

# APLICACIÓN DE CONCEPTOS Y PROCEDIMIENTOS DE LA BIOMECÁNICA PARA EL ANÁLISIS DE OBRAS DE ARTE: “EL HOMBRE DE VITRUVIO” SEGÚN LEONARDO DA VINCI

## APPLICATION OF CONCEPTS AND PROCEDURES OF BIOMECHANICS FOR THE ANALYSIS OF ART WORKS: “THE VITRUVIAN MAN” BY LEONARDO DA VINCI

J.C. Muñoz, H. Castro, W. Holtz, P.D. Muñoz, A. Vinagre, R. Cassibba

Instituto de Ciencias de la Rehabilitación y el Movimiento (ICRM) - Universidad Nacional de General San Martín  
Dragones 2201 – Pabellón G – Ciudad Autónoma de Buenos Aires – Argentina  
*e-mail: profjcm@hotmail.com*

Recibido 30/03/2012; aprobado 31/08/2012

Es conocido el aporte que la Matemática <sup>(1)</sup>, la Física, la Biología, la Medicina y la Geología efectúan cotidianamente para el estudio y análisis de obras de arte. Sin embargo, tras una exhaustiva búsqueda bibliográfica y electrónica, hasta el momento no hemos encontrado ningún aporte propio de la Biomecánica. Nuestra hipótesis inicial de trabajo consistió en considerar que la Biomecánica, como disciplina específica que integra aspectos fisicomatemáticos y anatómicos pero que no se reduce a ellos, dispone de contenidos, herramientas y procedimientos particulares que serían de gran utilidad para el análisis de cuestiones específicas referidas al cuerpo humano, aportando información que otras áreas del conocimiento no podrían hacer por sí mismas. Es por ello que, tras un debate intenso, hemos decidido seleccionar como caso paradigmático “El Hombre de Vitruvio”, obra de Leonardo da Vinci, que reúne una gran cantidad de aspectos que pueden ser abordados con rigor científico y técnico por la mencionada disciplina. Por último, nuestra propuesta es mostrar que es posible ampliar los campos de aplicación de la Biomecánica, más allá de los definidos clásicamente, hasta el campo de las Artes <sup>(2)</sup>.

Palabras clave: Biomecánica, Arte, aplicaciones, investigación.

It is known the contribution of Mathematics <sup>(1)</sup>, Physics, Biology, Medicine and Geology made daily for study and analysis of works of Art. However, after an extensive electronic literature search, we have not found any contribution of Biomechanics. Our initial hypothesis was to consider that Biomechanics, a discipline that integrates specific aspects of Anatomy, Mathematics and Physics but not limited to them, offers content, tools and special procedures that would be useful for the analysis of specific issues relating to human body, providing information that other areas of knowledge could not do for themselves. That is why, after intense debate, we decided to select as a paradigmatic case the "Vitruvian Man", which brings a lot of aspects that can be addressed with scientific and technical rigor by that discipline. Finally, we propose to show that it is possible to extend the application fields of Biomechanics, beyond the classically defined, to the field of Arts <sup>(2)</sup>.

Keywords: Biomechanics, Arts, applications, research.

### Biomecánica y sus campos de aplicación

La Biomecánica ha sido definida de diversas maneras a lo largo de las últimas décadas. Si bien su definición presenta diferencias según los autores o escuelas, una característica común a todas ellas se refiere a su propia esencia, es decir la conjugación de la Mecánica con la Biología. Entre las definiciones clásicas podemos encontrar las siguientes <sup>(3)</sup>:

- “Conocimiento del papel que juegan las fuerzas mecánicas que producen los movimientos, su soporte autonómico, iniciación neurológica, control integrado y percepción, así como su diseño central” (Consejo Internacional del Deporte y Educación Física, UNESCO, 1971)

- “Estudio del cuerpo humano como un sistema bajo dos conjuntos de leyes: las leyes de la Mecánica Newtoniana y las leyes biológicas” (Asoc. Americana de Ingeniería Mecánica, 1972)
- "Conjunto de conocimientos interdisciplinarios generados a partir de utilizar, con el apoyo de otras ciencias biomédicas, los conocimientos de la Mecánica y distintas tecnologías en: primero, el estudio del comportamiento de los sistemas biológicos y, en particular, del cuerpo humano; y, segundo, en resolver los problemas que le provocan las distintas condiciones a las que puede verse sometido (Instituto de Biomecánica de Valencia, 1992)".

Asimismo, la Biomecánica presenta diversos campos de aplicación:

- El médico, analizando y estableciendo tanto los patrones de normalidad como las patologías desde un punto de vista mecánico, y proponiendo además posibles soluciones que mejoren la calidad de vida de los pacientes. Un ejemplo típico es el estudio de la Marcha Humana Normal y Patológica.
- El deportivo, analizando la práctica deportiva para optimizar el rendimiento, así como diseñando equipamiento y técnicas de entrenamiento.
- El ocupacional, analizando las interacciones del hombre en los distintos ambientes (doméstico, laboral, de esparcimiento, etc), buscando crear y adecuar productos y entornos de acuerdo a sus necesidades y capacidades, mediante la optimización de su eficacia, seguridad y confort.
- El animal, produciendo y aplicando conocimientos en torno al comportamiento mecánico relacionado con los animales, llegando incluso a estudios sobre Biomecánica de los Dinosaurios.
- El vegetal, investigando el comportamiento biomecánico de las plantas, nuevos materiales relacionados, y su posible aplicación a estructuras.
- El aeroespacial, analizando las respuestas del cuerpo humano en un ambiente sometido a valores de fuerza gravitatoria diferentes a los de nuestro planeta, así como diseñando equipamiento específico para este tipo de situaciones.
- El antropológico-forense, aplicando conocimientos y principios de la Biomecánica para responder a cuestiones científicas sobre accidentes y procesos judiciales<sup>(4)</sup>, investigación de poblaciones y personas no identificadas, desaparición de personas, etc. Este es un campo muy nuevo de investigación, tal como lo muestra el reciente lanzamiento del *Journal of Forensic Biomechanics*.

Como hemos presentado recientemente en el Resumen, **es nuestro propósito ampliar también las aplicaciones de la Biomecánica al campo de las Artes.**

Entre las publicaciones de trabajos científicos en esta área del conocimiento, que ha crecido en forma muy significativa en las últimas décadas, podemos mencionar el *Journal of Biomechanics* (American Society of Mechanical Engineers: ASME), mientras que en castellano son de destacar las publicaciones efectuadas por el Instituto de Biomecánica de Valencia (IBV).

## Posibilidades de aplicación de la Biomecánica para el estudio de obras de arte

Es bien conocida la íntima relación que existe entre el Arte y las Ciencias, tanto es así que grandes artistas de la historia han estado al tanto de diversos estudios y descubrimientos científicos de su época, logrando aprovecharlos para crear nuevas obras; y viceversa, el Arte también ha influido en el desarrollo de los conocimientos científicos. Así por ejemplo, el interés por producir una obra artística de gran magnificencia como la cúpula de la Catedral de Florencia ha llevado al desarrollo de nuevos conocimientos en torno al análisis estructural, haciendo del arte un motor de la ciencia.



Fig. 1: *Tarde de domingo en la isla de la Grande Jatte*

Históricamente, destacan los conocimientos de la Física de su época que poseía el francés neo-impressionista Georges Seurat, quien experimentó y elaboró una teoría de la pintura fundamentada en la óptica de los colores y que se correspondía con una novedosa técnica científicamente rigurosa: el “puntillismo”. El problema que ocupaba al artista se centraba en la división del tono: dado que la luz es la resultante de la combinación de varios colores (la luz blanca lo es de todos), el equivalente de la luz en la pintura tiene que resultar del conjunto de muchos puntitos de color uno al lado del otro tales que, al ser percibidos, recomponen la unidad del tono y dan la vibración luminosa<sup>(5)</sup>. Es famosa su obra con esta técnica en óleo sobre lienzo, *Tarde de domingo en la isla de la Grande Jatte* (205cm x 304cm, 1884-86), que le demandó dos años de trabajo antes de finalizarla (Figura 1).

Actualmente existe una gran variedad de conocimientos, técnicas y procedimientos de ciencias como la Física, las Ciencias Médicas, la Biología, la Química y la Geología, que se utilizan diariamente para el análisis de aspectos específicos de obras de arte, existiendo una amplia bibliografía al respecto. En el área de Conservación y Restauración de Bienes Culturales, las Ciencias Naturales aportan al estudio de los diferentes fenómenos que afectan a la preservación del patrimonio cultural, los tratamientos de restauración, los materiales de las obras y soportes murales, los pigmentos, los aglutinantes, el comportamiento de los mismos a largo plazo, entre muchos otros.

Por otra parte, aunque actualmente se dispone de una interesante cantidad y variedad de trabajos de investigación referidos a la obra pictórica conocida como *El Hombre de Vitruvio*, no hemos encontrado ninguno que analice la obra teniendo en cuenta los aspectos estrictamente biomecánicos, más allá de aquellos que se solapan con los de la Matemática o la Anatomía.

De allí que consideremos oportuno aclarar que aunque la Biomecánica es una disciplina que trabaja con algunos conceptos que son originarios de la Física y de la Medicina, no se reduce a ninguna de estas. Por el contrario, es una disciplina que viene generando y ampliando su propio campo de conocimiento, y en estas últimas décadas ha dado muy fructíferos resultados. En un primer momento, hemos considerado que la Biomecánica podría ser muy propicia para estudiar la relación entre idealismo y realismo en determinadas obras en las que se representa el cuerpo humano, la simetría corporal, las proporciones humanas en otras épocas y culturas, el estudio del equilibrio, la estabilidad y el movimiento, los conocimientos científicos que podrían haberse tenido en determinadas sociedades y contextos históricos, entre otros. Destacamos, además, que estos análisis no se reducen exclusivamente a obras pictóricas bidimensionales (2D), sino que también pueden ser aplicados en el caso de obras tridimensionales (3D), como las esculturas. Finalmente, para acotar inicialmente nuestra propuesta y luego de intensos debates, elegimos como primer caso de análisis “El Hombre de Vitruvio”, de Leonardo da Vinci.

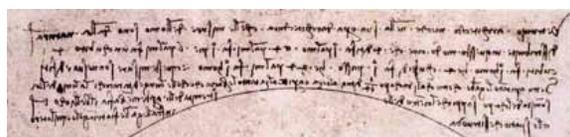
Entre las razones que encontramos para la elección de esta obra podemos mencionar las siguientes:

- ✓ Es una obra muy importante y famosa del Arte Universal.
- ✓ Es una figura humana sin vestimentas ni accesorios, lo cual permite identificar con mayor precisión algunos puntos anatómicos requeridos para el cálculo del centro de gravedad corporal.
- ✓ Es una imagen que expresa una anatomía y medidas ideales, de acuerdo con la propuesta y concepción expresada por Vitruvio, en su relación con la arquitectura.
- ✓ Se observa en plano frontal.
- ✓ Es posible comparar algunos resultados y afirmaciones, con otros ya obtenidos por otros investigadores/estudiosos.
- ✓ Acompaña la imagen con un “texto escrito” que describe las longitudes, brindando información relevante por parte del propio autor.
- ✓ En la imagen misma se visualiza una escala geométrica de longitudes.
- ✓ Un particular gusto y admiración por esta obra, compartido por el grupo de investigadores.
- ✓ Una forma de reconocimiento a Leonardo, quien hizo significativos aportes no sólo en Arte, sino también en Ciencia y Tecnología.

## Leonardo Da Vinci y el Hombre de Vitruvio

Leonardo di Ser Piero habría nacido en Anchiano, cerca de Vinci, Italia, el día 15 de abril del año 1452 y falleció el 2 de mayo de 1519 en el Castillo de Clos-Lucé, Francia <sup>(6)</sup>. Fue arquitecto, escultor, pintor, inventor, músico, ingeniero. Indudablemente un hombre del Renacimiento. Está ampliamente considerado como uno de los grandes pintores de la historia. Su famoso dibujo, denominado *Uomo Vitruviano* u “*Hombre de Vitruvio*” (aprox. 1492), está basado en las indicaciones presentes en la obra *De Architectura*, del ingeniero y arquitecto romano *Marcus Vitruvius Pollio* (siglo I a.C.), donde se hacía referencia a las proporciones del cuerpo humano. Leonardo realizó este dibujo con el fin de ilustrar el libro *De Divina Proportione* (1509) a pedido del matemático Luca Pacioli. Actualmente esta pequeña pero gran obra se conserva en la Galleria dell'Accademia de Venecia.

Según las notas del propio Da Vinci, en la parte superior de la obra afirmaba que <sup>(7)</sup>:



*“Vitruvio, el arquitecto, explica en su obra sobre arquitectura que la naturaleza dispone las medidas del cuerpo humano de la siguiente manera: 4 dedos forman 1 palma, 4 palmas son 1 pie, 6 palmas son un codo y 4 codos son la altura de un hombre. Y 4 codos forman un paso, y 24 palmas son un hombre. Y estas eran las medidas que usaba en sus edificios. Si abre las piernas de forma que su altura disminuya en 1/14 y extiende los brazos, levantándolos hasta que los dedos corazón estén a la altura de la parte superior de su cabeza, el centro de las extremidades extendidas estará en el ombligo y el espacio entre las piernas formará un triángulo equilátero”*

Asimismo, justo debajo del cuadrado, haciendo también referencia a estas medidas ideales, se puede leer:



*“La longitud de los brazos extendidos de un hombre es igual a su altura”*

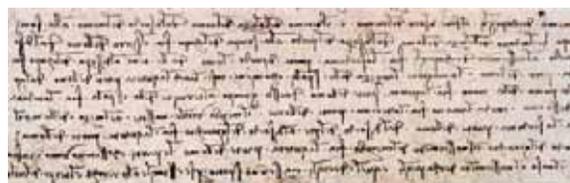


Fig. 2 a)b)c): Textos de Leonardo

Mientras que en la región más baja de la figura, Leonardo escribió:

*“La distancia entre le raíz del pelo y la punta de la barbilla es una décima parte de la altura de un hombre; entre la barbilla y la parte superior de la cabeza, una octava parte; y entre la parte superior del pecho y la parte superior de la cabeza, una sexta parte. La distancia que hay entre la parte superior del pecho y la raíz del pelo equivale a la séptima parte de la altura de un hombre. De los pezones a la parte superior de la cabeza hay una distancia equivalente a la cuarta parte de un hombre. La anchura máxima de los hombros equivale a una cuarta parte del hombre. La distancia entre el codo y la punta de la mano es la quinta parte del hombre, y entre el codo y el ángulo de la axila, la octava parte. Toda la mano es la décima parte de su estatura; el inicio de los genitales marca el centro del hombre. **Un pie es la séptima parte de la altura de un hombre.** La distancia entre la planta del pie y la base de las rodillas es la cuarta parte de la altura de un hombre y entre la base de la rodilla y el inicio de los genitales también la cuarta parte. La distancia entre la punta de la barbilla y la nariz, y entre la raíz del pelo y las cejas, es igual en ambos casos, y como la oreja, un tercio de la cara”*

### El Número Phi ( $\Phi$ ) y la Proporción Áurea

El número áureo -o número de oro- es representado por la letra griega  $\Phi$  (Phi; se lee *Fi*) en honor al escultor griego Fidias. Este número es irracional y puede expresarse mediante la siguiente igualdad:

$$\Phi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} = 1,61803\dots$$

de tal modo que dos números positivos cualesquiera, a y b, están en proporción áurea si se cumple que:

$$\Phi = \frac{b}{a} = 1,61803\dots ; \text{ siendo } a < b$$

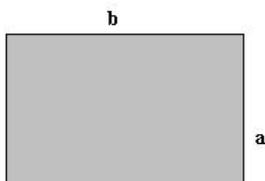


Fig. 3: Rectángulo áureo

Geoméricamente, si se construye un rectángulo cuya altura es a y su base es b, entonces podremos decir que se encuentran en proporción áurea -o divina proporción- cuando el cociente de la base dividido por la altura sea precisamente el número  $\Phi$  (Figura 3). Posteriormente al Renacimiento, se ha atribuido a la arquitectura de la antigüedad clásica griega la utilización de esta relación en la construcción de edificios, como el Partenón de Atenas, asignándosele al rectángulo áureo la perfección y la belleza máxima, aunque esta es una idea actualmente en discusión<sup>(8)</sup>.

Este número tiene además, según muchos autores, la particularidad de encontrarse presente de una manera aproximada en la naturaleza, por ejemplo en:

- la relación entre la cantidad de abejas macho y abejas hembra en un panal
- la disposición de los pétalos de algunas flores
- la distribución de las hojas en un tallo
- la relación de las distancias entre las espiras del nautilus (caracola), entre muchos otros.

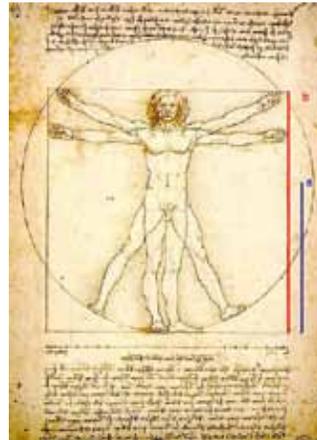


Fig.4: a) altura del ombligo; b) Estatura

Asimismo, la razón áurea está presente en el resto de las artes: escultura, pintura, música, fotografía, etc.

Hoy también muchos sostienen la idea de que estadísticamente el cuerpo humano tiene proporciones próximas a la proporción áurea, por ejemplo al comparar la altura total de una persona con la altura a la que se encuentra su ombligo. Según se ha sostenido a

lo largo de varios siglos, Leonardo habría plasmado esta idea en la imagen del Hombre de Vitruvio (Figura 4).

### Análisis de la Proporción Áurea en el Hombre de Vitruvio

Durante siglos se ha defendido el cumplimiento de la Proporción Áurea entre el lado del cuadrado (altura humana) y el radio del círculo visible (altura del ombligo) en la figura del Hombre de Vitruvio realizada por Leonardo da Vinci. Sin embargo, diversos estudios han mostrado que esta proporción efectivamente no se cumpliría, aunque los valores obtenidos del número Phi puedan considerarse muy próximos al teórico. Por nuestra parte también hemos analizado dicha relación -efectuando las mediciones correspondientes con métodos computacionales- obteniendo un valor que denominamos  $\Phi_{\text{experimental}}$ , próximo aunque no igual al valor de  $\Phi$  (tórico). Una de las posibles explicaciones para el no cumplimiento de esta proporción sostiene que en realidad Leonardo estaba preocupado por lograr la “Cuadratura del Círculo” y no por representar la Proporción Áurea.

El valor que obtuvimos para el cociente entre la altura del Hombre de Vitruvio dividido por la altura desde el suelo a su ombligo es  $\Phi_{\text{experimental}} = 1,649$  (Tabla 1):

TABLA 1: VALOR CALCULADO DE  $\Phi$  Y SU DIFERENCIA CON EL ESPERADO TEÓRICAMENTE

| $\Phi_{\text{experimental}}$ | $\Phi_{\text{teórico}}$ | $\Delta\Phi = \Phi_{\text{exp}} - \Phi_{\text{teórico}}$ | $\Delta\Phi(\%)$ |
|------------------------------|-------------------------|--|------------------|
| 1,649                        | 1,618...                | 0,031  | (+1,916)         |

Como se puede apreciar, la diferencia obtenida entre el  $\Phi_{\text{teórico}}$  esperado y el  $\Phi_{\text{experimental}}$  es menor al 2%, por lo que si bien la proporción no es áurea, podría considerarse válidamente próxima. El valor experimental que hemos determinado es similar a otros hallados anteriormente por otros investigadores.

### Las ecuaciones de regresión

Los procedimientos de correlación y regresión son muy usados en la estadística inferencial, presentándose como herramientas útiles cuando se busca relacionar dos o más variables entre sí, como por ejemplo el peso y la altura de una determinada población. La correlación indica el grado de dependencia de una variable respecto de otra, mientras que la regresión permite establecer una relación matemática –ecuación de regresión– entre el conjunto de variables independientes y la variable dependiente, pudiendo de esta manera formular los “modelos predictivos”.

Las ecuaciones de regresión surgen tomando en cuenta los datos empíricos y la aplicación de la estadística inferencial, cuyos resultados se generalizan para posteriormente aplicarse a casos particulares con cierto grado de aproximación y bajo condiciones específicas de validez. Este es, por ejemplo, el caso de una de las tantas posibles ecuaciones de regresión que permiten obtener el peso de una persona en función de su talla (o estatura):

$$P = 50 + [0,75 \cdot (H - 150)] ,$$

donde H es la altura de la persona medida en cm.

### Determinación de la Altura del Hombre de Vitruvio a partir de datos geométricos de Da Vinci

Según Carlos Sanchez-Montaña, “el Modulor Vitruviano muestra que el cuerpo humano posee la simetría y proporción natural, la que toda obra de arquitectura debe poseer. Y que la base ‘natural’ de esta proporción es el codo”, teniendo en cuenta que “en la antigüedad se creía que Dios había creado el Universo de acuerdo con la armonía y su consecuencia métrica: la modulación, y la unidad básica de longitud era el codo o cubit”.<sup>(9)</sup>

En *De Architectura*, Libro III sobre los Templos, Vitruvio escribe: *Si nos referimos al pie, equivale a una sexta parte de la altura del cuerpo; el codo una cuarta parte*. Así, según el arquitecto romano, la altura de un hombre es de cuatro codos o seis pies.

A partir del valor numérico -en metros- aceptado actualmente para la medida del codo romano, se llega a una conclusión ya establecida anteriormente por otros investigadores.

Considerando la siguiente relación:

$$\begin{aligned} \text{Un codo (romano)} &= 0,444 \text{ m.} \\ \text{Un pie} &= 0,296 \text{ m.} \end{aligned}$$

Luego:

$$4 \text{ codos} = 0,444 \text{ m} \cdot 4 = 1,776 \text{ m}$$

ó

$$6 \text{ pies} = 0,296 \text{ m} \cdot 6 = 1,776 \text{ m}$$

Por lo tanto, la altura H del Hombre de Vitruvio es de 1,776 m.

### Determinación del peso corporal del Hombre de Vitruvio

Para la determinación del peso corporal del Hombre de Vitruvio hemos empleado como dato el valor de su altura de 1,776 m calculado previamente.

Considerando al hombre vitruviano como ideal, a partir de su estatura estimamos su peso ideal, resultado que no figura en bibliografía especializada puesto que no responde a una cuestión puramente geométrica sino que es propia de la Biomecánica. Para el cálculo fue necesario acudir a ecuaciones de regresión que relacionan la talla con el peso. En nuestro caso elegimos la utilizada originalmente por la Metropolitan Life Insurance Company, que presenta limitaciones en torno a la muestra en la que se basa, a la época (actual) a la que responde, a la independencia de variables como la edad y la etnia, aunque consideramos que es una interesante estimación. El peso ideal estimado, definido (discutiblemente) como aquel que confiere la máxima esperanza de vida de la persona, sería:

$$P(\text{kgf}) = 50 + 0,75 \cdot [H(\text{cm}) - 150]$$

Entonces:

$$P = 50 + [3 \cdot (177,6 - 150) \div 4] = 70,7 \text{ kgf}$$

### Índice de masa corporal o índice de Quetelet del Hombre de Vitruvio

El índice de masa corporal (IMC) es un índice que relaciona el peso de una persona con su talla y se lo emplea habitualmente como una de las formas para medir el grado de obesidad, aunque limitadamente dado que no distingue entre la masa grasa y la masa magra, ni tampoco toma en cuenta el sexo y la edad. (Tabla 2).

TABLA 2: VALORES DEL IMC Y SU RELACIÓN CON EL GRADO DE OBESIDAD SEGÚN LA OMS

| IMC (kgf / m <sup>2</sup> ) | Categoría                   |
|-----------------------------|-----------------------------|
| Menor a 18.50               | Peso insuficiente           |
| 18.50-24.99                 | Peso normal                 |
| 25.00-29.99                 | Preobeso                    |
| 30.00-34.99                 | Obesidad tipo I             |
| 35.00-39.99                 | Obesidad tipo II            |
| Mayor o igual a 40.00       | Obesidad tipo III (mórbida) |

El índice de masa corporal fue propuesto por el estadístico belga Lambert Adolphe Jacques Quetelet (1796 – 1874) y se determina mediante la siguiente ecuación, donde la altura se toma en metros y el peso en kilogramos fuerza:

$$IMC = \frac{P}{H^2} = \frac{70,700kgf}{(1,776m)^2} = 22,415 \frac{kgf}{m^2}$$

El valor de IMC indica que el Hombre de Vitruvio está dentro de los parámetros normales de peso, es decir que no presenta peso insuficiente, sobrepeso ni obesidad:

$$18,50 < 22,41 < 24,99 \quad \text{normal}$$

Este era un resultado esperable dado que el peso no fue obtenido por medición directa, sino a través de una ecuación de regresión que estima el peso “ideal”. En última instancia, este resultado expresa que la ecuación peso-talla para esta estatura responde adecuadamente a lo que se considera un peso ideal según el IMC, y también cuál sería el valor estadísticamente ideal de IMC para esta estatura según la Metropolitan Life Insurance Company. En nuestro caso, este método nos aporta valores numéricos estadísticamente ideales que corresponderían al Hombre de Vitruvio, dado su idealidad.

Muchas veces suele considerarse que el IMC ideal para el hombre es de 22,5. Al respecto, es interesante notar la proximidad numérica obtenida en el caso del hombre vitruviano. Asimismo, el resultado obtenido expresa un riesgo bajo de desarrollar enfermedad cardíaca y diabetes, entre otras enfermedades (Figura 5).

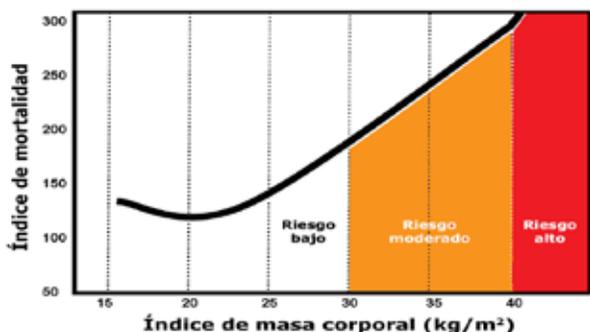


Fig. 5: IMC y salud (Univ. Cantabria)

El Peso Corporal Blanco (IMC-25) representa el peso para una talla específica en la cual el IMC es 25. Este valor expresa el peso máximo que un individuo puede tener de acuerdo a su estatura sin ser clasificado como una persona con sobrepeso. En nuestro caso:

$$PCB = 25 \cdot H^2 = 78,85kgf$$

Es decir que el peso máximo que podría tener el Hombre de Vitruvio para encontrarse dentro de los valores de normalidad es de 78,85 kgf.

### Complejión corporal

A partir de Tablas actualizadas, podemos derivar la complejión corporal del Hombre de Vitruvio sin tener en cuenta su edad. Si bien estos valores no tienen por qué corresponderse con los de las medias muestrales de varones italianos del Renacimiento, también es cierto que Da Vinci estaba representando un hombre universal y atemporal, que tampoco es real.

Como puede observarse, para una altura de 1,776m y un peso de 70,70 kgf, se obtiene una complejión corporal mediana (Tabla 3).

TABLA 3: COMPLEXIÓN DE VARONES EN FUNCIÓN DE LA TALLA Y EL PESO CORPORAL

| Estatura | VARONES    |           |           |
|----------|------------|-----------|-----------|
|          | Complejión |           |           |
|          | Pequeña    | Mediana   | Grande    |
| 1,76     | 63,5-68,0  | 65,7-73,0 | 70,0-79,0 |
| 1,77     | 64,0-69,0  | 67,0-74,0 | 71,0-80,0 |
| 1,78     | 64,7-69,7  | 67,7-74,7 | 71,7-81,0 |
| 1,79     | 65,4-70,4  | 68,4-75,4 | 72,4-82,0 |

### El centro de gravedad del Hombre de Vitruvio

Para calcular la posición aproximada del CG de una persona a partir de una imagen bidimensional existe un procedimiento validado universalmente a partir del denominado “stick figure”, que consiste básicamente en marcar sobre la imagen determinados puntos característicos que determinan los distintos segmentos corporales, en general 14 en total según el modelo habitualmente más utilizado. Esta es una técnica muy común en el área deportiva y en ciencias de la salud. El método de cálculo toma como datos los valores tabulados de las masas corporales de los distintos segmentos, y las posiciones de los centros de gravedad de cada uno de ellos con respecto a los puntos iniciales de los mismos con sentido proximal-distal y cefálico-caudal. Dependiendo del modelo elegido y del sexo, la cantidad de segmentos varía, como así también los valores de las masas segmentarias relativas y las posiciones relativas de los centros de gravedad de cada segmento. En nuestro caso hemos considerado el

modelo segmentario según de Leva (Tabla 4), por disponer de datos en vivo y actualizados.

TABLA 4: DATOS PORCENTUALES DEL CG SEGMENTARIO SEGÚN DE LEVA (1996) <sup>(10)</sup>

| Segmento             | Distancia porcentual | Peso porcentual |
|----------------------|----------------------|-----------------|
| <b>Cabeza-cuello</b> | 59,76                | 6,94            |
| <b>Tronco</b>        | 44,86                | 43,46           |
| <b>(Tórax)</b>       | (29,99)              | (15,96)         |
| <b>(Abdomen)</b>     | (45,02)              | (16,33)         |
| <b>(Pelvis)</b>      | (61,15)              | (11,17)         |
| <b>Brazo</b>         | 57,72                | 2,71            |
| <b>Antebrazo</b>     | 45,74                | 1,62            |
| <b>Mano</b>          | 79,00                | 0,61            |
| <b>Muslo</b>         | 40,95                | 14,17           |
| <b>Pierna</b>        | 44,59                | 4,33            |
| <b>Pie</b>           | 44,15                | 1,37            |

A pesar de la validez del método, este conlleva un apreciable grado de error, tal como hemos demostrado en un trabajo anterior <sup>(11)</sup>. De todas maneras, es un procedimiento interesante que puede arrojar información confiable para establecer efectivamente si, como muchos interpretan, el centro de gravedad del hombre de Vitruvio (estrictamente el casi exactamente coincidente centro de masa) se encuentra en su ombligo. Al mismo tiempo, es importante aclarar que Vitruvio no se refirió a estos puntos, sino que según su propia expresión, *item corporis centrum medium naturaliter est umbilicus* <sup>(12)</sup> -el ombligo es el punto central natural del cuerpo [humano]-, lo cual no significa que “el punto central natural” sea el centro de gravedad.

Para la determinación de la posición del CG se han realizado marcaciones sobre la imagen del Hombre de Vitruvio mediante una PC, empleando un software que permite una determinación que minimiza el error cometido.

Las diferentes posiciones de los centros de gravedad correspondientes a las 16 configuraciones geométrico corporales del Hombre de Vitruvio se presentan en la Tabla 5. Los valores corresponden a las coordenadas X e Y de cada centro de gravedad, tomando el centro de coordenadas ( 0;0 ) en el centro geométrico del círculo en el que se circunscribe el dibujo.

TABLA 5: COORDENADAS DEL CG DEL HOMBRE DE VITRUVIO - EN PÍXELES - SEGÚN LAS DIFERENTES POSTURAS CON RESPECTO AL OMBLIGO, QUE SE HALLA EN EL CENTRO GEOMÉTRICO DEL CÍRCULO (0;0)

| POSTURAS  | REFERENCIA                               | POSICION CG         |    |
|-----------|--|---------------------|----|
|           |  | Relativo al ombligo |    |
|           |  | X                   | Y  |
| <b>1</b>  | <i>cuadrado</i>                          | -3                  | 12 |
| <b>2</b>  | <i>circulo</i>                           | -3                  | 3  |
| <b>3</b>  | <i>cuadrado bzos arriba</i>              | -3                  | 9  |
| <b>4</b>  | <i>cuadrado bzo der arriba</i>           | -2                  | 11 |
| <b>5</b>  | <i>cuadrado bzo izq arriba</i>           | -3                  | 11 |
| <b>6</b>  | <i>cuadrado pies arriba</i>              | -4                  | 7  |
| <b>7</b>  | <i>cuadrado pie der arriba</i>           | -11                 | 10 |
| <b>8</b>  | <i>cuadrado pie izq arriba</i>           | 5                   | 10 |
| <b>9</b>  | <i>circulo bzo izq abajo</i>             | -3                  | 5  |
| <b>10</b> | <i>circulo bzo der abajo</i>             | -4                  | 5  |
| <b>11</b> | <i>circulo pie der abajo</i>             | 5                   | 6  |
| <b>12</b> | <i>circulo pie izq abajo</i>             | -11                 | 6  |
| <b>13</b> | <i>cuadrado bzo y pie der arriba</i>     | -11                 | 8  |
| <b>14</b> | <i>cuadrado bzo y pie izq arriba</i>     | 5                   | 8  |
| <b>15</b> | <i>cuadrado bzo der y pie izq arriba</i> | 5                   | 8  |
| <b>16</b> | <i>cuadrado bzo izq y pie der arriba</i> | -11                 | 8  |

Los resultados obtenidos indican que el centro de gravedad no coincide con el ombligo en ninguna de todas las posibles configuraciones geométricas, lo cual contradice una idea muy difundida que sostiene “el principio de que en el cambio entre las dos posiciones, el centro aparente de la figura parece moverse, pero en realidad el ombligo de la figura, que es el centro de gravedad verdadero, permanece inmóvil” <sup>(13) (14)</sup>. Dado que nuestro interés en este punto es cualitativo, pues sólo pretendemos establecer si efectivamente se corrobora o no la hipótesis de coincidencia entre las ubicaciones del CG y del centro del círculo, los valores numéricos están expresados en píxeles y no en centímetros o metros.

Pero aún en el caso de que en alguna de las posiciones el CG coincidiera con el ombligo (tenemos errores de medición y propios del modelo), esto no podría traducirse de ninguna manera en una constancia de su ubicación tras cambios en la geometría corporal. En otras palabras, aun en el caso de que en una de las posturas el CG estuviera exactamente en el centro del círculo, el CG no podría ubicarse en dicho punto en ninguna de las restantes 15 posturas. Esto es así porque

cambia la distribución espacial de masas, en forma no compensatoria, conforme lo hacen los segmentos corporales. Por lo tanto, hemos probado que el *centro natural* no es el centro de gravedad del hombre vitruviano, el centro geométrico del círculo no es el centro de gravedad.

### La longitud del pie

Un apartado especial merece la cuestión de la longitud del pie. Según Vitruvio es la sexta parte de la estatura. Según Leonardo, la séptima parte:

- *Si nos referimos al pie, equivale a una sexta parte de la altura del cuerpo (Vitruvio)*
- *Un pie es la séptima parte de la altura de un hombre (Leonardo)*

Aquí se observa que el artista, aunque tomó el texto romano como referencia, introdujo algunas variantes al representar las indicaciones de Vitruvio acerca de las proporciones del *homo bene figuratus*.

Dado que ambos consideran que la altura perfecta de un hombre es de 4 codos, necesariamente el pie propuesto por “il fiorentino” es menor que el pie romano. Partiendo del mismo codo romano, el pie de Leonardo tendría una longitud de 0,254m, significativamente menor al pie romano de 0,296 m. Según nuestra medición, la longitud del pie correspondiente al dibujo es de 0,257m, que responde con muy buena aproximación al ideal de Leonardo.

### Determinación de la longitud de zancada a partir de datos geométricos

Como hemos visto, en el texto que acompaña a la figura del Hombre de Vitruvio puede leerse que *4 codos son la altura de un hombre. Y 4 codos forman un paso*. Por lo tanto, la longitud de un paso según Leonardo es igual a la altura, y por consiguiente:

$$\text{long. de 1 paso según Leonardo} = H = 1,776m$$

Dado que para los romanos un *passus* equivalía a dos pasos de los actuales, entendemos aquí que un paso según Leonardo equivale a lo que actualmente denominamos “zancada”, compuesta ésta por el paso izquierdo seguido del paso derecho (o viceversa). Más precisamente, una zancada es la distancia lineal entre dos puntos de contacto consecutivos del mismo pie con el suelo, es decir la longitud determinada entre el punto de contacto de un talón del pie con el suelo y el siguiente punto de contacto del mismo talón con el suelo.

En otras palabras:

$$\text{long. zancada Hombre de Vitruvio} = 1,776m$$

Sin embargo, esto no concuerda con la medida del *passus* romano de 5 pies, equivalente al valor aceptado hoy de 1,48 m. El paso (zancada) de Leonardo era marcadamente superior al romano, con una notoria diferencia en metros del 16,6% en la longitud.

Si comparamos la zancada del Hombre de Vitruvio con los actuales, este valor tampoco responde a los medidos experimentalmente, a cadencia libre, por diversos investigadores contemporáneos (Tabla 6).

TABLA 6: LONGITUD DE ZANCADA

| Fuente             | Long. zancada (m) |
|--------------------|-------------------|
| Murray (1964,1960) | 1,57              |
| Chao (1983)        | 1,42              |
| Kadaba (1990)      | 1,41              |
| Perry (1992)       | 1,46              |

Destacamos que, en cambio, la longitud del *passus* sí es consistente con los valores de longitud de zancada medidos actualmente, aunque estos valores no se corresponden con los fijados para el Hombre de Vitruvio.

### Determinación de la longitud de zancada a partir de ecuaciones de regresión

Una estimación de la longitud de zancada puede obtenerse mediante ecuaciones de regresión que relacionen la estura con dicha longitud. A tal efecto, existen diversos estudios ninguno de los cuales parece ser fuertemente convincente. Sin embargo, lo que se destaca en todos ellos es que la longitud de zancada de marcha normal es siempre menor que la altura de la persona.

Dean (1965) propuso la siguiente ecuación que relaciona la longitud de zancada, adimensionalizada por la estatura, con la cadencia (cantidad de pasos por unidad de tiempo)<sup>(3) (15)</sup>:

$$\frac{\text{long. zancada}(m)}{\text{talla}(m)} = 0,008 \cdot \text{cadencia}(\text{pasos} / \text{min})$$

De acuerdo a la ecuación anterior, la cadencia del hombre vitruviano debería ser de 125 pasos/min, valor fuera del rango normal de marcha en adultos (jóvenes) según los aceptados actualmente, a tal punto que este valor de cadencia se manifiesta en la marcha de ancianos.

Si aprovechamos que:

$$\text{Cadencia (pasos/min)} = \frac{2 \cdot \text{velocidad (m/min)}}{\text{long. zancada (m)}}$$

Luego, la velocidad de su marcha rondaría los 111m/min, valor muy superior al de la velocidad media espontánea de marcha en adultos varones, que es de unos 86m/min, según estimaciones actuales <sup>(16)</sup>.

El problema está, precisamente, en suponer una relación entre la longitud de zancada y la talla de 1, lo que invalida la aplicación de la primera ecuación. Si en cambio suponemos una de cadencia de unos 108 pasos/min [15], para una talla de 1,776m obtendríamos una longitud de zancada de 1,534m; valor en el rango de los obtenidos experimentalmente, incluso próximo al *passus* que se utilizaba en la Roma de Vitruvio. Efectivamente, talla y longitud de zancada tienen valores apreciablemente diferentes. La propuesta de Leonardo en este caso no condice con lo que se observa.

Para el análisis comparativo, una segunda opción podría haber sido suponer una longitud de zancada de 1,776m con la misma velocidad de marcha de 82m/min, a partir de la cual la talla estimada ascendería a unos 2,40m. En otras palabras, sólo un hombre extremadamente alto podría tener una zancada tan larga, aunque a expensas de una muy baja frecuencia de paso, levemente superior a los 92m/min.

### Envergadura relativa

La envergadura es la longitud desde el punto distal del dedo medio de una mano (dactilion) hasta su homólogo en la otra mano medida por delante del torso, con los hombros en abducción, los codos extendidos y los miembros superiores paralelos al suelo. En el caso que nos atañe, la envergadura del hombre vitruviano es de 1,776m, dado que *la longitud de los brazos extendidos de un hombre es igual a su altura*. Esto se observa claramente en su dibujo, donde ambas longitudes coinciden con las de los lados del cuadrado.

La envergadura relativa (ER) mide la relación porcentual entre la envergadura y la talla de una persona.

$$ER = \frac{\text{envergadura (cm)}}{\text{talla(cm)}} \cdot 100$$

Aplicando los datos de Leonardo, la envergadura relativa del Hombre de Vitruvio da un valor de 100. Contrariamente, según M. Renedo citando a Eiben (1976) <sup>(17)</sup>, en el caso de los adultos este índice supera ligeramente el valor 100 en los varones, al igual que en

las mujeres entrenadas. Actualmente se acepta que la diferencia entre la envergadura y la talla puede alcanzar hasta los 4 cm en adultos varones en condiciones normales de crecimiento, si bien esto tampoco es una ley general. Por ejemplo el nadador, y múltiple campeón olímpico, Michael Phelps mide 1,93 m de altura con una envergadura relativa de aprox. 104, muy próxima al valor mínimo del síndrome de Marfan.

Comparativamente, si tomamos como referencia antropométrica el Phantom <sup>(18)</sup>, un “modelo metafórico” unisexuado, bilateralmente simétrico, que no tiene en cuenta etnia ni edad, con una estatura de 1,7018 m, y una envergadura de 1,7235 m, resulta una envergadura relativa de 101,2751.

Otro indicador interesante es la longitud relativa de la extremidad superior (LRES), que relaciona la longitud total de esta extremidad (acromion-dactilion) con la talla.

$$LRES = \frac{\text{long. total extremidad sup. (cm)}}{\text{talla (cm)}} \cdot 100$$

En el caso que nos ocupa, con una longitud total mínima de 68,76 cm se obtiene un LRES de 38,72; mientras que con un valor máximo de 72,35 cm:

$$LRES = \frac{72,35}{177,6} \cdot 100 = 40,74$$

Bajo este criterio, el hombre vitruviano resulta ser braquibraquial (Tabla 7), de extremidades superiores cortas, por lo que, en principio, el hombre ideal de Leonardo no posee una característica del biotipo de nadadores, basquetbolistas o tenistas de elite, aunque para una definición más precisa y confiable de sus posibilidades deportivas sería necesario realizar otros estudios antropométricos complementarios.

TABLA 7: COMPLEXIÓN DE VARONES EN FUNCIÓN EXCLUSIVAMENTE DE LA TALLA

| CATEGORÍA      | EXTR. SUPERIORES | LRES       |
|----------------|------------------|------------|
| Braquibraquial | Cortas           | hasta 44,9 |
| Mesobraquial   | Intermedias      | 45 - 46,9  |
| Macrobraquial  | Largas           | 47 ó más   |

Si bien la medición de este segmento corporal, a partir de la figura bidimensional, conlleva un no despreciable grado de error [10], nuestra estimación de la categoría es muy plausible si tenemos en cuenta que para la estatura indicada sería necesaria una LRES de 79,92cm, unos 7 cm mayor a la estimación máxima, para considerarse una persona mesobraquial

## Síntesis

- 1- En concordancia con lo sostenido por otros investigadores, no existe relación áurea entre la talla Hombre de Vitruvio y la altura de su ombligo, aunque la diferencia es menor al 2%.
- 2- Su estatura es de 1,776m, coincidente con el valor presente en trabajos previos de otros autores.
- 3- Su centro de gravedad corporal no coincide con la posición del ombligo, que es el centro geométrico de la circunferencia donde se encuentra circunscrito. Según Vitruvio, el ombligo es el punto central natural del cuerpo, pero esto no significa que sea su centro de gravedad.
- 4- Su peso ideal estimado es de 70,70 kgf.
- 5- Aceptando que posee el peso ideal y que coincide con el calculado, su índice de masa corporal sería de unos 22,415 kgf/m<sup>2</sup>, con bajo riesgo de desarrollo de enfermedades cardíacas. Si bien el valor de su peso ideal puede variar de un modelo a otro, esto no afectaría la situación de “peso normal”, que podría extenderse hasta un valor cercano a los 79 kgf.
- 6- Su complexión corporal es mediana.
- 7- Según Leonardo, su longitud de zancada es igual a su estatura de 1,776m. Esto no concuerda con los patrones conocidos de marcha, en los que la longitud de zancada es apreciablemente menor que la estatura. Una zancada tan larga requeriría de una persona extremadamente alta. Por otro lado, si aceptamos la relación 1 a 1, y simultáneamente suponemos que se desplaza a una velocidad humana media de unos 82m/min, su cadencia debería ser comparativamente baja, unos 92 pasos/min, contra los 100-120 habituales en marcha normal. Asimismo, una longitud de paso de 0,888m con la altura de cadera del hombre vitruviano demandaría un ángulo de flexo-extensión de esta articulación notoriamente grande y/o la acción de otros mecanismos de optimización de la marcha para reducir la amplitud de oscilación del centro de gravedad y a su vez el consumo de energía.
- 8- Su envergadura, según el pintor, equivale a su estatura. En tal caso, el cuerpo humano ideal propuesto sería lo que actualmente denominamos braquibraquail, es decir de extremidades superiores cortas.
- 9- El cuerpo humano ideal así constituido no se corresponde, en varios aspectos, con las características biomecánicas y antropométricas del hombre medio. En todo caso, la idealidad planteada nunca podría ser una idealidad universal, en tanto que las características particulares asignadas al Hombre de Vitruvio le permitirían realizar algunas actividades con gran destreza y otras, en principio, no.
- 10- Un punto aparte merece el análisis de afirmaciones como la siguiente: “Estas teorías y medidas fueron originalmente descubiertas por un arquitecto llamado Vitruvio”<sup>(19)</sup>. Precisamente, el presente trabajo se ha propuesto dejar en evidencia que las teorías y medidas de Vitruvio no son

descubrimientos, no representan una realidad exterior verdadera ni un ideal real al que acercarse. En otras palabras, estas teorías y medidas no son otra cosa que creaciones humanas con intereses particulares.

## Limitaciones

Un pintor es un artista, no representa la realidad tal cual es. Está influido por la época, sus ideales, sus intereses, sus pasiones, su historia previa, etc. Si bien ha debido pasar mucho tiempo hasta que las obras de arte dejaron de valorarse como copias fieles o idealizaciones de la realidad, hasta incluso ser anulada en el siglo XX, “el artista ha querido siempre idealizar la realidad”<sup>(20)</sup>. Desde esta perspectiva, estudiar y producir información a partir de una obra artística - sea mediante Biomecánica o cualquier otra disciplina- siempre es una aproximación parcial, con objetivos y resultados acotados.

La ciencia tampoco representa la realidad tal cual es. También esta influida por la sociedad y la época, por intereses políticos, económicos, culturales, religiosos. Como disciplina científica, la Biomecánica brinda modelos, no verdades definitivas. En todo caso, son estimaciones más o menos precisas. De la misma manera que en Astronomía se estiman distancias planetarias, en Biomecánica podemos estimar la posición del centro de gravedad de una persona mediante una imagen. Estas estimaciones siempre están sujetas a mejoras en base a nuevos modelos, mediciones experimentales más precisas, consideración de un mayor número de variables involucradas, etc.

Si bien estimar indica una falta de precisión, en ciencias no podemos hablar de mediciones exactas. Desde este punto de vista, toda metodología que permita generar nuevo conocimiento, discutible y provisorio, puede resultar provechosa. Todo conocimiento biomecánico del pasado es inexacto, y lo es más si los modelos empleados se sustentan en datos derivados de muestras actuales o de estándares internacionales. Partir de datos más próximos a los reales de la población de la época y sociedad en cuestión (estudiando esqueletos, etc.) seguramente arrojará resultados más confiables. Sin embargo, esto no invalida los procedimientos empleados, aunque los limita. Actualmente, la Biomecánica aporta información sobre personas desaparecidas (por ejemplo a causa de dictaduras militares) utilizando muchas veces datos de poblaciones diferentes a la de la persona buscada, lo cual es sin duda una limitación, pero también es un aporte para contrastarse con resultados obtenidos por otras especialidades de la Biomecánica o disciplinas en general.

La estimación es un importante mecanismo de las ciencias, que requiere de otros estudios complementarios. En este sentido, muchos de los

resultados que hasta aquí hemos expuesto son estimaciones, y como tales no deberían ser sacadas de su contexto y del objetivo primordial del presente trabajo, que es poner en evidencia que la Biomecánica dispone de interesantes y específicos métodos y procedimientos para el análisis de personas, sociedades, etc. a partir de obras de arte, y que sus resultados nunca deberían utilizarse separados de otras técnicas y teorizaciones.

Otra limitación podría ser la de haber identificado el homo bene figuratus (hombre bien formado) al hombre ideal, y este a su vez con el hombre medio. Más allá de la no existencia de un hombre medio, aun si éste existiera no tendría por qué coincidir con el hombre ideal.

Por otro lado, en diversos análisis propuestos en este trabajo ha sido necesario conocer el valor de un dato externo, en nuestro caso la talla del Hombre de Vitruvio en codos. Otros podrían ser el peso de la persona al momento cercano de retratarse o la escala del tamaño de una escultura. Es claro que en otros casos puede no disponerse de esta información adicional, pero en algunas ocasiones podría ser obtenida por comparación con la altura del marco de una puerta aún existente de un palacio, la altura de una mesa, alguna vestimenta que se conserve, algún segmento o hueso del cuerpo, por mencionar algunas posibilidades.

Sólo a modo de ejemplo, en la lápida de Daniel Lambert (Figura 6) puede leerse:



Fig 6: Retrato de Daniel Lambert

*In Remembrance of that Prodigy in Nature.  
DANIEL LAMBERT.  
a Native of Leicester:  
who was possessed of an exalted and convivial Mind  
and in personal Greatness had no Competitor  
He measured three Feet one Inch round the Leg  
nine Feet four Inches round the Body  
and weighed  
Fifty two Stone eleven Pounds!  
He departed this Life on the 21st of June 1809 <sup>(21)</sup>,*

Un tema que consideramos importante, en el estudio que hemos realizado, se refiere al concepto de “peso

ideal”, introducido a principios del siglo XX por la compañía estadounidense de seguros de vida Metropolitan Life Insurance Company (1943), y a su ligazón con la expectativa de vida máxima. Al respecto, existen críticas que sostienen que dado que “los verdaderos móviles de la investigación fueron intereses financieros y no medicinales”<sup>(22)</sup>, son discutibles los valores que se consideran dentro de los parámetros de normalidad. Aquí lo que se pone en tela de juicio es el propio concepto de peso ideal, convirtiéndose en una limitación para el análisis, de forma tal que no sólo debemos ser precavidos con los modelos y las mediciones, sino también con los conceptos y las teorías que utilizamos. Por nuestra parte, asumimos la validez del concepto en base al sustento otorgado actualmente por la comunidad científica y la OMS <sup>(23)</sup> <sup>(24)</sup>, entendiendo que esta es una validez relativa y que en un futuro pueda no ser así.

En resumen, los resultados presentados en este trabajo son provisorios y seguramente variarán con nuevos conocimientos científicos. Están condicionados por los modelos y por las ecuaciones de regresión empleadas, lo cual no debería opacar el valor de la ciencia, en este caso la Biomecánica, para el estudio de obras de arte, sino todo lo contrario, generar nuevas búsquedas y realizaciones teóricas que respondan con mayor precisión a los objetivos planteados. Entendemos que aunque las estimaciones nunca son exactas, es posible minimizar los errores cometidos mediante la apropiada selección y adecuado empleo de técnicas específicas para el registro y la interpretación de los datos.

### Consideraciones finales

Luego de los análisis establecimos que, en principio, las variables estudiadas indican que hoy no podría existir un hombre ideal, con las características antropométricas del Hombre de Vitruvio, que caminará normalmente con la longitud de paso que Leonardo indica, pero sí es plausible una contextura como la representada en su Studio para un peso en torno a los 70,7 kgf.

Consideramos que el trabajo ha mostrado ser un ejemplo provechoso para la obtención de información de personajes presentes en pinturas, entendiéndose que las aplicaciones de la Biomecánica pueden extenderse también a otras artes como la escultura y la fotografía. De este modo, este tipo de estudios puede utilizarse para producir conocimiento no sólo de personas que vivieron en momentos históricos anteriores, sino también sobre las sociedades en las que han vivido, salvando las limitaciones propias que hemos expresado anteriormente.

Un aspecto que vemos como valioso es que los resultados aquí presentados pueden ser discutidos por otros investigadores, tanto para corroborarlos, como para rechazarlos o criticarlos. La cuantificación reduce, en algún sentido, la ambigüedad de las imprescindibles

descripciones verbales y escritas, dando la posibilidad de comparar datos precisos.

Si bien la Biomecánica, como otras disciplinas científicas, puede aportar visiones complementarias (o contrapuestas) para analizar y/o producir características presentes en un cuadro, una foto o una escultura, está muy claro para nosotros que *una obra de arte no es otra cosa que una obra de arte*, una expresión humana, profunda, que se ve reflejada de distinta manera en las diferentes personas que se acercan a ella, que la perciben y aprecian de forma única según las particularidades propias de cada uno. Por ello, en ningún caso defenderíamos la idea de que es posible explicar completamente –y menos aún apreciar vivencialmente– una obra de arte desde la Biomecánica, como tampoco puede serlo desde ninguna otra disciplina.

Una pregunta que va más allá de lo que la Biomecánica puede ofrecer –y que nos queda como flotando– se refiere a la longitud del pie. ¿Por qué Leonardo habrá elegido cambiar los 6 pies de Vitruvio por el valor de 7 pies para la estatura? ¿Será, como suponen algunos autores, porque tal vez lo consideró más próximo a su experiencia real? ¿Tendrá algo que ver con su relación con el “codo sagrado”, de una longitud mayor al codo que hemos usado? Según Paulo Arieu, el rabino portugués Judá León (1665) cita a Maimónides (edición danesa del Talmud) que lo cifra exactamente en 1,75 pies, y por lo tanto 4 codos sagrados equivalen a 7 pies. Pero si así fuera, habría contradicción con otras relaciones corporales mencionadas.<sup>(25)</sup>

Finalmente, tenemos presente que el interés de Vitruvio no consistía en obtener las características antropométricas de un hombre ideal, sino que su preocupación se centraba en dar sustento teórico filosófico a las construcciones de grandes edificios. El caso analizado, como hemos dicho al principio del trabajo, tiene la finalidad de actuar como “ejemplo” de lo que podría hacerse en otros casos.

### Perspectivas futuras

Actualmente estamos trabajando sobre el análisis antropométrico comparativo del Hombre de Vitruvio con el Phantom, y la comparación de longitudes de segmentos corporales de acuerdo con otros modelos como los de Drillis, Contini y Barter. Posteriormente pretendemos aplicar algunos de estos estudios para analizar la conformación corporal de las muñecas Barbies y, en lo posible, obtener conclusiones en torno a la salud.

Dejamos abierta la posibilidad de analizar en profundidad cómo sería la marcha del Hombre de Vitruvio, su cinemática, su cinética y los mecanismos de optimización para reducir su consumo energético.

Otro trabajo en vista es la estimación de la posición del centro de gravedad en esculturas, de tal forma de comparar si la estabilidad o inestabilidad que se aprecie en la figura se corresponde con los criterios de estabilidad requeridos por cuerpos reales, tal como la proyección del centro de gravedad sobre la base de soporte. Esto permitirá, además, concluir la consecuente posibilidad o no de determinadas posturas.

Nos resulta interesante también abrir la posibilidad de un estudio biomecánico del Discóbolo, estableciendo por ejemplo si su envergadura es consistente con la de los lanzadores de disco actuales.

Finalmente, consideramos que la Biomecánica puede abrirse un espacio también en el campo de la **Historia**, extendiendo aún más las aplicaciones de esta disciplina., que en un primer momento puede aparecer sólo ligada a los fenómenos mecánicos presentes en seres vivos. De hecho, algunos estudios de Biomecánica en los campos antropológico-forense y de las Artes e imágenes, se podrían muy bien utilizar para estudios históricos.

**NOTA 1:** Existe, en general, una pequeña diferencia entre el valor numérico de la masa (en kg) y el peso corporal (en kgf). La diferencia de peso máxima entre el polo y el ecuador es de 0,005 kgf por cada kilogramo fuerza de peso del objeto. En 70 kgf la diferencia sería de 0,35 kgf, equivalente al 0,5% del peso total. Para este artículo, los cálculos del IMC fueron realizados con el peso, tal como comúnmente se hace, y en concordancia con lo mencionado por Quetelet (1833)<sup>(26)</sup>. En este caso, tal vez sería más adecuada la denominación de IPC (Índice de Peso Corporal)

**NOTA 2:** Días antes de enviar este trabajo ya terminado, nos hemos enterado de la publicación de *Arts Biomechanics. An Infant Science*<sup>(27)</sup>, a la cual no hemos tenido acceso aún.

### Referencias

- 1- Franco Taboada, Juan Manuel. “La cuestión del centro de la figura humana a partir del 'homo bene figuratus' de Vitruvio”. En: Boletín Académico. Escola Técnica Superior de Arquitectura da Coruña. Nº 22: 74-83. Universidade da Coruña. (1998).
- 2- Muñoz, J; Castro, H; Holtz, W; Muñoz, P; Vinagre, A. “Aplicación de conceptos y procedimientos de la Biomecánica para el análisis de obras de arte: El Hombre de Vitruvio según Leonardo da Vinci”. En: Libro de resúmenes de la XII Reunión de la SUF y 96 Reunión Nacional de la AFA. Sesión de pósters. Montevideo. (2011).
- 3- Instituto de Biomecánica de Valencia. Biomecánica de la marcha humana normal y patológica. Valencia. (1994).
- 4- Daniel J. Schneck. “Welcome to a New Journal. Editorial”. In: Journal of Forensic Biomechanics. Vol. 1. Ashdin Publishing. (2010).

- 5- Giulio Carlo Argan. El arte moderno: del iluminismo a los movimientos contemporáneos. Ediciones Akal. 2ed p.147. Madrid. (1998).
- 6- Prat, J; Molina, C; Solé, R; Dorico, C (eds). La obra completa de Leonardo. En: Maestros de la Pintura. Origen. Barcelona. (1989).
- 7- Anna Suh, H. Leonardo da Vinci. Cuadernos. Parragón Books Ltd. Indonesia. (2006).
- 8- Marcowsky, G. "Misconceptions about the Golden Ratio". In: The Collage Mathematics Journal. Vol 23, nº1. (1992).
- 9- Carlos Sanchez-Montaña. Actas del XI Congreso de Expresión Gráfica Arquitectónica. Congreso Internacional de Expresión Gráfica Arquitectónica. Funciones del Dibujo en la Producción Actual de Arquitectura Num. 11. pp. 479-486. Sevilla y Sanlúcar de Barrameda. Universidad de Sevilla. (2006). [On line]: <http://www.arqweb.com/vitrum/autor.asp>
- 10- J. C. Muñoz, R. Cassibba, H. Castro, W. Holtz, P. D. Muñoz, A. Vinagre. "Errores en la determinación del centro de gravedad del cuerpo humano mediante el stick figure (2D)". En: Anales AFA. Vol 21-pp. 251-258. Rosario. (2009).
- 11- M. Gutiérrez Dávila. Biomecánica Deportiva. Editorial Síntesis. Madrid. (1999).
- 12- Vitruvii. Iterum edidit Velentinus Rose [Bibliotheca scriptorum Graecorum et Romanorum Teubneriana]. De Architectura, Libri Decem. Lipsiae: Teubner. (1899). [On line]: <http://www.archive.org/texts/flipbook/flippy.php?id=vitruviidearchi00rosegoog>
- 13- D. Sánchez. "Andrés Vesalio y Leonardo da Vinci, dos artistas viendo al hombre durante el Renacimiento". En: Revista de la Sociedad Venezolana de Historia de la Medicina. Volumen 56, (1-2):85-94. (2007).
- 14- Facultad De Ingeniería Industrial. Laboratorio De Producción. Antropometría estática. Protocolo. Laboratorio de Condiciones de Trabajo. Escuela colombiana de ingeniería Julio Garavito. (2009). [On line]: <http://copernico.escuelaing.edu.co/lpinilla/www/protocolos/ERGO/ANTROPOMETRIA%20ESTATICA%202009-1.pdf>
- 15- Dean G A. An analysis of the energy expenditure in level and grade walking. Ergonomics. (1965).
- 16- J. Perry, J. M. Burnfield. Gait Analysis. Normal and Pathological Function. Second edition. pp. 5 y 491. Snack. Incorporated. USA. (2010).
- 17- Renedo, M. et al. "Índices antropométricos de proporcionalidad corporal de jugadores cadetes y juveniles de rugby". En: Revista de la Federación Española de Medicina del Deporte y de la Confederación Iberoamericana de Medicina del Deporte. Vol XXIII. Nº113: 195-204. FEMEDE. (2006).
- 18- Ross WD, Wilson NC. "A stratagem for proportional growth assessment. Children in Exercise". In: Hebbelinck M, Borms J, eds. ACTA Paediatrica Belgica (Suppl 28): 169-182. (1974).
- 19- Da Vinci, El Genio - El Hombre del Vitrubio. [On line]: [http://www.youtube.com/watch?v=JX-\\_nmAusFI](http://www.youtube.com/watch?v=JX-_nmAusFI)
- 20- Bruno Ernst. El espejo mágico de M. C. Escher. Taschen Verlag. Köln. (1994).
- 21- [On line]: [http://en.wikipedia.org/wiki/Daniel\\_Lambert](http://en.wikipedia.org/wiki/Daniel_Lambert)
- 22- Udo Pollmer, Andrea Fock, Ulrike Gonder, Karin Haug.. ¡Buen provecho! El lado indigesto de la alimentación sana. Digi ediciones. Buenos Aires. (2002). [On line]: <http://webs.uolsinetis.com.ar/nancy/provecho.html>
- 23- Comité de Expertos de la OMS sobre el estado físico: El estado físico: uso e interpretación de la antropometría. Serie de informes técnicos, 854. Ginebra. Organización Mundial de la Salud, (1995).
- 24- Comité de Expertos de la OMS sobre la obesidad: Obesity: preventing and managing the global epidemic. Report of a WHO consultation on obesity. WHO technical report series, 894. Ginebra (Suiza): Organización Mundial de la Salud, (2000).
- 25- Paulo Arieu. "El problema del codo: el módulo sagrado" Extraído de "Génesis de las medidas de El Escorial. Herodoto y la cuestión del codo bíblico". En El Escorial: arte, ciencia y matemáticas., Madrid, en imprenta. (2009). [On line]: <http://sapiens.ya.com/jrcuadra/jrcodo.htm>
- 26- A. Quetelet. Recherches sur le poids de l'homme aus différents ages. Bruxelles. Hayez. (1833).
- 27- G. Shan; P. Visentin. Arts Biomechanics. An Infant Science. Nova Publishers. (2010).