_{ab} + F_{ex}}{mg} \quad (3.1)$$

donde  $\text{máx}(F_g)$  es el valor máximo de fuerza registrado para las manos, ambos grupos bíceps y grupos cuádriceps;  $F_{ab}$  es el valor de fuerza del grupo muscular abductor del abdomen;  $F_{ex}$  corresponde al valor de fuerza del grupo muscular extensor del abdomen. Se considera que si  $ID \geq 20$ , entonces la condición atlética del sujeto es adecuada conforme a las características antropométricas y hábitos deportivos del sujeto (o cualquier otra actividad equivalente que implique trabajo muscular), mientras que para valores por debajo de esta cifra, la persona no cuenta con un nivel adecuado de acondicionamiento atlético.

En la introducción del Capítulo 1, se indica el modelo utilizado para estimar la fuerza muscular del grupo cuádriceps y bíceps, las lecturas obtenidas de los dinamómetros se envián a la base de datos. A continuación se indican los grupos cuyos datos se analizaron.

### 3.3 Los grupos de sujetos observados

Los registros de las pruebas del examen morfofuncional han permitido elaborar una base de datos extensa, permitiendo contar con datos reales de la población mexicana (se examinan tanto a la comunidad universitaria como a la comunidad externa) y con ello la referencia sobre ciertas características antropométricas y biomecánicas de un sujeto no más reales que cuando se recurre a tablas o compendios en donde los sujetos son europeos o norteamericanos<sup>21</sup>. A partir de esta información, se procedió a reclasificarla, ya que parte de los datos provienen de aparatos y su respectivo software entrega un resultado; la otra parte tiene su origen de mediciones directas al sujeto.

Se analizaron tres grupos de individuos con distinta actividad deportiva, cada una con un nivel de entrenamiento también distinto, con el fin de apreciar la importancia de un entrenamiento dirigido hacia un alto rendimiento, por ello se seleccionó a un grupo de individuos *sedentarios*, que son aquéllos que no tienen una costumbre de practica deportiva frecuente; otro grupo lo conforma las personas que practican

<sup>21</sup> En la literatura se encuentran diferentes formas en las que se define el índice dinamométrico, en este trabajo se usará el índice desarrollado por el Dr. Miguel Aguilar Casas (MAC).

<sup>22</sup> El estudio que realizó Zatsiorsky para determinar el centro de masa segmentario del cuerpo humano, se realizó en una población rusa de varones, con edad promedio de 24 años, 73 Kg. de peso y con una talla de 1.741 m.

*acondicionamiento general (AFG)*, que a diferencia de los primeros, la actividad deportiva (caminata, aerobics, pesas, etc.) que practican la realizan con más frecuencia, normalmente bajo la dirección de un entrenador y el objetivo prácticamente es obtener una condición atlética necesaria para mejorar su estado de salud, este nivel de actividad es previo a un entrenamiento de mayor rendimiento; el último grupo corresponde a deportistas de *alto rendimiento* con un desempeño profesional de su actividad, que es el Club Universidad de fútbol soccer (Soccer Pumas).

Comenzaremos a describir el caso de los sujetos *sedentarios*, en donde se realizan pruebas estadísticas por medio del software SPSS ver. 8.0. A continuación (figura 3.1) se muestra un resumen estadístico del grupo de sedentarios (todos varones en este caso) a quienes se les practicaron las pruebas de índice dinamométrico (*ID*), salto vertical, salto longitudinal, velocidad de reacción y centro de masa.

**Análisis Estadístico**

|                        |          | EDAD     | MASA     | TALLA    |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|
| N                      | Válidos  | 78       | 78       | 78       |
|                        | Erróneos | 0        | 0        | 0        |
| Media                  |          | 38.0769  | 74.6060  | 171.0167 |
| Error Est. de la Media |          | 1.3137   | 1.5945   | .8191    |
| Desviación Est.        |          | 11.6025  | 14.0820  | 7.2344   |
| Variancia              |          | 134.8174 | 196.3019 | 52.3370  |
| Sesgo                  |          | -.091    | .558     | .071     |
| Error Est. de Sesgo    |          | .272     | .272     | .272     |
| Kurtosis               |          | -.978    | .261     | .033     |
| Error Est. de Kurtosis |          | .538     | .538     | .538     |
| Rango                  |          | 44.00    | 68.30    | 36.50    |
| Mínimo                 |          | 17.00    | 47.00    | 150.50   |
| Máximo                 |          | 61.00    | 115.30   | 187.00   |
| Percentiles            | 25       | 27.7500  | 64.6500  | 166.0000 |
|                        | 50       | 39.0000  | 72.5000  | 171.0000 |
|                        | 75       | 48.0000  | 82.6000  | 177.0000 |

Figura 3.1 Análisis estadístico de los datos antropométricos del grupo de Sedentarios varones.

La distribución de frecuencias de estas variables se muestran en las siguientes figuras (de 3.2 a 3.4) en donde se presentan el respectivo histograma y la curva normal de distribución; la distribución de las variables sigue una tendencia de distribución normal<sup>24</sup>, con el software SPSS se realizaron pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk)

<sup>24</sup> En la literatura se reporta que la mayoría de las variables biológicas en el hombre tienen una tendencia de distribución normal



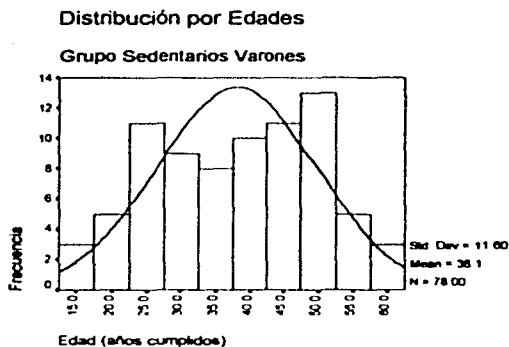


Figura 3.2. Distribución de frecuencias por edad en el grupo de sedentarios.

para corroborar que efectivamente tienen esta tendencia<sup>25</sup>.

En la figura 3.3 se muestra la distribución de masa en los sujetos del grupo de Sedentarios, mientras que en la figura 3.4 se muestra la distribución de la talla de los sujetos en este grupo.

Con los datos correspondientes a la masa y talla del sujeto podremos estimar el valor del *índice de masa corporal (IMC)*, que es un índice de adiposidad y de obesidad, pues se relaciona directamente con el porcentaje de grasa corporal, también es un índice de riesgo de hipo e hipernutrición y, por tanto, de las patologías asociadas a ambas situaciones, especialmente de las enfermedades crónico-degenerativas (enfermedad cardiovascular, diabetes, algunos tipos de cáncer, etc.).

En el capítulo anterior se describió la forma en que se registra la fuerza en una plataforma de fuerzas y de la forma en que el software de dicha plataforma estima el valor de la altura alcanzada a partir del tiempo de la fase de vuelo del salto vertical. En esta sección se manejarán las variables antropométricas y biomecánicas para determinar la posible correlación entre la fuerza muscular del grupo cuádriceps (la componente vertical de la fuerza registrada en la plataforma  $F_v$ ) y la máxima altura alcanzada por el sujeto ( $h$ ).

Hay deportes en los que el hombre se da cuenta de que vive inmerso dentro de un campo gravitacional ejercido por la masa de la Tierra: el salto largo, el salto con

<sup>25</sup> Ver Anexo A

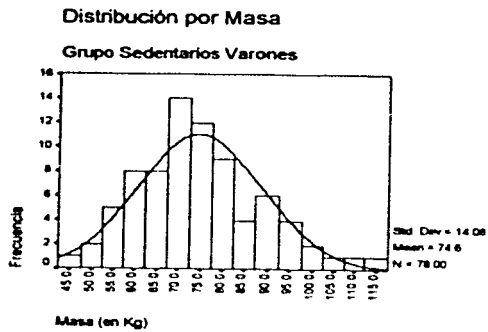


Figura 3.3. Distribución de masa de los sujetos en el grupo de sedentarios.

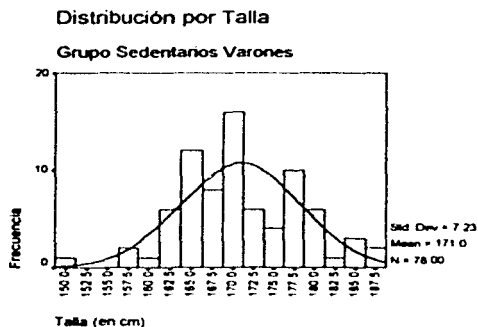


Figura 3.4. Distribución de la talla (estatura) en el grupo de sedentarios.

garrocha son claros ejemplos de las limitaciones (para alcanzar una mayor distancia y altura respectivamente) que nos imponen las leyes de la física con las que vivimos a diario. El salto vertical no es la excepción, una de las variables antropométricas que tiene una importante contribución para que el sujeto alcance una altura máxima en el salto vertical: la masa del sujeto.

En la figura 3.5 se muestra una gráfica de dispersión entre las variables de altura máxima alcanzada y la masa del sujeto, se presenta la distribución de estas variables; un sujeto con mayor masa corporal no podrá desplazar una distancia mayor su *CM*.

Al realizar la estadística de correlación lineal entre estas variables, el valor obtenido del coeficiente de correlación de Pearson nos dice que tal correlación es positiva pero no significativa ( $r^2 = 0.0429$ ), este valor nos indica que no existe una relación entre estas variables. Al cambiar la variable de fuerza muscular registrada en la plataforma<sup>26</sup> y graficarlo contra la distancia, observamos la distribución que se muestra en la figura 3.6 (nuevamente una gráfica de dispersión) observamos que se encuentra una región en donde se localizan buena parte de los registros, y además se observa que a mayor fuerza, no necesariamente la altura que se alcanza es mayor, esto lo revisaremos cuando lo comparemos con el caso de sujetos que practican un deporte de manera controlada y con asesoría profesional.

<sup>26</sup> Se le ha restando el valor del peso del sujeto, de tal forma que el registro corresponde sólo a la fuerza ejercida por las piernas del sujeto

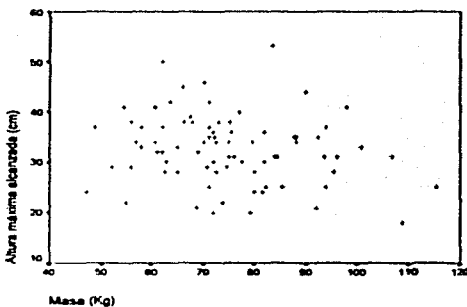


Figura 3.5. Relación entre la altura máxima alcanzada y masa en sujetos sedentarios.

### 3.3.1 Interpretación de los resultados de las correlaciones.

El estimador que nos puede dar una idea inmediata de las condiciones atléticas del grupo es el índice dinamométrico (*ID*) (ver la sección 3.2), para este grupo tenemos que el *ID* tiene un promedio de 13.37; la distribución del índice con respecto a la edad se observa en la figura 3.7, conforme la edad del sujeto avanza, el valor del *ID* disminuye para este grupo; las propiedades de elasticidad muscular se van perdiendo y se refleja en los valores registrados de fuerza para los distintos grupos musculares. La valor de correlación entre fuerza muscular y altura alcanzada en el salto se puede asociar a las propiedades mecánicas del músculo; se presentó en el Capítulo 2 un modelo biomecánico ideal del cuerpo humano, sólo que ahora el modelo real tiene un comportamiento distinto al que se esperaba. El tejido muscular posee propiedades viscoelásticas que lo hacen diferente de un tejido elástico, esta propiedad modifica completamente en una escala mayor a la fuerza resultante. Las ecuaciones de movimiento de un segmento con componentes elásticos (de Hooke) con componentes viscosos (de Newton) y su arreglo ya sea en serie o en paralelo, determina el comportamiento del segmento al momento que se activa el grupo muscular asociado.

Una de las ventajas en el análisis estadístico de los programas comerciales, es el poder usar algoritmos poderosos para inferir posibles relaciones entre varias variables, SPSS ocupa un algoritmo de regresión para generar una superficie entre las tres variables, de esta forma es más fácil la interpretación de los resultados obtenidos en la figura 3.1.

Se comentó anteriormente que no hay relación entre las variables altura alcanzada, fuerza muscular (figura 3.6) y las variables altura alcanzada con peso (figura

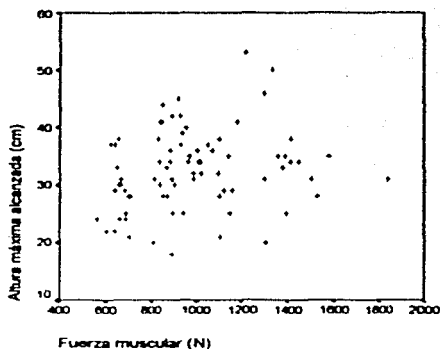


Figura 3.6. Relación entre la altura máxima alcanzada y la fuerza muscular en los sujetos sedentarios.

3.5); lo importante que podemos comentar de la figura 3.8 es la inferencia de condiciones antropométricas y biomecánicas necesarias en un sujeto para lograr un valor de altura máxima mayor. La superficie mostrada integra a tres variables, dos de ellas (peso del sujeto y fuerza muscular) podemos suponer que son variables que tanto los entrenadores como el sujeto mismo, son capaces de controlar mediante una dieta balanceada y una rutina de ejercicios bajo la observación de un entrenador, el promedio del índice de masa corporal (*IMC*)<sup>27</sup> del grupo sedentarios es de 25.47 (las personas de este grupo padecen de sobrepeso), junto con el hecho de que el bajo índice dinamométrico de 13.37, se traduce en una condición atlética muy baja y representa un riesgo elevado a la salud del sujeto si se somete a rutinas de trabajo sin la observación y control de un médico y de un entrenador calificado.

Tabla 3.2. Valores y clasificación de IMC de acuerdo con la OMS, 1995.

| IMC         | Clasificación de la OMS | Descripción popular |
|-------------|-------------------------|---------------------|
| < 18.5      | Bajo peso               | Delgado             |
| 18.5 – 24.9 | Adecuado                | Aceptable           |
| 25 – 29.9   | Sobrepeso               | Sobrepeso           |
| 30 – 34.9   | Obesidad grado 1        | Obesidad            |
| 35 – 39.9   | Obesidad grado 2        | Obesidad            |
| > 40        | Obesidad grado 3        | Obesidad mórbida    |

El comportamiento de estas variables impacta directamente en el valor de la

<sup>27</sup> es la razón entre el peso del sujeto (Kg) y el cuadrado de su estatura (m<sup>2</sup>)

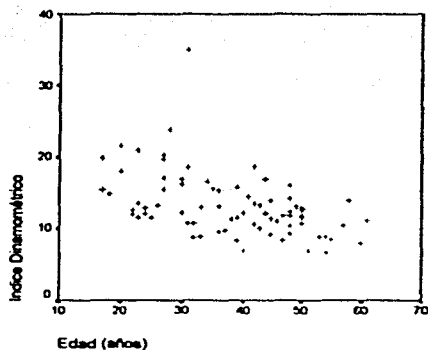


Figura 3.7. Relación entre el valor de  $ID$  y la edad para el grupo de varones Sedentarios.

altura alcanzada, por ello al interesarse en la práctica de una disciplina deportiva y procurar una alimentación controlada y balanceada, cambiarían de grupo de observación y entrarían al de los deportistas en acondicionamiento físico general.

El mismo análisis estadístico se realizó a los otros dos grupos: Acondicionamiento y Soccer Pumas, para hacer una comparación entre los tres grupos, en la siguiente sección se resumen los resultados estadísticos.

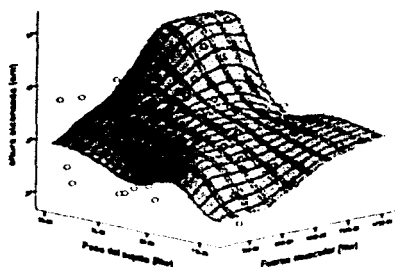


Figura 3.8. Superficie generada por medio de regresión líneas entre las tres variables para el grupo de Sedentarios

### 3.4 Comparación estadística de variables antropométricas y biomecánicas en tres grupos de individuos con diferente nivel de actividad deportiva.

Se realizó un análisis estadístico a los grupos de sujetos de Acondicionamiento y Soccer Pumas, de las características antropométricas y biomecánicas que se comparan con los obtenidos en la sección 3.3, los resultados se muestran en la figura 3.9 en donde se reporta un resumen por deporte de las variables antropométricas (edad, peso y talla).

La información que se presenta en la figura anterior, puede apreciarse de mejor forma al graficarse y poder comparar la mediana de los tres grupos, para ello se recurre a una gráfica de caja para cada una de las variables antropométricas.

Las características de este tipo de gráfica nos permite apreciar el valor de la mediana de la variable por cada grupo, representado por la línea central de la caja, la altura de la caja corresponde a la amplitud intercuartil, en ella está representado el 50% de la muestra, el borde superior de la caja es el percentil 75 y el borde inferior es el percentil 25. Como se puede ver de la figura 3.10, el grupo más homogéneo y con el menor valor de mediana es el de Soccer Pumas, entendiéndose que al ser una actividad de alto desempeño, existe un mejor control en cuanto a la selección de los jugadores y de la edad con mejor etapa de rendimiento atlético, es decir, en donde pueden ofrecer un mejor desempeño. En los otros dos grupos, la mediana para la edad es semejante así como el rango de valores.



Estadística por Deporte

| Deporte               | EDAD           | MASA   | TALLA  |
|-----------------------|----------------|--------|--------|
| Acondicionamiento     | N              | 72     | 72     |
|                       | Media          | 35.51  | 74.09  |
|                       | Máximo         | 67.00  | 116.00 |
|                       | Mínimo         | 18.00  | 53.00  |
|                       | Rango          | 49.00  | 63.00  |
|                       | Desviación Est | 11.59  | 13.17  |
|                       | Variancia      | 134.31 | 173.39 |
| Soccer Pumas          | N              | 70     | 70     |
|                       | Media          | 22.14  | 69.51  |
|                       | Máximo         | 41.00  | 88.00  |
|                       | Mínimo         | 16.00  | 53.70  |
|                       | Rango          | 25.00  | 34.30  |
|                       | Desviación Est | 4.70   | 7.44   |
|                       | Variancia      | 22.07  | 55.43  |
| Sedentarios           | N              | 78     | 78     |
|                       | Media          | 38.06  | 74.61  |
|                       | Máximo         | 61.00  | 115.30 |
|                       | Mínimo         | 17.00  | 47.00  |
|                       | Rango          | 44.00  | 68.30  |
|                       | Desviación Est | 11.60  | 14.08  |
|                       | Variancia      | 134.62 | 198.30 |
| Total de los 3 Grupos | N              | 220    | 220    |
|                       | Media          | 32.17  | 72.82  |
|                       | Máximo         | 67.00  | 116.00 |
|                       | Mínimo         | 16.00  | 47.00  |
|                       | Rango          | 51.00  | 69.00  |
|                       | Desviación Est | 12.09  | 12.19  |
|                       | Variancia      | 146.07 | 148.56 |
| Kurtosis              | N              | 72     | 72     |
|                       | Media          | 35.51  | 74.09  |
|                       | Máximo         | 67.00  | 116.00 |
|                       | Mínimo         | 18.00  | 53.00  |
|                       | Rango          | 49.00  | 63.00  |
|                       | Desviación Est | 11.59  | 13.17  |
|                       | Variancia      | 134.31 | 173.39 |
| Kurtosis              | N              | 70     | 70     |
|                       | Media          | 22.14  | 69.51  |
|                       | Máximo         | 41.00  | 88.00  |
|                       | Mínimo         | 16.00  | 53.70  |
|                       | Rango          | 25.00  | 34.30  |
|                       | Desviación Est | 4.70   | 7.44   |
|                       | Variancia      | 22.07  | 55.43  |
| Kurtosis              | N              | 78     | 78     |
|                       | Media          | 38.06  | 74.61  |
|                       | Máximo         | 61.00  | 115.30 |
|                       | Mínimo         | 17.00  | 47.00  |
|                       | Rango          | 44.00  | 68.30  |
|                       | Desviación Est | 11.60  | 14.08  |
|                       | Variancia      | 134.62 | 198.30 |
| Kurtosis              | N              | 220    | 220    |
|                       | Media          | 32.17  | 72.82  |
|                       | Máximo         | 67.00  | 116.00 |
|                       | Mínimo         | 16.00  | 47.00  |
|                       | Rango          | 51.00  | 69.00  |
|                       | Desviación Est | 12.09  | 12.19  |
|                       | Variancia      | 146.07 | 148.56 |
| Kurtosis              | N              | 72     | 72     |
|                       | Media          | 35.51  | 74.09  |
|                       | Máximo         | 67.00  | 116.00 |
|                       | Mínimo         | 18.00  | 53.00  |
|                       | Rango          | 49.00  | 63.00  |
|                       | Desviación Est | 11.59  | 13.17  |
|                       | Variancia      | 134.31 | 173.39 |
| Kurtosis              | N              | 70     | 70     |
|                       | Media          | 22.14  | 69.51  |
|                       | Máximo         | 41.00  | 88.00  |
|                       | Mínimo         | 16.00  | 53.70  |
|                       | Rango          | 25.00  | 34.30  |
|                       | Desviación Est | 4.70   | 7.44   |
|                       | Variancia      | 22.07  | 55.43  |
| Kurtosis              | N              | 78     | 78     |
|                       | Media          | 38.06  | 74.61  |
|                       | Máximo         | 61.00  | 115.30 |
|                       | Mínimo         | 17.00  | 47.00  |
|                       | Rango          | 44.00  | 68.30  |
|                       | Desviación Est | 11.60  | 14.08  |
|                       | Variancia      | 134.62 | 198.30 |
| Kurtosis              | N              | 220    | 220    |
|                       | Media          | 32.17  | 72.82  |
|                       | Máximo         | 67.00  | 116.00 |
|                       | Mínimo         | 16.00  | 47.00  |
|                       | Rango          | 51.00  | 69.00  |
|                       | Desviación Est | 12.09  | 12.19  |
|                       | Variancia      | 146.07 | 148.56 |
| Kurtosis              | N              | 72     | 72     |
|                       | Media          | 35.51  | 74.09  |
|                       | Máximo         | 67.00  | 116.00 |
|                       | Mínimo         | 18.00  | 53.00  |
|                       | Rango          | 49.00  | 63.00  |
|                       | Desviación Est | 11.59  | 13.17  |
|                       | Variancia      | 134.31 | 173.39 |
| Kurtosis              | N              | 70     | 70     |
|                       | Media          | 22.14  | 69.51  |
|                       | Máximo         | 41.00  | 88.00  |
|                       | Mínimo         | 16.00  | 53.70  |
|                       | Rango          | 25.00  | 34.30  |
|                       | Desviación Est | 4.70   | 7.44   |
|                       | Variancia      | 22.07  | 55.43  |
| Kurtosis              | N              | 78     | 78     |
|                       | Media          | 38.06  | 74.61  |
|                       | Máximo         | 61.00  | 115.30 |
|                       | Mínimo         | 17.00  | 47.00  |
|                       | Rango          | 44.00  | 68.30  |
|                       | Desviación Est | 11.60  | 14.08  |
|                       | Variancia      | 134.62 | 198.30 |
| Kurtosis              | N              | 220    | 220    |
|                       | Media          | 32.17  | 72.82  |
|                       | Máximo         | 67.00  | 116.00 |
|                       | Mínimo         | 16.00  | 47.00  |
|                       | Rango          | 51.00  | 69.00  |
|                       | Desviación Est | 12.09  | 12.19  |
|                       | Variancia      | 146.07 | 148.56 |

Figura 3.9. Comparación de variables antropométricas de los 3 grupos con distinto nivel de actividad deportiva.



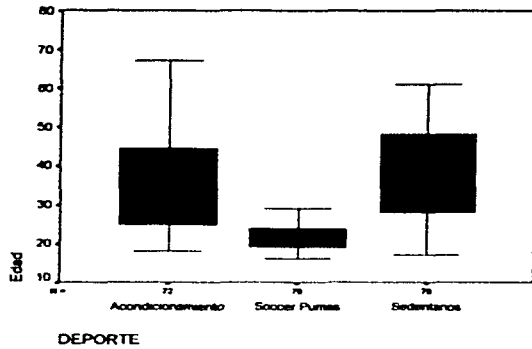


Figura 3.10. Gráfica de caja en donde se comparan las medianas de edad para los grupos con distinto nivel de actividad deportiva.

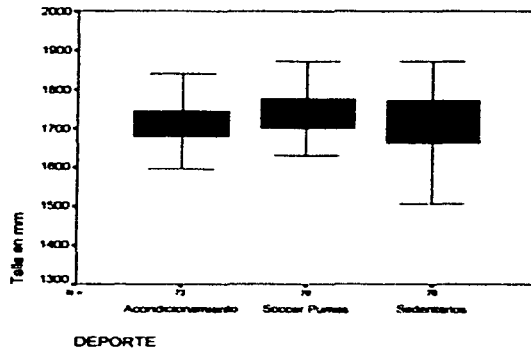


Figura 3.11. Comparación entre promedios de estatura de los deportistas de los tres grupos.

En la figura 3.11 se observa que la mediana de estatura es muy similar en los tres grupos, esto nos da una referencia sobre las características somáticas de un individuo mexicano, a pesar de aplicarse de distinta forma un su actividad, estadísticamente tiene una relevancia que tenga una talla parecida; en esta comparación se asoma la expectativa de que a pesar de contar con dos individuos antropométricamente semejantes, no necesariamente desde el punto de vista biomecánico tendrán semejanza, ello se apreciará con las comparaciones de las variables biomecánicas.

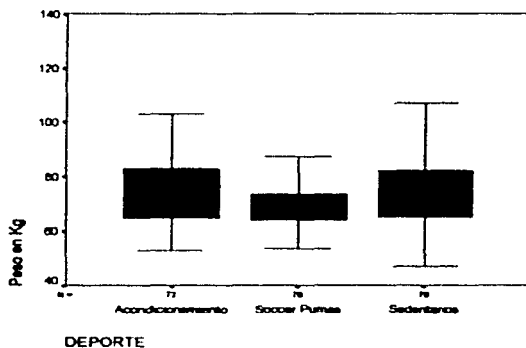


Figura 3.12. Comparación de la variable peso en los tres grupos. El menor rango corresponde a los jugadores de soccer.

A partir de revisar la figura 3.12, en donde se muestra la comparación de peso entre los tres grupos, se confirma que el valor menor de rango de los tres grupos se localiza en Soccer Pumas, en donde hay un mayor control en entrenamiento, dietas, ejercicios. El análisis biomecánico determinará cuál de los tres grupos es el *mejor acondicionado atléticamente*, para el desempeño de su actividad en donde intervienen los grupos musculares a los que se le propone un modelo biomecánico; tal análisis hace referencia sobre las variables *índice dinamométrico*, *fuerza muscular de cuádriceps* y *fuerza muscular al momento del despegue en el salto*.

*Fuerza muscular de cuádriceps*, es el valor registrado en el dinamómetro para el grupo muscular de cuádriceps tanto de la pierna izquierda como derecha, ya que el salto vertical se realiza con las dos piernas, este valor de fuerza se calcula a partir del modelo de palanca; *fuerza muscular al momento del despegue en el salto* es el valor neto de fuerza muscular que el individuo genera al momento del despegue y que se registra mediante la plataforma de fuerzas, restando el peso del individuo.

Estadística de variables biomecánicas por Deporte

| Deporte           |                 | Índice<br>dinamométrico | Fuerza<br>muscular<br>cuadriceps | Fuerza en<br>la<br>plataforma | BMC   | Altura<br>alcanzada |
|-------------------|-----------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-------|---------------------|
| Acondicionamiento | N               | 72                      | 72                               | 72                            | 72    | 72                  |
|                   | Media           | 14.78                   | 814.49                           | 1077.95                       | 25.51 | 33.46               |
|                   | Rango           | 25.96                   | 1759.25                          | 1153.01                       | 18.77 | 42                  |
|                   | Desviación Est. | 4.89                    | 363.76                           | 223.91                        | 4.01  | 8.05                |
| Soccer Pumas      | N               | 70                      | 70                               | 70                            | 70    | 70                  |
|                   | Media           | 18.38                   | 967.91                           | 1135.81                       | 22.97 | 44.61               |
|                   | Rango           | 15.14                   | 1115.00                          | 1609.85                       | 6.87  | 29                  |
|                   | Desviación Est. | 3.22                    | 234.05                           | 284.63                        | 1.75  | 6.97                |
| Sedentarios       | N               | 78                      | 78                               | 78                            | 78    | 78                  |
|                   | Media           | 13.37                   | 718.82                           | 982.09                        | 25.48 | 32.56               |
|                   | Rango           | 28.35                   | 1241.75                          | 1281.51                       | 17.95 | 35                  |
|                   | Desviación Est. | 4.40                    | 237.44                           | 276.18                        | 4.25  | 6.96                |
| Total             | N               | 220                     | 220                              | 220                           | 220   | 220                 |
|                   | Media           | 15.43                   | 829.39                           | 1062.37                       | 24.69 | 36.69               |
|                   | Rango           | 28.44                   | 1759.25                          | 1740.34                       | 20.57 | 46                  |
|                   | Desviación Est. | 4.72                    | 300.90                           | 269.62                        | 3.73  | 9.10                |

Figura 3.13. Comparación de variables biomecánicas de los tres grupos con diferente nivel de actividad deportiva.

La figura 3.13 nos muestra los resultados del estudio estadístico para las variables biomecánicas.

Se puede apreciar que aquel grupo con una dirección de entrenamiento y acondicionamiento atlético, los resultados biomecánicos favorecen un mejor desempeño de una actividad deportiva (en este caso al grupo de Soccer Pumas). Un buen desempeño deportivo se evalúa cuando el sujeto mejora sus registros de tiempo en carreras cortas, altura alcanzada en los saltos, distancias recorridas, tiempos de reacción; de esta forma un entrenador deportivo cuenta con información del rendimiento del deportista, puede precisar una rutina de ejercicios específicos para mejorar una prueba.

En la figura 3.14 se observa la comparación de un parámetro ya no tan recurrido que es el *Índice de masa corporal*<sup>28</sup>, el valor más bajo es para Soccer Pumas, y si a eso lo comparamos contra la máxima altura alcanzada en los tres grupos 3.15 la diferencia es considerable aún en relación con la mediana alcanzada por cada grupo en promedio.

De la figura 3.15, resulta claro identificar que la altura máxima alcanzada en un salto vertical empíricamente coincide con la relación a mayor fuerza, mayor altura, desde el punto de vista físico, esta aseveración no es tan directa. La intención de un estudio como el presente es abrir una línea de investigación permanente para trabajar con mayor profundidad y requerimientos técnicos esta prueba biomecánica y otras más

<sup>28</sup> También conocido como el índice Quetelet.

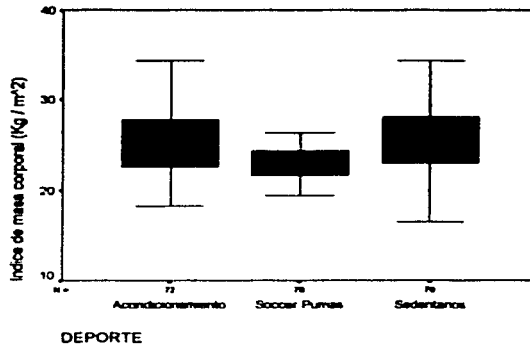


Figura 3.14. Comparación de los promedios por grupo de Índice de masa corporal.

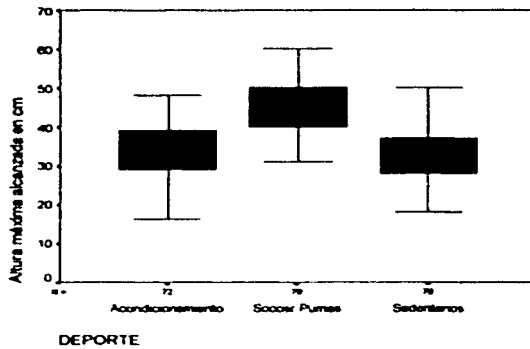


Figura 3.15. Comparación de la mediana en el registro de altura máxima alcanzada en el salto vertical, el valor se obtiene a partir del software con el que opera la plataforma de fuerzas.

que forman parte de la batería de exámenes que se realizan en el la Subdirección de Investigación y Medicina del Deporte.

## Capítulo 4

### Discusión de los resultados

El conjuntar una serie de registros en la prueba de salto vertical nos permite obtener una base de datos extensa, el interés en esos datos es darles una interpretación física y además inferir en las tendencias de las variables. La primera interpretación ha quedado cubierta con la descripción de estructura y función del músculo esquelético, determinando el porqué un sujeto puede desarrollar una fuerza muscular; el aspecto del control de la aplicación entra más al terreno de la fisiología del sistema nervioso y de la teoría de control, pero cada sujeto es autónomo para realizar la prueba dinámica. La inferencia de las tendencias se revisó en el capítulo anterior, nos queda por tanto conjuntar estas dos interpretaciones y relacionarlas con el objetivo de trabajo de esta tesis: la relación entre la fuerza muscular del grupo cuádriceps y la altura alcanzada en el salto vertical.

#### 4.1 Las variables dinamométricas

Como ya se describió en los capítulos anteriores, la fuerza muscular del grupo cuádriceps antes de realizar el salto corresponde a la fuerza máxima registrada por medio de los dinamómetros, en la fase de despegue la fuerza de cuádriceps corresponde ahora a la fuerza máxima registrada por la plataforma; por lo que debería de existir una relación entre estas dos variables, debido a que durante la medición de la fuerza con el dinamómetro el grupo muscular cuádriceps se activa y con el juego de poleas del aparato, se accionan los resortes del dinamómetro, esto es, tenemos un ejemplo inmediato de la tercera ley de Newton; cuando el sujeto realiza el salto vertical, también requiere de la fuerza muscular para desplazar su *CM* y vencer temporalmente la atracción gravitacional. Resulta que se ha medido una fuerza muscular con dos métodos distintos, que teóricamente deben de ser iguales. En la gráfica 4.1 se muestra la distribución de los valores para éstas variables, se encuentra que la distribución de la mayoría de los datos está localizada en una región uniforme; el caso ideal correspondería a una distribución de valores sobre una recta con pendiente de  $45^\circ$ . Existe una variabilidad en los datos puede interpretarse a partir del coeficiente de correlación con valor de 0.0491 para un modelo lineal, este valor nos dice que a pesar de ser positiva la relación entre las variables, no es posible darle una correlación entre ambas variables.

Las líneas en la figura 4.1 indican un ajuste lineal, en donde la línea central corresponde a la mejor recta ajustada, y las líneas extremas son líneas de regresión predictivas que establecen un intervalo de confianza para la línea de regresión central.

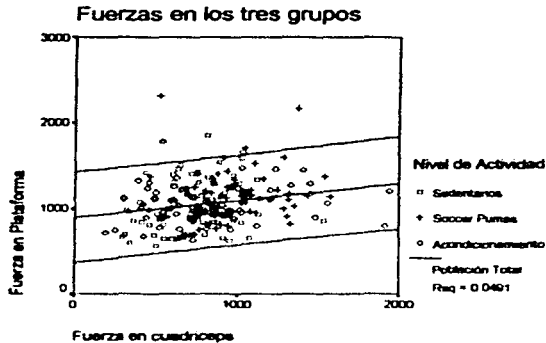


Figura 4.1. Gráfica de dispersión para los valores de fuerza en cuadriceps y en la plataforma de fuerzas, en los tres grupos observados.

## 4.2 Los valores de fuerza muscular

El registro de la fuerza con el dinamómetro (ver fig. 4.2) presenta las siguientes características:

- a) la fuerza del grupo muscular cuadriceps corresponde a la suma de la fuerza en ambas piernas y se mide con el dinamómetro ( $F_m = F_{CI} + F_{CD}$ ),
- b) la fuerza se genera en un tiempo corto y
- c) el desplazamiento de la pierna es de manera pendular y no se soporta el peso del sujeto.

Las características del registro de la fuerza con la plataforma son:

- i) la máxima fuerza muscular registrada por la plataforma, corresponde al momento en el que el sujeto ha desplazado su *CM* a la posición más baja (ver figura 4.3), al comenzar a elevarse para terminar la fase de despegue, esta fuerza comienza a disminuir hasta llegar a un valor cero cuando deja de tener contacto con la plataforma.
- ii) el peso total que debe de desplazar el sujeto es el peso de sus piernas y el del resto de su cuerpo, y
- iii) en el análisis se le resta la contribución del peso para considerar sólo la fuerza muscular de ambas piernas.

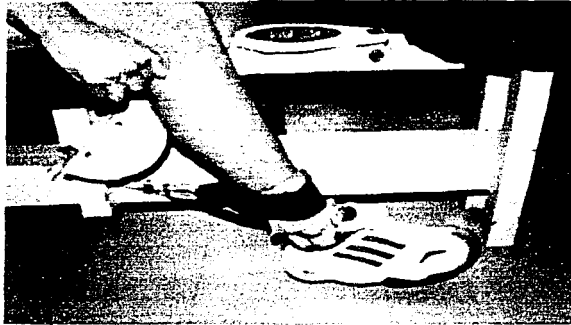


Figura 4.2. Disposición del sistema de poleas y banda para registrar con el dinamómetro la fuerza muscular de la pierna derecha, el procedimiento es el mismo para la otra pierna.

La diferencia entre los valores entre las variables que se muestran en la figura 4.1 puede deberse a los siguientes factores (tomando en cuenta las características de registro de la fuerza tanto para con el dinamómetro como con la plataforma):

1. *Durante el registro con el dinamómetro el movimiento en cada pierna se realiza de manera pendular.*
2. *Con el dinamómetro se mantiene el esfuerzo (extensión de la pierna) durante un lapso de tiempo para poder hacer la lectura sobre la escala del dinamómetro.*
3. *El número de músculos que se activan es menor al mantener una postura sentada durante el registro, esto reduce también el número de músculos antagonistas al momento de realizar la extensión en cada pierna.*
4. *El juego de poleas y cables no son ideales, cada uno de ellos contribuye con fricción e inercia durante el "arranque" del movimiento para el registro de la fuerza muscular.*
5. *Con la plataforma de fuerzas, el sujeto al encontrarse en posición de pie, requiere activar más grupos musculares, cuya fuerza resultante es la suma de la fuerza de los músculos que se activan y de la fuerza de los músculo que se oponen al movimiento del salto.*
6. *El registro de la componente de fuerza  $F_x$  es la resultante de las componentes de fuerza muscular en las direcciones  $xyz$ , este valor resultante es un valor indirecto de la fuerza muscular del grupo cuádriceps.*

En la figura 4.4 se compara la fuerza registrada en la plataforma con el valor



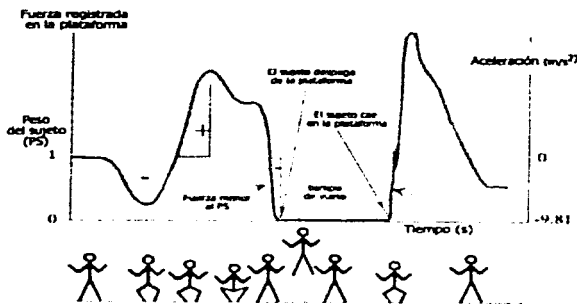


Figura 4.3. Evolución del salto vertical y el registro de la fuerza.

de la altura máxima alcanzada, para la figura 4.4(a), se grafica fuerza muscular contra tiempo y los puntos marcados son los siguientes:

a) la posición inicial del sujeto antes de comenzar la evolución de la etapa de despegue.

e) el sujeto desplazó su *CM* a la posición más baja y está elevándose, este punto corresponde al posición inicial del *CM* (inciso a).

f) termina la etapa de despegue y comienza la etapa de vuelo, el valor de la fuerza es cero y ya no hay contacto con la plataforma.

g) se continúa en la etapa de vuelo.

h) se inicia la etapa de aterrizaje, por ello hay un pico en el valor de la fuerza, el valor promedio de esta fuerza es de 2 veces el peso del sujeto.

En la figura 4.4(b), se observa cómo cambia de posición el *CM* del sujeto conforme la fuerza muscular varía; cabe aclarar que en la gráfica, el valor de desplazamiento del *CM* es mayor ya que aunque el valor de la fuerza tiende a cero, sigue habiendo un desplazamiento en la etapa de vuelo.

Con esta descripción de la variable fuerza muscular registrada con la plataforma de fuerzas, podemos asegurar que nuestra suposición de que la fuerza muscular dinamométrica y la fuerza muscular en plataforma son muy semejantes (la igualdad se daría en el caso ideal), por lo que nos da una buena aproximación para comprender el problema del salto vertical. La dinámica del salto vertical implica una coordinación neuromuscular más elaborada que la actividad de extensión de la pierna para el registro de la fuerza muscular, el valor que proporciona la plataforma de fuerzas conviene

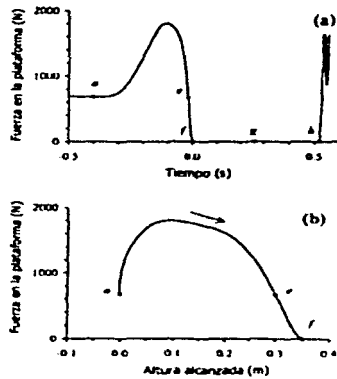


Figura 4.4. Descripción de la fuerza muscular registrada con la plataforma y la posición del *CM* durante la fase de despegue en el salto vertical.

manejarlo por separado debido a que ese valor es el más representativo, es decir, el conjunto de actividades que un sujeto realiza en su vida diaria (caminando a un paso normal, el *CM* mantiene una posición estable, mientras que si corremos, la posición del *CM* presenta oscilaciones) involucra una aplicación inmediata en las actividades deportivas que en la Universidad se practican, ya sea como actividades con niveles de acondicionamiento atlético así como de niveles de competencia elevados.

## Capítulo 5

### Conclusiones

El objetivo central de este trabajo de tesis es el de determinar la posible relación entre dos variables: fuerza muscular en grupo cuádriceps y la altura alcanzada en un salto vertical. Los resultados con las pruebas estadísticas (Capítulo 3) nos dicen que existe una relación, pero ésta no es significativamente estadística (el coeficiente de correlación  $r^2 = 0.0429$ ), es decir, no se cuenta con los elementos necesarios para asegurar que exista una función de correspondencia entre las variables -del tipo  $F(x)$ - . En la literatura especializada no se reporta este resultado, la línea de trabajo se centra más en la descripción detallada de los componentes del modelo biomecánico más complejos, tanto para salto vertical como para salto largo. Las contribuciones que genera este trabajo de tesis son las siguientes:

1. *Contar con una base de datos con variables antropométricas y biomecánicas de un sector de la población mexicana; se comentó que existen datos de valores para otro tipo de población, y las características del biotipo son distintas, ya que se seleccionan en la mayoría de los casos a sujetos con entrenamiento atlético del alto rendimiento y no tanto para la población en general.*
2. *Se establece una línea de trabajo bastante amplia para continuar con las investigaciones en biomecánica deportiva. Es cierto que se ha trabajado con una serie de limitaciones técnicas para el registro de datos y la descripción física del fenómeno se ve limitada. Hoy en día el uso de equipos de video y de programas de edición, favorece el estudio de la biomecánica; el uso de la dinámica inversa resuelve en gran medida el análisis de movimiento. Se llama dinámica inversa al proceso de hallar las soluciones de las ecuaciones de movimiento para un sistema de varios cuerpos, dada la configuración de los objetos y de cómo se comportan con respecto al tiempo, encontrando las fuerzas que actúan sobre esos objetos a través de las trayectorias que describen.*
3. *Con el análisis estadístico realizado a las variables tanto antropométricas como biomecánicas, se encuentra que éstas últimas tienen una distribución normal, este resultado tampoco se encuentra reportado en la literatura especializada. En el Apéndice A, se muestra por ejemplo, que en el caso de la variable de altura alcanzada en el salto, la distribución de los valores para los tres grupos con distinto nivel de actividad atlética es una distribución normal.*
4. *El resultado principal de este trabajo está determinado por la solución al planteamiento inicial: ¿existe una correlación entre la fuerza muscular y la altura alcanzada en el salto vertical?. Ya se ha expuesto que no existe esa posible correlación entre las variables, debida en parte a las propiedades del músculo esquelético, tal como la viscoelasticidad que sería un argumento desde el punto de vista de la física. El músculo se comporta tanto como un resorte mecánico, que almacena la energía*

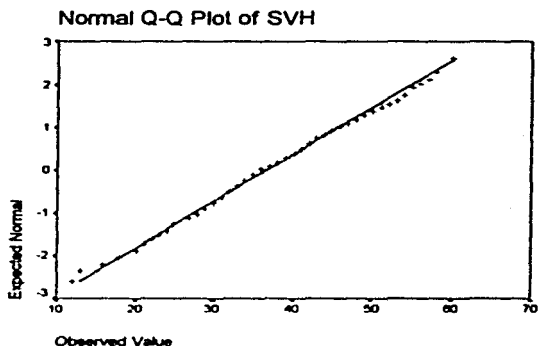


Figura 5.1. Gráfica de la distribución de los valores de altura alcanzada, se usó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk.

*de la contracción muscular para responder a la acción del salto y también actúa como un pistón, en donde el émbolo que se encuentra inmerso en medio viscoso cambia de posición conforme pasa el tiempo. La combinación de estos elementos se aproxima a un modelo más cercano al músculo, por lo que dentro de la línea de trabajo que se abre con esta tesis, será necesario que el músculo sea considerado como el arreglo de tales elementos.*

5. *Existe una variable no física sino antropométrica que afecta los resultados de fuerza muscular y altura alcanzada, esta variable tiene que ver con la "flexibilidad" del sujeto. Entendiendo por flexibilidad siguientes características: a) de biotipo: un sujeto que desarrolle una fuerza muscular mayor que otro, no necesariamente alcanza una mayor altura, si su peso es mayor (ver figura 3.8). b) de coordinación neuromuscular<sup>29</sup>: esta característica al ser individual, varía de un individuo a otro, sobre la forma en que procesa la información y resuelve para alcanzar la mayor altura en el salto; los movimientos de equilibrio en la fase de vuelo, la idea de caer dentro de la plataforma de fuerzas, etc. son elementos que el individuo tiene que atender en el tiempo total. Con la técnica de registro, es posible sólo revisar la forma en que se ejecutan los movimientos previos a la fase del despegue, es decir, a los movimientos y fuerzas en las componentes  $F_x$ ,  $F_y$  de la plataforma.*

<sup>29</sup> Se puede consultar a CARPENTER, Neurofisiología, El Manual Moderno, Cap. 10 y 11

6. *La información que se obtiene de los estudios y análisis biomecánicos le ofrece a un entrenador deportivo información sobre la condición actual del deportista; tendrá como referencia un historial biomecánico de desempeño atlético y le será de gran utilidad cuando se tenga el caso de que se tenga una lesión, una intervención quirúrgica, cambio de rutina de entranamiento, etc. ya que conoce cuál es el mejor nivel del deportista.*

En este trabajo ha sido necesario trabajar con otras áreas: fisiología, anatomía, medicina del deporte, bioquímica, estadística, para estudiar un problema que en apariencia es sencillo y común; los resultados obtenidos nos dan una mejor información sobre la física involucrada en el salto vertical. Estudios posteriores en biomecánica deportiva<sup>30</sup> tendrán que acercarse a estas áreas, entendiéndolo que la física no es una ciencia aislada. El trabajo multidisciplinario es el camino a seguir para obtener las respuestas a los planteamientos que nos hacemos del mundo en donde vivimos.



Figura 5.2. La física no está alejada de las actividades del hombre.

<sup>30</sup> Dos de las fotos son de Grace Chu, 2002 Canadian Artistic Gymnastics Championships. Mayo 20, 2002.

## Apéndice A

### La prueba estadística Shapiro-Wilk para normalidad

Muchos de los resultados teóricos y prácticos de la estadística paramétrica descansan en la distribución normal. El investigar si una muestra aleatoria de tamaño  $n$  proviene de una distribución normal resulta de interés, y de hecho existen muchas pruebas estadísticas al respecto entre las que destaca la de Shapiro-Wilk.

La prueba de Shapiro-Wilk para normalidad fue propuesta en 1965, consiste en un conjunto de datos aleatorios de tamaño  $n$ :  $X_1, X_2, \dots, X_n$  asociados con una función de distribución desconocida  $F(x)$ . Primero se calcula un denominador  $D$  para la prueba estadística:

$$D = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (5.1)$$

donde  $\bar{X}$  es la media de la muestra. Se ordena la muestra de el valor menor hasta el valor mayor,

$$X^{(1)} \leq X^{(2)} \leq \dots \leq X^{(n)} \quad (5.2)$$

$X^{(i)}$  representa el  $i$ -ésimo orden estadístico. Para la muestra de tamaño  $n$ , es necesario consultar una serie de tablas de valores<sup>31</sup> para obtener un conjunto de coeficientes  $a_1, a_2, \dots, a_k$  donde  $k$  es aproximadamente  $n/2$ .

La prueba estadística  $T_3$  se calcula por medio de la expresión:

$$T_3 = \frac{1}{D} \left[ \sum_{i=1}^k a_i (X^{(n-i+1)} - X^{(i)}) \right]^2 \quad (5.3)$$

A la prueba estadística  $T_3$  también se le denota por  $W'$ . Esta prueba estadística es básicamente el cuadrado de un coeficiente de correlación, donde el coeficiente de correlación de Pearson se calcula entre el estadístico de orden  $X^{(i)}$  en la muestra y los valores  $a_i$ , los cuales representan qué orden estadístico debería tener para parecer si la población tiene una distribución normal. Esto es, si  $T_3$  es cercano a un valor de 1.0 la muestra tiene un comportamiento de una distribución normal. Si  $T_3$  es muy pequeño (muy abajo de 1.0), la muestra no tiene una distribución normal.

Podemos determinar por medio de una confrontación de hipótesis<sup>32</sup> si la variable tiene o no una distribución normal, en donde de acuerdo con los resultados obtenidos del estadístico y de la significancia estadística, se deba de optar por alguna de las siguientes opciones:

- a) rechazar la hipótesis nula,  $H_0$ :  $F(x)$  es una distribución normal, o
- b) aceptar la hipótesis alternativa,  $H_a$ :  $F(x)$  no es una distribución normal.

Para ello es necesario tomar en cuenta el uso de una serie de tablas de

<sup>31</sup> Se puede revisar a CONOVER, W. J. *Practical nonparametric statistics*. Wiley, 1999 pp. 552-557  
<sup>32</sup> También conocida en estadística como prueba de hipótesis

constantes, de cuantiles de acuerdo al valor de significancia que se requiera; otra forma de simplificar las operaciones de la prueba de Shapiro-Wilk es graficar en papel estadístico, los valores de probabilidad esperada contra los valores observados, ello nos conduce a la gráfica de una recta, en el dado caso de que los puntos se localicen muy cerca de la recta, se puede asegurar que la variable tiene una distribución normal, en caso en que los puntos estén alejados, la variable de estudio no se asemeja a una de distribución normal, para tal caso se usan las gráficas Q-Q.

Una gráfica Q-Q representa la distribución por cuantiles de una variable contra los cuantiles de cualquier número de pruebas de distribución. Las gráficas de probabilidad se utilizan generalmente para determinar si la distribución de una variable se ajusta a una distribución dada. Si la variable seleccionada se ajusta a la prueba de distribución, los puntos que representan los datos de la variable estarán cerca de una línea recta. Un cuantil puede definirse como un valor de la variable que permite saber cuántos otros valores obtenidos de la variable se encuentran por debajo y por encima en la serie ordenada de dichos valores. Los cuantiles se clasifican en cuartiles, quintiles, deciles y percentiles, según que dividan la serie ordenada de valores en cuatro, cinco, diez o cien partes iguales.

A continuación se muestran los gráficos Q-Q, para las variables antropométricas: edad, peso y talla. Se considera el total de casos de los grupos observados, es decir  $n = 220$ , ya que si se determina que con este tamaño de muestra, se acepta la hipótesis de que la muestra tiene una distribución normal, cada subconjunto por nivel de actividad deportiva tendrá una distribución normal. Se realizó la prueba Shapiro-Wilk utilizando SPSS ver. 10.

En la figura 3 se muestra la gráfica Q-Q de la variable edad, en donde se muestra que la mayoría de los puntos de la muestra se encuentran muy cerca de la recta que determina si la variable edad tiene una distribución normal.

es necesario señalar que las unidades de los ejes de la gráfica son unidades arbitrarias, ya que se está representando una valor de probabilidad. En la figura 4 se observa cómo los elementos de la muestra están muy cercanos a la recta, por lo que la variable masa tiene una distribución normal.

En la figura 5 podemos ver que hay una serie de punto que están alejados de la recta en comparación de los demás que prácticamente están sobre la línea de ajuste, no considero eliminar esos puntos ya que una de las bondades de este tipo de pruebas radica en que si en el primer ensayo no se visualiza la normalidad, es posible manipular los datos mediante una serie de transformaciones (que consiste en hacer un cambio de variable, como aplicar el logaritmo natural, tomar recíproco de la variable, potenciarla, etc.) y aplicar de nueva cuenta la prueba (ver la figura 6).

Esta prueba estadística nos facilita la operación de realizar la serie de pruebas estadísticas tanto para las variables antropométricas como para las biomecánicas, a continuación se muestran las gráficas resultantes de la prueba Shapiro-Wilk para índice dinamométrico (*1D*), fuerza muscular en cuádriceps, fuerza registrada en la plataforma y por último la altura máxima alcanzada en el salto vertical.

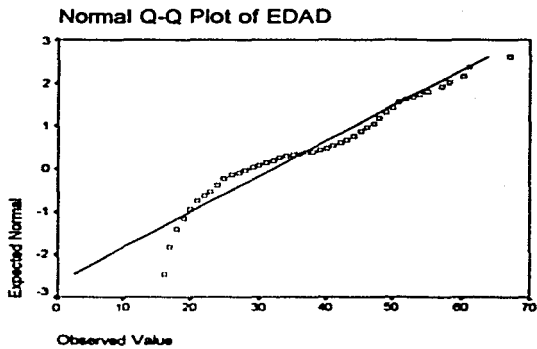


Figura 5.3. Gráfica de probabilidad de la variable edad de los tres grupos de sujetos observados.

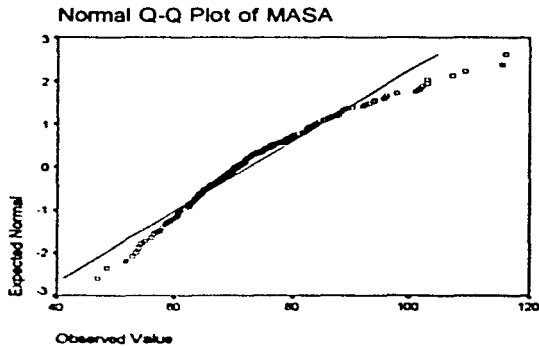


Figura 5.4. Distribución de elementos de la muestra para la variable masa, la distribución de esta muestra por la prueba de Shapiro-Wilk es una distribución normal.



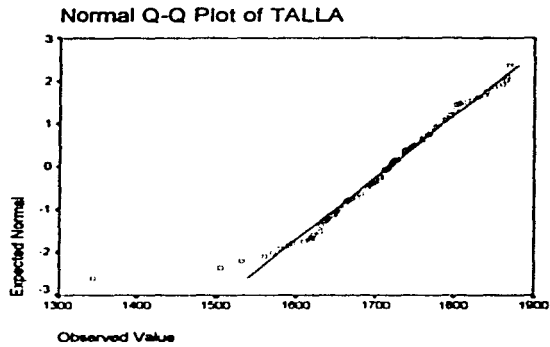


Figura 5.5. Distribución de los elementos de la muestra en la prueba de normalidad para la variable Talla.

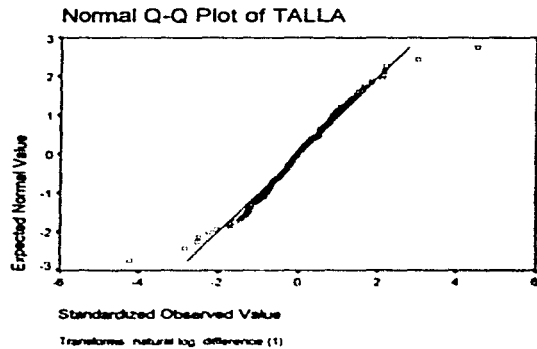


Figura 5.6. Se realizó un cambio de variable tomando el logaritmo natural de la misma y se aplicó el procedimiento de la prueba.

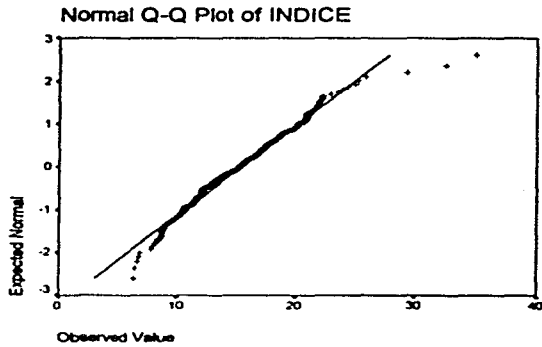


Figura 5.7. Distribución de la variable índice dinométrico en los tres grupos de sujetos (sin transformaciones).

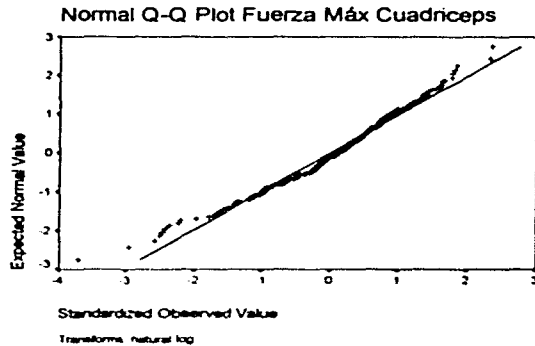


Figura 5.8. La variable Fuerza máxima de cuadriiceps se sometió a una transformación, pero aún así, refiere a una distribución normal.

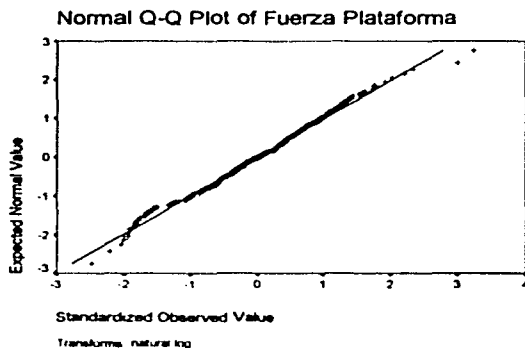


Figura 5.9. Para la variable transformada Fuerza registrada en plataforma tiene una distribución normal.

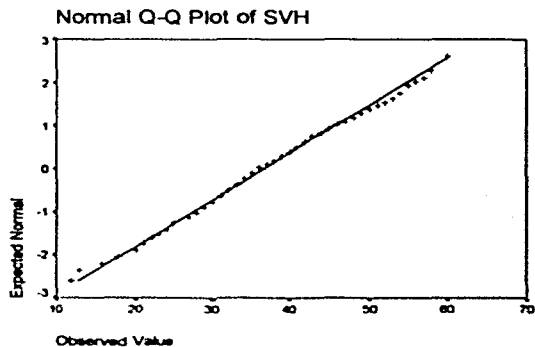


Figura 5.10. Sin necesidad de aplicar alguna transformación, la variable de respuesta: altura máxima alcanzada se ajusta muy bien a una distribución normal.

## Referencias

- [1] ADRIAN, Marlene J. Y John M. Cooper. "Biomechanics of human movement". Brown & Benchmark, Wisconsin, 1995.
- [2] BENDALL, J.R. "Muscles, molecules and movement". Heinemann, London, 1974.
- [3] BOBBERT, Marteen F. Y Gerrit Jan Van Ingen Schenau. "Coordination in vertical jump". J. Biomechanics 21 (3) pp. 249-262 (1988).
- [4] BUZO, Córdoba Enrique. "Mecanismos de la contracción molecular". Tesis de Licenciatura de la carrera de Física. Facultad de Ciencias, UNAM (1977).
- [5] CARLSON, Francis D. & Douglas R. Wilkie. "Muscle physiology". Prentice Hall, New Jersey, 1974.
- [6] CARPENTER, R.H.S. "Fisiología". 2a. edición, El Manual Moderno, México, 1998.
- [7] CATTON, W.T. "Physical methods in physiology". Isaac Pitman & Sons, London, 1957.
- [8] CHUNG, W.T. "Continuum mechanics". Prentice Hall, New Jersey, 1988.
- [9] CONOVER, W. J. "Practical nonparametric statistics". 3rd. edition. Wiley & Sons, 1999. New York
- [10] CROSS, Rod. "Standing, walking, running, and jumping on a force plate". Am. J. Phys. 67 (4) pp. 304 - 309 (1999).
- [11] DAMASK, A.C. "Medical physics. Volume I". Academic Press, New York, 1978.
- [12] DANIELSON, D.A. "Vectors and tensor in engineering and physics". Addison Wesley, California, 1992.
- [13] DAWSON-SAUNDERS, Beth Y Robert G. Trapp. "Bioestadística médica". El Manual Moderno, México, 1993.
- [14] DONSKOI, D. & V. Zatsioski. "Biomecánica de los ejercicios físicos". Ed. Raduga, Moscú, 1988.
- [15] ESPINOSA, Sánchez Matilde. "Uso del video en el análisis del movimiento en biomecánica". Tesis. Centro de Educación Continua de Estudios Superiores del Deporte, UNAM, México, 1992.
- [16] FRANKEL, Victor H. & Margareta Nordin. "Basic biomechanics of the skeletal system". Lea & Febiger, Philadelphia, 1980.
- [17] FRUMENTO, A.S. "Biofísica". Mosby Libros, Madrid, 1995.
- [18] FUNG, Y.C. "A first course in continuum mechanics". Prentice Hall, New Jersey, 1977.
- [19] FUNG, Y.C. "Biomechanics, motion, flow, stress and growth". Springer Verlag, New York, 1990.
- [20] FUNG, Y.C. (Editor). "Biomechanics". Mc-Graw Hill, New Jersey, 1972.
- [21] GANONG, William. "Fisiología médica". El Manual Moderno, México, 1998.
- [22] GOTWITZKE, Barbara A. y Morris Milner. "El cuerpo y sus movimientos. Bases científicas". ed Paidotribo, Madrid, 1999.
- [23] GUTIERREZ, Cirlo Gilberto. "Anatomía, fisiología e higiene". Kapeluz mexicana, México, 1974.
- [24] GUTIERREZ, Dávila Marcos. "Biomecánica deportiva". Ed. Síntesis, Madrid, 1999.
- [25] HUXLEY, A. F. "Muscle structure and theories of contraction". Prog. in Biophysics and Biophysical Chemistry pp. 255-318 (1957).
- [26] KEENER, James & James Sneyd. "Mathematical physiology". Springer Verlag, New York, 1998.
- [27] Le VEAU, Barney. "Biomecánica del movimiento humano". ed. Trillas, México, 1991.
- [28] LEVA, Paolo de. "Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertia parameters". J. Biomechanics 29 (9) pp. 1223-1230 (1996).
- [29] LEVI, Enzo. "Elementos de mecánica del medio continuo". Limusa, México, 1982.