

## **PRESENTE Y FUTURO DE LA MORFOLOGÍA CUANTITATIVA EN LOS ESTUDIOS DE BIOCENCIAS**

*Marcos Manzanares*

Instituto Nacional de Bioingeniería (INABIO-UCV), Universidad Central de Venezuela. Av. Miguel Otero Silva, entre 3° y 4° transversal, Urb. Sebuacán, Parroquia Leoncio Martínez, Municipio Sucre, Caracas 1071, Venezuela.  
marco.manzanares@ucv.ve.

### **RESUMEN**

La relevancia que tiene el análisis, procesamiento y visualización de imágenes en las Biociencias es cada día más notable, evidenciada en el incremento de los grupos de investigación y de las publicaciones, a la par de una destacada inversión para el desarrollo de nuevos dispositivos tecnológicos. No obstante, a pesar de estos adelantos, la estructura de análisis se mantiene en el clásico reconocimiento de patrones, con el fin de comparar, organizar e interrelacionar las estructuras de interés. Como disciplina, la Morfología Cuantitativa se ha desarrollado en estas áreas, aproximando una estructura mediante un método matemático, analizándola de acuerdo a estudios estadísticos y obteniendo resultados relevantes en el marco de los diferentes estudios de investigación, proyectados no sólo a la explicación de un proceso, sino también al desarrollo de mecanismos con fundamento tecnológico que faciliten el procedimiento de análisis e interpretación de datos morfológicos. Esta revisión ahonda en los esquemas de adquisición de datos, análisis, visualización e interpretación de los resultados, con la finalidad de describir el panorama de los estudios en morfología cuantitativa en el presente y en los próximos años, al examinar el desarrollo de investigaciones prácticas y complejas, que involucren la consideración de múltiples factores, como la abstracción matemática, el uso de las herramientas computacionales, la selección de estadísticos y el desarrollo de conclusiones objetivas.

**Palabras clave:** Morfología Cuantitativa, Manejo de datos, Análisis Estadístico Multivariado, Significado Biológico, Biociencias.

### **Present and future of quantitative morphology in biosciences**

#### **Abstract**

The relevance of the analysis, processing and visualization of images in Biosciences is conspicuous, evidenced by the increase in research groups and publications, along with a significant investment in the development of new technological devices. Despite these advances, the structure of analysis is maintained in the classical recognition of patterns, in order to compare, organize and interrelate the structures of interest. Quantitative Morphology as a discipline has been developed in these areas, approximating a structure by a mathematical method, analyzing it according to statistical studies and obtaining relevant results in the framework of the different

research studies, projected not only to the explanation of a process, but also to the development of mechanisms with technological basis which facilitate the procedure of analysis and interpretation of morphological data. This review delves into the schemes of morphological data acquisition, analysis, visualization and interpretation of the results, with the purpose of describing the panorama of studies in quantitative morphology in the present as well as in the coming years, by examining the development of practical investigations and complex, involved by the consideration of multiple factors, such as mathematical abstraction, the use of computational tools, the selection of statistics and the development of objective conclusions.

**Keywords:** Quantitative Morphology, Data analysis, Multivariate statistical analysis, Biological meaning, Biosciences.

Los estudios de transformación de imágenes tienen un origen que es difícil de precisar, al estar en gran medida influenciados por las diferentes manifestaciones artísticas. No obstante, el origen de la cuantificación de la forma para su manipulación y uso se remonta al trabajo de D'Arcy Thompson, *Sobre el Crecimiento y la Forma* (Thompson, 1917), el cual recientemente ha cumplido un centenario de su publicación. La visión que tuvo Thompson en su momento para plasmar los fundamentos matemáticos necesarios en deformar una imagen de una estructura biológica, con la mera finalidad de realizar un análisis descriptivo, ha sido de tal relevancia que hoy día lo observamos en las bases metodológicas que se siguen en las disciplinas CTIM (ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas).

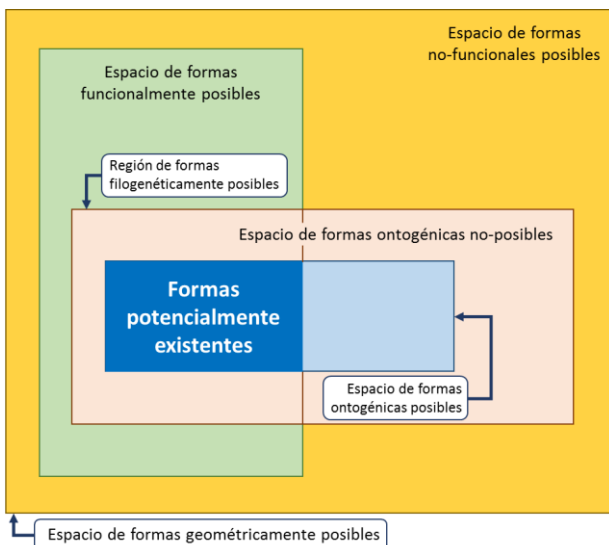
En este manuscrito se presenta un resumen de las tendencias actuales en la adquisición y procesamiento de datos morfológicos con fines interpretativos, con el interés de identificar el patrón general de estudio, al igual que la de destacar los principales inconvenientes en su manejo, estructura y fundamento.

## **LA ESTRUCTURA DE LOS ANÁLISIS MORFOLÓGICOS EN LAS BIOCENCIAS.**

**La selección del carácter.** La morfología cuantitativa describe un grupo de técnicas de procesamiento de imágenes, de gran relevancia en el ámbito de la ciencia y la tecnología. La finalidad que tiene esta colección de estudios es común, al realizar descripciones, interpretaciones de acciones y procesos, establecer relaciones y reconstruir etapas de desarrollo a partir del análisis de lo que se conoce como forma. En las biociencias, la definición del término forma se ha mantenido estable en el desarrollo de los estudios de morfología cuantitativa, como así se puede observar en los trabajos de Bookstein, (1978, 2014), Adams *y col.* (2004, 2013), Slice (2005), Mitteroecker *y col.* (2013) y Klingenberg (2016), refiriéndose grosso modo en su abstracción, como la representación numérica de una estructura en un morfoespacio. El

acuerdo conceptual del término se escapa, no obstante, en el desarrollo práctico de los estudios morfológicos, en donde se emplea el término desde la perspectiva funcional y descriptiva. Autores como Mitteroecker y Gunz (2009) comenzaron a dilucidar la terminología en la morfología cuantitativa y, en específico, en la morfometría geométrica, al identificar los términos de mayor conflictividad, estableciendo una explicación racional recopilada en diversos glosarios de términos, siendo el más completo el iniciado por Slice *y col.* (1996), el cual se encuentra en permanente revisión por la comunidad de investigadores en el área de la Morfología Cuantitativa y que se agrupa en la red MORPHMET (<http://www.morphometrics.org/home/morphmet>), mantenida bajo la curaduría de uno de sus autores (F. Rohlf), desde el sitio web de Morfometría en la Universidad Estatal de Nueva York en Stony Brook (SUNY Stony Brook, <http://life.bio.sunysb.edu/morph/index.html>).

No obstante, la comprensión de la forma no sólo se centra en su caracterización, sino en la interrelación que existen con los componentes que integran las estructuras biológicas. En este aspecto, la forma debería contener, además de la información de las posibles restricciones que delimitan la disparidad (como bien lo explica en detalle McGhee, 2015, y se puede detallar en la Figura 1), las relaciones potenciales con estructuras no consideradas en un determinado estudio, pero relevantes en el aspecto evolutivo, al ser parte de procesos selectivos mediante módulos de caracteres (un concepto nacido en los estudios de virus y bacterias, pero que se ha desarrollado con el estudio de organismos multicelulares, como lo resumen Tuomi y Vuorisalo, 1989a, 1989b; Schlosser y Wagner, 2004 y Godfrey-Smith, 2009).



**Figura 1.** La disparidad explicada como un esquema de restricciones físicas y biológicas, dadas para un morfoespacio hipotético n-dimensional, considerando que estas presiones se encuentran anidadas. El espacio resultante de la intersección del conjunto indica el espacio de formas potencialmente posibles. Modificado de McGhee, 2006.

La forma, por tanto, tiene el carácter de ser un quantum dentro de un espacio complejo, el cual puede estar conformado desde el caso más sencillo, representado por la simple asociación con otra forma, hasta la delimitada por el propio organismo, pasando por la relación establecida a través de secciones modulares. Este concepto tiene como fundamento el trabajo de Olson y Miller (1958), el cual ha realizado una síntesis de ideas para describir la integración morfológica, al realizar una exploración y propuesta de métodos para su estudio, tanto en la sistematización de los análisis como en la revisión de estadísticos para su cuantificación. Igualmente, este trabajo fue pionero en la conformación de una estructura de estudio moderno en la cuantificación morfológica, la cual se resume en la Figura 2.



**Figura 2.** Esquema general de análisis en los estudios de Morfología Cuantitativa, en donde se incluyen los mecanismos de comprobación en cada etapa del estudio. Una vez se selecciona una estructura biológica a caracterizar, se elige el método con el cual se adquieren los datos morfológicos, con la respectiva verificación del mecanismo más conveniente, al igual que las condiciones del equipo empleado. Los datos morfológicos se reducen en función al modelo de abstracción numérica seleccionada, previa comprobación de la estructura y la variabilidad de la muestra en cuestión. Los datos son procesados mediante una selección de técnicas estadísticas, los cuales precisan de ser verificados en función a su correspondencia biológica, con lo cual se obtiene un análisis de formas. Un esquema extendido de análisis puede ser consultado en Marcus y Corti (1996).

En términos generales y de acuerdo a lo que se plantea, de la forma se obtienen entonces caracterizaciones particulares como de interrelación. Sin embargo, esto es un hecho si se cumple: (1) una correcta elección del método para la captación de datos (por ejemplo, si se elige un método que considere una mejor resolución o, por el contrario, ponderar un veloz procesamiento de resultados), (2) una cuantificación adecuada (esto incluye tanto la selección de la estructura a medir como el método de muestreo de los organismos de estudio) y (3) una apropiada selección de técnicas estadísticas para el análisis de datos morfológicos. En la actualidad, existen

mecanismos y estrategias que trabajan sobre estos condicionamientos y que permiten establecer un análisis de forma adecuado, bien sea con fines descriptivos, comparativos y de relación. Es decisión del investigador la selección de una estrategia acorde a sus planteamientos y que sea a su vez congruente con la estructura de los análisis cuantitativos de la forma.

## **ADQUISICIÓN DE DATOS MORFOLÓGICOS**

Una vez seleccionado una estructura a analizar, el investigador se enfrenta al cuestionamiento sobre cuál método constituye el ideal para obtener datos morfológicos. El interés por examinar nuevas técnicas de digitalización y pre-procesamiento de imágenes es un tema recurrente, pues resulta cónsono con el carácter de exploración que tiene cada investigación. Sin embargo, de las técnicas tradicionales, como en el uso de reglas, calibres y goniómetros, se puede obtener información relevante para caracterizar, comparar y relacionar.

La selección de las técnicas de adquisición de datos parte, por ende, de la pregunta que establezca el investigador. En determinados casos, los resultados que el análisis de una estructura arroje son relevantes mediante el uso de mediciones escalares, mientras que en otros se puede ameritar el uso de herramientas complejas, que proporcionen información de distribución espacial, aspecto conformacional e interrelación. Pero su selección no solo radica en el objetivo de estudio, sino también en la información que proporcione el componente biológico, bien sea en relación a la estructura en análisis como en la selección de muestras que se establezca.

**Sobre la selección del grupo de estudio.** En relación al punto en discusión, Bookstein (2016) se refiere a los estudios de caracterización, en donde se persigue describir la significancia biológica de la forma. Entendiéndose como método con un componente de análisis estadístico, los resultados obtenidos a través de los estudios de morfología cuantitativa tendrán una determinada significancia estadística, la cual no es necesariamente equivalente a la significancia biológica. Eso se conoce, en términos generales, en los estudios ecológicos (como bien lo refiere Martínez-Abraín, 2008). Es por tanto relevante que, luego de la selección del carácter y su identificación en el contexto corporal, se determine la naturaleza de la muestra seleccionada para el análisis, la cual debe ser representativa de la población (no sesgada), consistente numéricamente (siendo Bookstein, 2014; 2016) quien recientemente detalló la relación entre el tamaño de la muestra y los estudios en morfometría geométrica) y referente de su variabilidad. No obstante, las condiciones de evaluación de la muestra pueden verse limitadas por la ocurrencia de ejemplares. Casos típicos se observan con especies raras, muestras fósiles o colecciones

biológicas incompletas. En tal caso, de manera análoga al trato de la muestra, los ejemplares exhiben estructuras las cuales presentan dos resultados, uno numérico, expresado en la forma, y uno del tipo lógico, definido por caracterizaciones. Dependiendo de las condiciones que se establezcan en el estudio, tanto uno como otro resultado pueden ser relevantes para conducir a la resolución de un objetivo particular, aunque este escenario sólo permitiría al estudio de la forma establecer consideraciones sobre las características de los organismos, las cuales pueden resultar específicas y no un patrón dentro del grupo en estudio.

**La digitalización de las formas biológicas.** El procedimiento de adquisición de datos, una vez se conozcan los alcances que tengan tanto el objetivo de la investigación como el grupo de estudio, constituye una etapa fundamental en el transcurso de descripción de la forma biológica en los organismos. Adicional al uso de herramientas tradicionales (que tienen también una semblanza en herramientas digitales, por ejemplo), fundamentales para la evaluación de longitudes, áreas y dimensiones volumétricas, los métodos de digitalización de imágenes en dos y tres dimensiones (2D, 3D) son tan variables como numerosos. Más que referirse a cada uno de ellos, lo importante es conocer cómo estos coexisten en relación a su funcionamiento y propósitos en los estudios de morfología (Tabla 1).

**Tabla 1.** Comparación de métodos de digitalización de estructuras para la captura de datos biológicos, en función al tipo de análisis espacial precisado.

		<b>Tipos de métodos de captura</b>	
		<b>Procesamiento manual</b>	<b>Procesamiento automático</b>
<i>Bidimensional</i>	1. Mediciones estándar (longitud, superficie)	1. Auto-detección de puntos de control	1. Auto-detección de puntos de control
	2. Fotografías (digitales, rayos X, etc.)	2. Digitalizaciones de contornos	2. Digitalizaciones de contornos
<i>Tridimensional</i>	1. Mediciones estándar (longitud, superficie, volumen)	1. Auto-detección de puntos de control	1. Auto-detección de puntos de control
	2. Composición de fotografías (transformación espacial de fotografías en serie)	2. Digitalizaciones tridimensionales de contornos y superficies (escáner láser, fotografías de barrido, tomógrafos, etc.)	2. Digitalizaciones tridimensionales de contornos y superficies (escáner láser, fotografías de barrido, tomógrafos, etc.)

No existen condiciones jerárquicas por las cuales se pueden tomar decisiones de elección de un determinado método de adquisición de datos. Por consenso, el investigador trata de poder explicar una estructura mediante la simplificación metódica, esto es, tratando de emplear el menor número de elementos posibles, con los cuales se pueda abstraer lo observado. Esta visión facilita el manejo de grandes volúmenes de datos, algo que es frecuente cuando se analizan muestras de individuos numerosas, como en detecciones biométricas de seguridad o

reconocimiento veloz de objetos mediante patrones. Los ajustes de reducción dimensional que se realicen sobre una estructura morfológica y que faciliten su proceso de análisis, deben cumplir con el criterio de coplanaridad, la cual representa la proyección con mínima deformación sobre un plano (Zelditch *y col.*, 2004; Claude, 2008).

Aumentar la certidumbre de la estructura durante el proceso de digitalización involucra manejar un mayor número de datos, esenciales para poder caracterizar y describir patrones en grupos pequeños, incluso en procesos de reconstrucción y simulación sobre modelos individuales. De igual forma, esto también facilita el manejo comparativo de estructuras dependientes de la escala, en donde se desea describir tanto los aspectos generales como los detalles en los elementos morfológicos.

El desarrollo actual de técnicas y equipos para la caracterización de estructuras incluye la ocurrencia de imágenes tomadas mediante tomógrafos, escáneres y resonadores (Liang y Lauterbur, 1999; Webb, 2003; Salditt *y col.*, 2017). De igual forma, los algoritmos empleados para su caracterización suelen incluir medidas de deformación necesarias para realizar los ajustes necesarios durante el proceso de análisis de datos. En la actualidad, con la inclusión de estas técnicas en los estudios médicos, biomecánicos y biométricos, estos algoritmos de captura de datos precisan de la inclusión de meta-datos, relacionados con características del objeto, estructura y/o individuo (mediciones de longitud, superficie, volumen, composición, coloración, patrones, etc.), al igual que la automatización plena, frente al manejo de grandes volúmenes de datos (Ejiri *y col.*, 1984; Mann, 2001; Su, 2003; Loy y Slice, 2010; Keyvani y Strom 2013; Hermann, 2016).

## **APROXIMACIONES NÚMERICAS**

**La abstracción de la forma.** Una vez se digitalizan las estructuras, el paso siguiente corresponde a la abstracción numérica. Esto se hace como parte del proceso de sistematización metódica, previamente referido. Los métodos empleados para la abstracción son tan diversos como los métodos para la obtención de las imágenes. Estos se encuentran resumidos en la Tabla 2.

En términos generales, la abstracción reduce la información topológica a un conjunto de valores estadísticamente manejables. Esta información es comparable en la medida que estos se encuentren estandarizados. Los primeros estudios de forma en las Biociencias se desarrollaron con descripciones de medidas puntuales, como longitudes, superficies y volúmenes. Luego de esto, se inició el estudio de las conformaciones con estandarizaciones de tamaño, comparando posiciones espaciales de puntos

de control obtenidos de las propias estructuras, desarrolladas en espacios euclídeos (Bookstein, 1978). Esta caracterización cambió con la inclusión de la metodología propuesta por Kendall (1977, 1984), donde se parte de una estandarización de tamaño y localización, con el fin de comparar variaciones de las conformaciones, cuya semblanza espacial se ubica en una variedad finito-dimensional Riemanniana, correspondiente a una variedad diferenciable y tangencial en un espacio de Kendall (Kendall, 1989; Le y Kendall, 1993; Rouahi *y col.*, 2017).

**Tabla 2.** Comparación de métodos de abstracción de forma en función al tipo de análisis espacial precisado.

		Tipos de métodos	
		Discretos	Continuos
Tipos de análisis	Bidimensional	1. Morfometría tradicional (por categorización)	1. Morfometría tradicional
		2. Discretización por segmentación	2. Aproximaciones de Fourier
		3. Morfometría geométrica	3. Curvas de Bézier
	Tridimensional		4. Aproximaciones geométricas
		1. Morfometría tradicional (por categorización)	1. Morfometría tradicional
		2. Discretización por segmentación	2. Aproximaciones de Fourier
	3. Morfometría geométrica	3. Curvas de Bézier	
		4. B-surfaces	
		5. Aproximaciones topológicas	

Los puntos de control, como parte de un método de estudio, permiten tener una aproximación eficaz en la forma de una estructura. Sin embargo, frente a variaciones en curvaturas y extensiones, se propusieron alternativas en el análisis. Partiendo de los puntos de control se pueden obtener discretizaciones por segmentación mediante triangulaciones, como las de Voronoi (Lee *y col.*, 2009) o Delaunay (Claude, 2008). De igual forma, los métodos de contorno facilitaron el desarrollo de los estudios en topología, al describirlos de forma numérica y continua. Entre estos métodos destacan las similitudes geométricas con estructuras predefinidas (Dean *y col.*, 1996; Rohlf, 1996), las aproximadas de Fourier (Claude, 2008) y las curvas y superficies de Bézier (Gueziec, 1996), aún con un uso incipiente dentro de los estudios de Morfología Cuantitativa.

El desarrollo de la tecnología en la calidad y en la capacidad de procesamiento de datos, en particular aquellos en donde la resolución resulte ser necesaria (como en los casos de estudios clínicos o en los de reconstrucción), permitirá ahondar de mejor manera estas alternativas a la morfometría mediante puntos de control, la cual ha sido tradicionalmente empleada, no solo por la facilidad en el uso, manejo, procesamiento e identificación de resultados, sino también porque esta etapa depende de



manera notable de la intervención del usuario. Un desarrollo de equipos con sistema automatizado en el análisis de estructuras, mediante la detección directa de puntos de control o de características de contorno, es el próximo paso a desarrollar en los estudios de morfología cuantitativa (como bien lo señala Hermann, 2016).

## **PROCESAMIENTO DE DATOS MORFOLÓGICOS**

El análisis de datos morfológicos se culmina con la aplicación de sistemas de interpretación, dependientes de la naturaleza de la digitalización, al igual que de la muestra seleccionada para el estudio. Sin embargo, todos se rigen en función a determinadas variables. De acuerdo al objetivo de estudio, se emplea este análisis para la descripción, caracterización y/o interrelación. En función a la naturaleza del objeto de estudio, se tienen análisis de casos o análisis transversos (o poblacionales). En este último, los análisis muestrales pueden ser de discriminación o de agrupación.

Los estudios morfológicos son descriptivos cuando se enfocan en detallar aspectos precisos en la estructura de un organismo determinado. Este tipo de estudio es común en los análisis de casos, donde se determinan aspectos puntuales de la morfología, como en las investigaciones de patologías óseas. Los estudios morfológicos son, en cambio, de caracterización, cuando se vincula la forma con una información del individuo, como por ejemplo, la relación entre un tipo de estructura y una enfermedad determinada, o el vínculo entre la forma y la capacidad de locomoción. Por último, cuando los estudios descriptivos y de caracterización se analizan entre sí, de manera que se establezcan relaciones de semejanza y/o diferencia entre los individuos, se habla entonces de que el estudio morfológico es de interrelación. Este tipo de investigación es frecuente en trabajos evolutivos y de historia natural.

Por su parte, los estudios morfológicos presentan análisis de casos al describir y caracterizar un individuo según su forma. Mientras que los análisis transversales (o poblacionales) involucran el desarrollo de estudios en sucesivos casos, con parámetros de selección y comportamiento previamente descrito. Estos análisis son necesarios, no sólo para el establecimiento de bases de datos con las cuales los siguientes estudios de casos puedan vincularse, sino también en la determinación de la variabilidad de forma que una población determinada puede tener.

En los estudios transversales se pueden llevar a cabo análisis específicos, como los descriptores y los caracterizadores, al igual que los análisis generales, como los de interrelación. La naturaleza de este tipo de análisis de interrelación determinará las estrategias metodológicas a

emplear, fundamentadas en la estadística descriptiva, lineal y multivariada. De esto, se tiene modelos de agrupamiento y de discriminación, en donde se establecen relaciones de similitudes muestro-dependientes.

**Procesamiento de datos.** Los análisis de casos (es decir, los estudios centrados en la determinación de características morfológicas en un individuo) tienen la particularidad de tener objetivos relacionados con la descripción o con la caracterización de la forma, en donde en la primera se define la forma, mientras que en la segunda se asocia la forma con un meta-dato (individual, espacial y/o temporal). Los análisis transversales, además de incluir estas consideraciones, manejan diversas técnicas estadísticas que permiten interrelacionar los casos de estudios en función a sus similitudes, identificando patrones que discriminen o agrupen los conjuntos de casos (Legendre y Legendre, 1998; Quinn y Keough, 2002; Anderson y Willis, 2003).

Un grupo de datos de forma son analizados por un método de agrupamiento, cuando no existe una distinción a priori de subgrupos. Ejemplos de técnicas de agrupamiento se tiene con los Análisis de Componentes Principales (PCA), Análisis de Factores (FA) y Análisis de Clusterización. Los dos primeros tienen la estrategia de maximizar la variabilidad y las combinaciones lineales, mientras que el tercero establece grupos y relaciones mediante el cálculo de la distancia entre individuos y/o grupos de individuos. Otros tipos de análisis son los Análisis Canónicos de Correlación (donde se establecen relaciones de casos mediante correlaciones entre variables), los Escalados Multidimensionales (o análisis de variación de relación dentro de una muestra de casos), Análisis de Coordenadas Principales (donde se calcula el valor de la distancia de separación/agrupamiento de conjuntos) y los Análisis de Correspondencia (que incluyen información de frecuencias de ocurrencia/ausencia, o de patrones de forma).

Por su parte, los análisis discriminantes son aquellos en donde existe una distinción previa de subgrupos. Entre las técnicas más empleadas para tal fin se tienen los Análisis Discriminantes (o análisis de discrepancia por pares de individuos/grupos) y los Análisis de Variedad Canónica (o Análisis Discriminante Múltiple, en donde se maximiza la varianza entre grupos predefinidos, de manera que se pueden definir conjuntos de individuos/grupos por pares).

Bookstein (2016) refiere a esta etapa del análisis como la más sensible dentro de los estudios de las Biociencias. Gran parte de estas técnicas se encuentran automatizadas en los diferentes softwares que existen a disposición, por lo que el conocimiento profundo y detallado de cada estrategia puede ser limitado, afectando en el desarrollo conceptual de la forma en el contexto del estudio respectivo. Es por ello que es fundamental

la comprensión, no sólo de las bases fundamentales de estos cálculos, sino también de la modificación a nivel de código, que permita establecer alteraciones a una determinada técnica, cambiando parámetros de cálculo o inclusive, combinando diferentes técnicas. Un ejemplo de esto se observa en el trabajo de Manzanares (2015), en donde en un proceso automatizado de cálculo, se trabajó en el establecimiento de un esquema de correlación de conformaciones morfológicas (o la relación entre los puntos de control seleccionados en una estructura), en un espacio de varianza definido por un Análisis de Componentes Principales.

## **SÍNTESIS**

Frente a los notables cambios que están teniendo en la actualidad los métodos de cuantificación morfológica, es indispensable el manejo corriente del conocimiento relacionado a la tecnología para la adquisición y procesamiento de imágenes, el fundamento numérico para su abstracción y las diferentes técnicas desarrolladas para su interpretación.

Sin embargo, los recientes cambios no apuntan a la diversificación de métodos de análisis, sino en el desarrollo de respuestas rápidas, eficaces y confiables, generadas de la evaluación de grandes volúmenes de datos. La minería de datos morfológicos precisará de una adaptación en los métodos de cuantificación de la forma, que permita tener resultados confiables obtenidos en lapsos de tiempo cortos. Esto será determinante para el próximo cambio, el cual incluye la elaboración de conjuntos de datos masivos (morfológicos y no morfológicos), el procesamiento de resultados mediante el análisis o la comparación de estas bases de datos y la generación de respuestas oportunas.

Un ejemplo de esto, aunque incipiente, se observa en el desarrollo de la tecnología de reconocimiento de objetos (*image recognition*), en donde sobre una foto se identifican patrones de forma o coloración previamente registradas en una base de respaldo. Estos mecanismos se están aplicando al desarrollo de la robótica, como en la elaboración de equipos médicos (por ejemplo, en la detección de patrones de marcha) y de seguridad (con equipos para el reconocimiento biométrico).

Este tipo de tecnología se encuentra aún en desarrollo por la complejidad en el análisis de datos y resultados, al igual que en la constante dependencia del usuario que tienen las tecnologías actuales, haciendo que los procesos de colecta y procesamiento son lentos. Más aún, la inclusión de meta-datos relacionado a la estructura de registro ha sido limitada. Esto hace que el nivel que tienen muchos de los estudios morfológicos no haya superado el umbral descriptivo. Los nuevos desarrollos en aprendizaje automatizado (también conocido como *machine learning*), aunado con el avance en las

tecnologías de procesamiento y comunicación, permitiría explorar entre conjuntos masivos de datos a tiempo real y con respuestas inmediatas. Este esquema haría que las labores de vigilancia y seguimiento, como *bioblitzes* (o inventarios conjuntos de especies), control de seguridad ciudadana, detección de enfermedades e inspección de cultivos, por decir algunos casos, se vuelvan procesos 100% automatizados, fundamentados en información referencial.

A la par de una información relevante en materia de investigación, los nuevos estudios en morfología cuantitativa arrojarán respuestas sobre los procesos que han influido en el surgimiento de una estructura. Cuestiones como el tamaño mínimo que una estructura tenga para ser caracterizable en un organismo y las relaciones de integración que tienen las conformaciones, serían resueltas en el contexto del manejo intensivo y extensivo de datos morfológicos.

Este conjunto de elementos hace de la morfología cuantitativa una disciplina en constante actividad, renovación y desarrollo, con relevancia no solo en las Biociencias, sino en los campos en donde se precise la identificación de formas y su relación con datos individuales, espaciales y/o temporales.

## **AGRADECIMIENTOS**

El impulso que se le ha podido dar a este artículo, aunado a la edición este número especial de *Acta Biologica Venezuelica* sobre los trabajos en Morfología Cuantitativa que se han realizado y se proyectan en el país, incluye el esfuerzo de numerosos colegas que, sin ellos, este trabajo no hubiese sido materializado. En principal, al equipo que organiza y edita a esta revista, encabezado por la Prof. Ana Bonilla (Universidad Central de Venezuela). A mi compañera de equipo en la organización de este número especial, la Prof. Elizabeth Gordon, al igual que los participantes del Primer Encuentro Venezolano: Métodos de Cuantificación Morfológica, cuyas contribuciones integran este número especial. Finalmente, es importante resaltar el esfuerzo que nuestras instituciones, como el Instituto de Zoología y Ecología Tropical (IZET) al igual que el Instituto Nacional de Bioingeniería (INABIO) de la Universidad Central de Venezuela, realizan en la promoción de la Ciencia y de la Tecnología, con el apoyo de su talento humano. Este valioso esfuerzo institucional es importante para que iniciativas de promoción e intercambio en Ciencia y Tecnología sean estables y permitan el desarrollo de líneas de investigación e innovación.

## LITERATURA CITADA

- Adams, D., Rohlf, F. y D. Slice. 2004. Geometric morphometrics: ten years of progress following the 'revolution'. *Italian Journal of Zoology* 71: 5-16.
- Adams, D., Rohlf, F. y D. Slice. 2013. A field comes of age: Geometric Morphometrics in the 21st Century. *Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy* 21 (1): 7-14.
- Anderson, M. y T. Willis. 2003 Canonical analysis of principal coordinates: A useful method of constrained ordination for ecology. *Ecology* 84: 511-525.
- Bookstein, F. 1978. *The measurement of Biological Shape and Shape Change*. Lecture Notes in Biomathematics. Springer-Verlag.
- Bookstein, F. 2014. *Measuring and Reasoning: Numerical Inference in the Sciences*. Cambridge University Press.
- Bookstein, F. 2016. The Inappropriate Symmetries of Multivariate Statistical Analysis in Geometric Morphometrics. *Evolutionary Biology* 43: 277-313.
- Claude, J. 2008. *Morphometrics with R*. Springer.
- Dean, D., Marcus, L. y F. Bookstein. 1996. *Chi-square test of Biological Space curve affinities*. En: Marcus, L., Corti, M., Loy, A., Naylor, G. y Slice, D. (Eds.). *Advances in Morphometrics*. NATO ASI Series A: Life Sciences vol. 284. Plenum.
- Ejiri, M., Kashioka, S. y H. Ueda. 1984. The application of image processing technology to industrial automation. *Computers in Industry* 5 (2): 107-113.
- Godfrey-Smith, P. 2009. *Darwinian Populations and Natural Selection*. Oxford University Press.
- Gueziec, A. 1996. *Splines curves and surfaces for data modeling*. En: Marcus, L., Corti, M., Loy, A., Naylor, G. y Slice, D. (Eds.). *Advances in Morphometrics*. NATO ASI Series A: Life Sciences vol. 284. Plenum.
- Hermann, S. 2016. *Visual analytics methods for shape analysis of biomedical images exemplified on rodent skull morphology*. Tesis de Doctorado. Universidad de Bonn.
- Kendall, D. 1977. The diffusion of shape. *Advances in Applied Probability* 9: 428-430.
- Kendall, D. 1984. Shape manifolds, procrustean metrics, and complex projective spaces. *Bulletin of the London Mathematical Society* 16: 81-121.
- Kendall, D. 1989. A survey of the statistical theory of shape. *Statistical Science* 4 (2): 87-120.
- Keyvani, A. y K. Strom. 2013. A fully-automated image processing technique to improve measurement of suspended particles and flocs by removing out-of-focus objects. *Computers & Geosciences* 52: 189-198.
- Klingenberg, C. 2016. Size, shape, and form: concepts of allometry in geometric morphometrics. *Development Genes and Evolution* 226 (3): 113-137.
- Le, H. y D. Kendall. 1993. The Riemannian Structure of Euclidean Shape Spaces: A Novel Environment for Statistics. *The Annals of Statistics* 21 (3):1225-1271.
- Lee, I., Lee, K. y C. Torpelund-Bruin. 2009. Voronoi Image Segmentation and Its Applications to Geoinformatics. *Journal of Computers* 4 (11): 1101- 1108.
- Liang, Z. y P. Lauterbur. 1999. *Principles of Magnetic Resonance Imaging: A Signal Processing Perspective*. Wiley.
- Loy, A. y D. Slice. 2010. *Image data banks and geometric morphometrics*. En: Nimis P. y Vignes Lebbe R. (Eds.). *Tools for Identifying Biodiversity: Progress and Problems*. Edizioni Università di Trieste.
- Mann, S. 2001. *Intelligent Image Processing*. Wiley.
- Martinez-Abraín, A. 2008. Statistical significance and biological relevance: A call for a more cautious interpretation of results in ecology. *Acta Oecologica* 34:9-11.
- McGhee, G. 2006. *The geometry of evolution. Adaptive landscapes and theoretical morphospaces*. Cambridge University Press.

- McGhee, G. 2015. Limits in the evolution of biological form: a theoretical morphologic perspective. *Interface Focus*, 6, 5 (6): 20150034. DOI: 10.1098/rsfs.2015.0034.
- Manzanares, M. 2015. De extremis avis: Un estudio de los límites del vuelo activo en Neognathae (Aves). Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- Marcus, L. y M. Corti. 1996. *Overview of the new, or Geometric Morphometrics*. En: Marcus, L., Corti, M., Loy, A., Naylor, G. y Slice, D. (Eds.). *Advances in Morphometrics*. NATO ASI Series A: Life Sciences vol. 284. Plenum.
- Mitteroecker, P. y Gunz, P. 2009. *Advances in geometric morphometrics. Evolutionary Biology* 36 (2): 235-247.
- Mitteroecker, P., Gunz, P., Windhager, S. y K. Schaefer. 2013. A brief review of shape, form, and allometry in geometric morphometrics, with applications to human facial morphology. *Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy* 24: 59-66.
- Olson, E. y R. Miller. 1958. *Morphological integration*. University of Chicago Press.
- Quinn, G. y M. Keough. 2002. *Experimental Design and Data Analysis for Biologists*. Cambridge University Press.
- Rohl, F. 1996. *Introduction to outlines*. En: Marcus, L., Corti, M., Loy, A., Naylor, G. y Slice, D. (Eds.). *Advances in Morphometrics*. NATO ASI Series A: Life Sciences vol. 284. Plenum.
- Rouahi, H., Mtibaa, R. y Zagrouba, E. 2017. *Bayesian approach in Kendall shape space for plant species classification*. En: Alexandre, L. Sánchez, J. y Rodrigues, J. (Eds.). *Pattern Recognition and Image Analysis: 8th Iberian Conference, IbPRIA 2017, Faro, Portugal, June 20-23, 2017, Proceedings*. Springer.
- Salditt, T., Aspelmeyer, T. y S. Aeffner. 2017. *Biomedical Imaging: Principles of Radiographym Tomography and Medical Physics*. De Gruyter.
- Schlosser, G. y G. Wagner. 2004. *Modularity in Development and Evolution*. University of Chicago Press.
- Slice, D. 2005. *Moder Morphometrics*. En: Slice, D. (Ed.). *Modern Morphometrics in Physical Anthropology*. Kluwer Academic/Plenum. Chapter 1.
- Slice, D., Bookstein, F., Marcus, L. y F. Rohlf. 1996. *A glossary for geometric morphometrics*. En: Marcus, L., Corti, M., Loy, A., Naylor, G. y Slice, D. (Eds.). *Advances in morphometrics*. Plenum Press, in cooperation with NATO Scientific Affairs Division, New York and London.
- Su, C. 2003. Robotic Intelligence for Industrial Automation: Object Flaw Auto Detection and Pattern Recognition by Object Location Searching, Object Alignment, and Geometry Comparison. *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 33 (4): 437-451.
- Thompson, D. 1917. *On growth and form*. Cambridge University press.
- Tuomi, J. y T. Vuorisalo. 1989a. What are the units of selection in modular organisms? *OIKOS* 54: 227-233.
- Tuomi, J. y T. Vuorisalo. 1989b. Hierarchical selection in modular organisms. *Trends in Ecology and Evolution* 4: 209-213.
- Webb, A. 2003. *Introduction to Biomedical Imaging*. Wiley.
- Zelditch, M; Swiderski, D; Sheets, H. y W. Fink. 2004. *Geometric Morphometrics for Biologists. A Primer*. Elsevier Academic Press.