

INTERPRETACIÓN Y MANEJO DE LA GEOMETRÍA POLIGONAL, PARA LA CREACIÓN DE SUPERFICIES Y MODELOS DIGITALES 3D

ARMANDO ANDRÉS SUÁREZ SALAZAR*

arca@correo.xoc.uam.mx

PEDRO JESÚS VILLANUEVA RAMÍREZ*

pvilla@correo.xoc.uam.mx

ALFREDO FLORES PÉREZ*

aflore@gmail.com

DIEMEL HERNÁNDEZ UNZUETA*

diemel.uam@gmail.com

* DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA Y PRODUCCIÓN UAM XOCHIMILCO

Este grupo de investigación ha desarrollado investigaciones dirigidas a comprender y materializar el diseño desde un punto de vista integral, conjuntando simultáneamente diversos factores, enfatizando el uso combinado de modelos computacionales y físicos para analizar, estudiar y experimentar con aspectos geométricos y morfogenéticos afines con el diseño estructural y bioclimático, entre otros. Esto con el objetivo de reflexionar sobre el impacto que tiene la inclusión de los análisis dinámicos y complejos elaborados con tecnología computacional en el diseño y en su proceso de enseñanza-aprendizaje. Han desarrollado dos investigaciones: *La composición estructural y su interacción con el espacio arquitectónico. Análisis a través de sus formas* y *El diseño integral en la arquitectura mediante tecnologías computacionales. Una propuesta metodológica para la licenciatura de arquitectura de la UAM Xochimilco*, difundiendo resultados a través de publicaciones y eventos académicos.

En los últimos años, la geometría poligonal se ha utilizado con mayor frecuencia en distintos campos del diseño, donde el manejo de las gráficas y el procesamiento geométrico digital resulta de gran valía para el desarrollo de los proyectos de diseño, que cada día se vuelven objetos de diseño más complejos, difíciles de resolver con los métodos tradicionales.

Algunas ventajas de la geometría poligonal son: su simplicidad conceptual, lo que permite un procesamiento más flexible y eficiente, así como al generar superficies, principalmente orgánicas, evita errores al ser utilizadas como elementos para simulaciones digitales. **Palabras clave:** polígonos, geometría poligonal, topología, loops, poles, retopología, NURBS.

In recent years, polygonal geometry has been used with increasing frequency in various fields of design. Graphics handling and digital geometric processing are extremely valuable in the development of design projects, which are becoming increasingly complex design objects that are difficult to solve with traditional methods.

Some advantages of polygonal geometry are its conceptual simplicity, which enables more flexible and efficient processing, and avoids the introduction of errors in digital simulation of surfaces, particularly organic surfaces. Keywords: polygons, polygonal geometry, topology, loops, poles, retopología, NURBS.

INTRODUCCIÓN

A partir de los requerimientos que exige cada campo profesional del diseño, el uso de herramientas computacionales se ha extendido de manera importante. Por ello, en la actualidad se necesitan profesionales que conozcan y dominen no sólo los conceptos propios del manejo de programas computacionales, genéricos o específicos, que se utilizan como herramientas para el desarrollo de proyectos, sino también que comprendan los diversos procesos, técnicas y métodos en los que se basan dichos programas para mejorar sus proyectos y desarrollar su creatividad, y no se conviertan en simples operarios de estas herramientas. Tal es el caso de la creación y modificación de geometría poligonal para el desarrollo de modelos tridimensionales de una gran complejidad. Comprender algunos conceptos básicos para el desarrollo de este tipo de geometría permitirá a los diseñadores obtener modelos más adecuados para cada propósito requerido.

Un proceso computacional utilizado de manera frecuente como herramienta de dibujo y diseño en el modelado vectorial, tanto en dos dimensiones (2D) como en tres dimensiones (3D), es la generación de superficies. Ésta se emplea en el campo de la animación por computadora, donde se aplica el concepto de modelado de polígonos en 3D, cuyo propósito es crear un tipo de geometría con los programas informáticos y que desde un principio se comprenda el proceso de creación o modelado de objetos y escenarios virtuales, para la realización de proyectos animados.

Otra aplicación del modelado de polígonos 3D es la generación de terrenos, por ejemplo, una topografía cuyos datos coordinados se pueden obtener mediante una estación total.¹ En los CAD (*Computer Aided Design*), el modelado poligonal tridimensional se emplea para la generación y análisis arquitectónico y morfológico, como por ejemplo,

1. Una *estación total* es un instrumento electro-óptico que funciona electrónicamente, cuyo objetivo es facilitar y eficientar los procesos topográficos de campo y, en la mayoría de los modelos, integra cuatro aparatos: distanciómetro láser, teodolito, nivel de precisión y la computadora. Véase http://abreco.com.mx/manuales_topografia/teodolitos_estaciones/Manual%20de%20Operacion%20de%20Estacion%20Total.pdf.

la creación de superficies simples y doble curvatura, desarrollables o no, sinclásticas y anticlásticas. También se utiliza de manera frecuente en la simulación digital mediante el Método del Elemento Finito (MEF), para realizar análisis estructural, estudios bioclimáticos o en el uso de herramientas computacionales CAM (*Computer Aided Manufacturing*), CNC (*Computer Numerical Control*) y prototipado, entre otras.

Sin importar el *software* que se vaya a emplear, uno de los propósitos de la generación de modelos 3D con superficies por computadora es considerar, dentro del proceso de diseño, los diversos estudios y análisis de factores específicos que se pueden desarrollar, por ejemplo: el renderizado con iluminación local o con iluminación global basado en fotometría, el estudio de asolamiento o de sombras, de radiación solar o térmico, análisis estructural basado en el método de elementos finitos, entre otros. Para estos propósitos es necesario considerar en la generación de superficies una geometría que permita discretizar,² dividiendo el modelo 3D en un infinito de pequeños elementos (caras) continuos. Una manera de lograr esto es generar modelos de superficie mediante el empleo de mallas poligonales. Otros campos de acción donde se usan las mallas poligonales son: generación de personajes y entornos en los videojuegos, video, animaciones y cine. En este caso, los modelos 3D deben pasar por un proceso de optimización de formas antes de ser empleados en la producción final.³

GENERACIÓN DE SUPERFICIES MEDIANTE MALLAS POLIGONALES

Existen diversos algoritmos para generar superficies 3D de manera digital que son empleados de acuerdo con la aplicación final del modelo superficial. Uno de los más utilizados es el modelo con NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline [B-splines racionales no uniformes]), el cual consiste en modelos matemáticos de geometría que representan superficies de cualquier forma con una alta precisión y

2. La *discretización* es un proceso matemático mediante el cual se obtienen resultados aproximados de la ecuación diferencial del problema.

3. Mario Botsch, Mark Pauly *et al.*, *Geometric Modeling Based on Polygonal Meshes*, Eurographics 2008, Full-Day Tutorial. Documento en PDF.

con una cantidad de información menor a otros métodos. La geometría NURBS se define mediante cuatro elementos: grados, puntos de control, nodos y regla de cálculo.⁴

Otra forma de generación geométrica (motivo de este artículo) es mediante el empleo de mallas poligonales: consisten en una colección de puntos (vértices) dispuestos en elementos básicos llamados caras, las cuales están limitadas por polígonos que se ajustan a lo largo de los bordes y describen la forma final de la cara a una superficie lisa que, puede, sin embargo, tener algunas características no lisas tales como bordes afilados o terminar en esquinas rectas. Estos polígonos pueden ser del tipo triangular, cuadrangular o de más lados como el hexagonal. Se dice que las mallas poligonales son sólo una colección de caras unidas que carecen, en principio, de una estructura matemática, sin embargo, cada cara se define a través de su parametrización baricéntrica.⁵ Comparando las superficies NURBS con las superficies poligonales, se puede apreciar que las primeras presentan una apariencia más suave cuando son manipuladas, en contraste con las segundas, donde el mallado poligonal es mucho más presente y aparenta ser burda y dura.

No obstante, existe la manera de igualar los resultados a la geometría NURBS, a partir de una aproximación en polígonos a la forma, superficie o volumen, con la debida consecuencia de aumento de elementos geométricos.

Polígonos. Un poco de historia

En los inicios de la computación gráfica (décadas de 1950, 1960 y 1970), el modelado 3D de objetos tenía una apariencia poco real (no de baja calidad), ya que dependía de la capacidad de las computadoras de aquel entonces que, a pesar de ser potentes, por sus características físicas, tanto por el espacio que ocupaban como por el tiempo de procesado de datos, las hacían muy poco prácticas para este tipo de desarrollo informático.

Con el paso del tiempo, el desempeño y rapidez de los equipos de cómputo han evolucionado y mejorado. El despegue fue bastante lento, desde los enormes y costosos equipos que capturaban y procesaban toda la información

posible de entrada y salida desde varios dispositivos a una computadora central con varios procesadores, también denominado *mainframe*, que aún existen, pero de uso exclusivo de los gobiernos y grandes empresas, pasando por las *supercomputadoras*, las cuales hacen aun cálculos masivos más complejos, dedicadas para uso científico primordialmente, hasta las computadoras comunes de hoy en día. La cantidad de polígonos que se podían generar y manipular en los entornos informáticos también fueron evolucionando, primero con aplicaciones que creaban formas sencillas, luego con el dibujo 2 y 2 ½ dimensiones, más adelante con la generación del modelado tridimensional de formas libres y complejas, hasta llegar al modelado paramétrico que actualmente se está empleando en diferentes campos del diseño, tanto a nivel académico como profesional.

Un sencillo, pero claro ejemplo de ello, es una mano izquierda animada realizada al inicio de la década de los años setenta por Edwin Catmull y Fred Parke, en la Universidad de Utah, Estados Unidos. Catmull desarrolló un programa escrito para lograr abrir y cerrar la mano virtualmente, convirtiéndose en una de las primeras aplicaciones de la geometría poligonal, conteniendo 350 polígonos; la mano fue escaneada minuciosamente de un modelo análogo: un molde de yeso de la mano de Catmull, dibujando sobre éste polígono por polígono. Inicialmente se mostraba dicho objeto digital en 3D en modo de malla alambre o *wireframe*, y luego sombreado como un objeto completamente sólido.

Geometría poligonal bidimensional y tridimensional

En geometría, un polígono es una figura plana que, con líneas rectas, llamados lados o aristas, delimitan un área para un objeto determinado, aunque etimológicamente hablando, es definido por los ángulos que se conforman por estos lados. Dichas líneas están unidas con las demás por sus extremos, en puntos llamados vértices o nodos. El área resultante puede estar "rellena" o no, de acuerdo con su representación.

Cada polígono que constituya a un objeto más complejo, es decir la suma de varios de estos, ya sea regular o irregular, contiene a su vez componentes, como los vértices (vertex), nodos o puntos de anclaje, que tienen una información específica de cada uno de ellos, acerca de la

4. Véase www.rhino3d.com/nurbs/.

5. Botsch, *op. cit.*, p. 18.

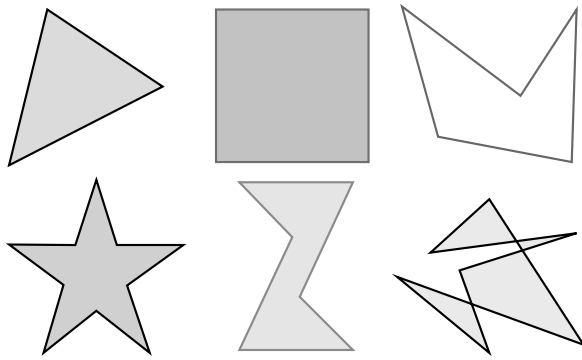


Figura 1a. Diferentes configuraciones de polígonos cerrados.

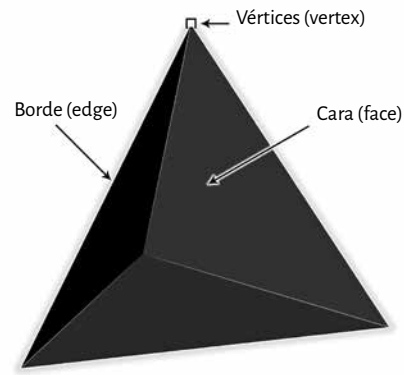


Figura 2a. Ejemplo de un objeto tetraedro generado a partir de mallas poligonales triangulares que forman cuatro caras continuas, unidas mediante sus vértices y encerradas por las aristas.

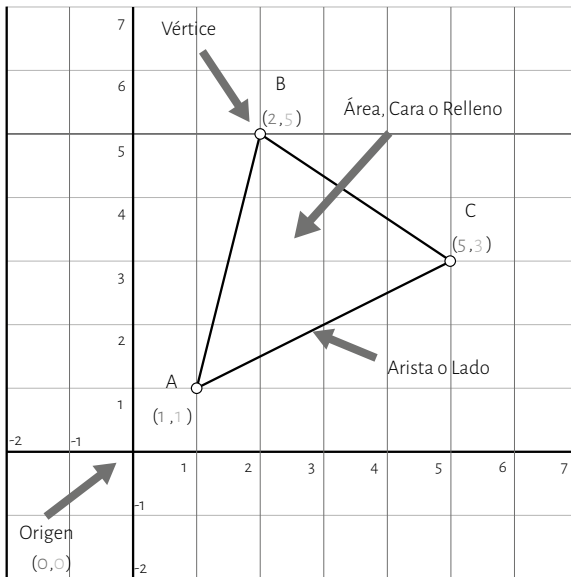
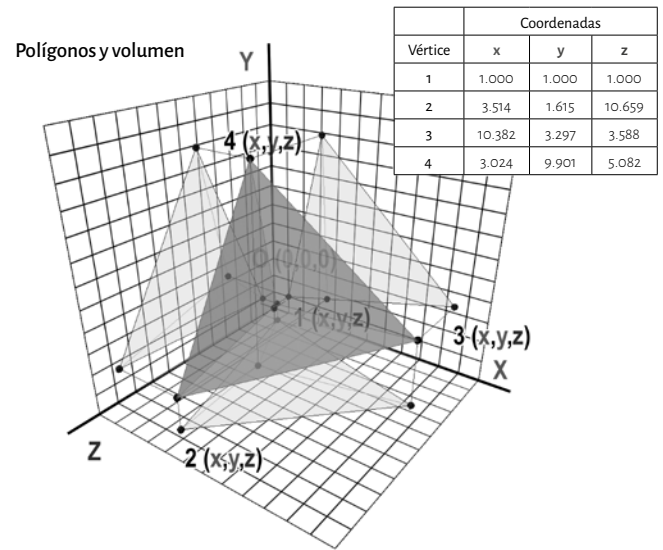


Figura 1b. Componentes de un polígono.

Figura 1.



Tetraedro: poliedro de 4 caras con polígonos triangulares

Figura 2b. Disposición espacial tridimensional.

Figura 2.

ubicación de los mismos, en un sistema de dos coordenadas (X,Y), que en conjunto con la cantidad lados y el área encerrada entre ellos, determinan su apariencia, incluso el color y grosor de las líneas de estos lados, y el color de relleno del o los polígonos (Figura 1).

Los vértices son el resultado de una operación de creación de un objeto o de la suma de varias operaciones por modificación y, por consecuencia, de su apariencia. La información de cada vértice está calculada y definida con base en una ecuación o un algoritmo, interpretado a través del programa con el que se originó y que se encuentra alojada en un archivo de datos de tipo vectorial.

Cuando se hace referencia al trazado de polígonos, casi siempre se remite a que éstos se crean en un entorno

bidimensional, como los objetos gráficos elaborados en programas computacionales de diseño, dibujo, ilustración y presentación 2D. Sin embargo, éstos también pueden realizarse en entornos tridimensionales, como en los programas CAD, los cuales generan formas superficiales u objetos con base en mallas poligonales, tanto en 2D como en 3D, para abarcar un área o un volumen.

Como en el caso bidimensional, las mallas poligonales contienen, a su vez, componentes muy similares pero tridimensionales basados en el sistema cartesiano X, Y, Z. Al igual que los polígonos bidimensionales, estos componentes pueden ser el resultado de una operación de creación de uno o varios objetos, o de la suma de varias operaciones de modificación (Figura 2).

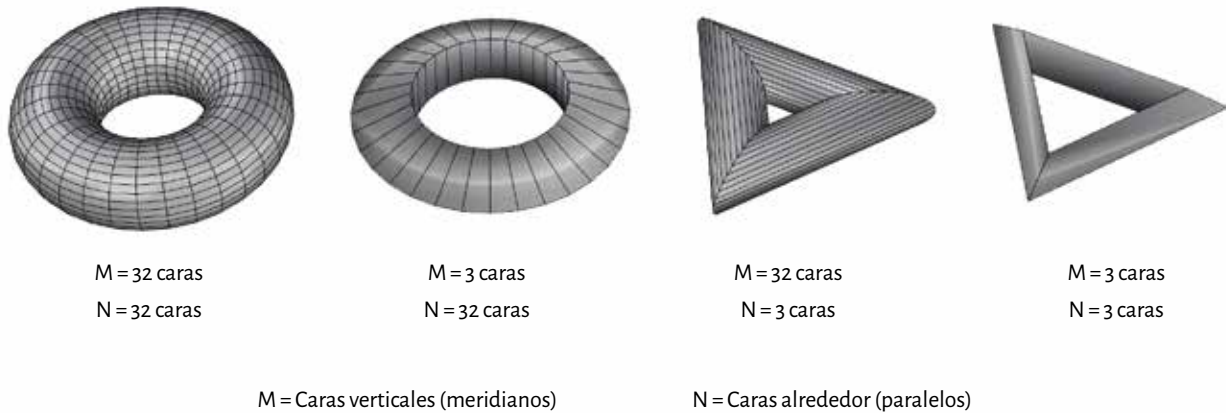


Figura 3. Ejemplos de la primitiva geométrica toroide, con diferentes valores de M y N en la matriz paramétrica de generación.

Como ya se mencionó, bajo ciertas condiciones o circunstancias, el modelado de objetos dependerá del *software* que se use para ello. Algunos *software* CAD y de presentación 3D como AutoCad, Rhinoceros, 3ds Max o Maya, entre otros, pueden disponer de varios tipos de geometría básica paramétrica (conocidas como primitivas geométricas), utilizadas al inicio del proceso de modelado para que, mediante la aplicación de modificadores y transformadores, se pueden obtener nuevas formas. Al ser paramétricas, estas primitivas están definidas por algoritmos basados en la geometría NURBS o de malla poligonal, de acuerdo con los parámetros proporcionados.

En el caso de las primitivas basadas en malla poligonal, éstas se generan a partir de una matriz de M por N número de vértices que en la malla poligonal equivalen a la generación de caras en las direcciones M y N de referencia, por lo que dependiendo de la densidad de la matriz, el resultado de la malla poligonal será tosca o detallada.⁶ No obstante, esta manera de generar las formas primitivas, en vez de ser una limitante, resulta una ventaja, ya que se pueden generar diferentes resultados mezclando los parámetros M y N de la matriz (Figura 3).

6. Este método es parecido al que actualmente emplea el método de superficie por subdivisión, que como lo explica *Wikipedia*, es un método de representación de una superficie suavizada, "refinada", a partir de una malla poligonal más sencilla.

Clasificación de los polígonos

Los polígonos se pueden clasificar de distintas maneras, a continuación se describen algunas de ellas.

1. De acuerdo con la complejidad de su forma. Los polígonos se clasifican por la disposición variada de las aristas y vértices, o por las dimensiones de las aristas y ángulos interiores y exteriores a la forma (Figura 4).

La información de cada vértice de estos objetos está calculada y definida con base en una ecuación interpretada a través del programa computacional con el que se generó, la cual se encuentra alojada en un archivo de datos; por supuesto, puede ser creado en un espacio bi y tridimensional (archivos vectoriales 3D como los archivos de dibujo de AutoCAD o Rhino, de escena de 3ds Max o de Maya, archivos de intercambio de información como el formato .OBJ) o para manufactura como STL, etcétera).

2. De acuerdo con la cantidad de lados (aristas) que éstos tengan. En esta segunda clasificación, específicamente para la geometría poligonal aplicada en entornos CAD y similares, se presenta lo siguiente:

- Mallas cuadrilaterales. Están formadas por cuadriláteros (también conocidos como *quads*) o polígonos de cuatro lados o aristas que a su vez están conectados por cuatro vértices para hacer una cara o superficie planar cerrada, pero que también puede ser no planar. Es una de las configuraciones más utilizadas en los diferentes campos del diseño debido a su configuración

Polígonos								
6	5	4	3			3	4	5
			-	Complejos	Simples			
			-	Cóncavos	Convexos			
				Regulares	Irregulares			

Figura 4. Clasificación de polígonos.

Objeto poligonal (plano)

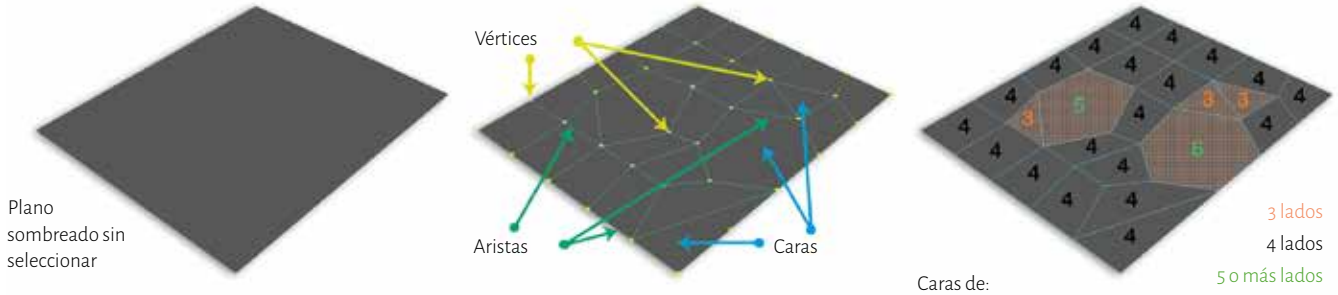


Figura 5. Los modelos basados en mallas poligonales están compuestos de varias caras cerradas separadas, combinadas en una malla poligonal que puede tener diferentes configuraciones (cuadrangulares, triangulares, hexagonales, entre otras).

- regular que, en muchos de los casos, tiene un propósito estético.
- Mallas triangulares. Éstas contienen exclusivamente triángulos. Un triángulo es el polígono más elemental que está constituido por tres lados o aristas conectadas por sus extremos, creando siempre una superficie planar cerrada llamada cara, lo que resulta adecuado para algunas aplicaciones como el caso del diseño arquitectónico. Con este método se requieren aproximadamente el doble de triángulos que cuadrantes para representar la misma forma.
 - Mallas poligonales de más de cuatro lados (N lados). Un polígono de N lados (N-gon) está hecho de cinco o más aristas o lados, que a su vez tendrá cinco o más vértices. Esta configuración resulta muy útil en casos donde se requiera obtener un mallado, ya sea con fines estéticos o de análisis, como es el caso en arqui-

tectura, de los sistemas estructurales tipo *Diagrid* o Geodésicas (Figura 5).

Estas tres configuraciones de mallado poligonal son muy útiles en los diferentes campos del diseño, ejemplo de ello es el diseño de estructuras arquitectónicas tipo *Diagrid*. En este sentido, las mallas pueden ser representaciones discretas de las superficies que pueden definir cubiertas o muros y, por tanto, los polígonos (como segmentos lineales rectos) pueden usarse como representaciones discretas de una curva suave, definiendo (o no) las barras estructurales del sistema *Diagrid* o simples bordes límite entre los segmentos superficiales lisos.

Como ejemplo de lo anterior, se encuentra la cubierta de cristal de la casa del hipopótamo del zoológico de Berlín, Alemania, de Schlaich Bergermann (1996), que consiste en una malla cuadrangular de forma libre; la cubierta

de malla triangular de la plaza comercial y complejo de oficinas “Zlote Tarasy” en Varsovia, Polonia (2007); las ocho cubiertas de polígonos hexagonales no planares que cubren el proyecto “El Edén” de Nicholas Grimshaw (2001); el mayor invernadero del mundo ubicado en Bodelva, Par, Reino Unido, o la fachada asimétrica recubierta por más de 16 000 placas de aluminio hexagonales del Museo Soumaya (2011, Felipe Romero), en la Ciudad de México.

En el caso de la creación de personajes para animación, el mallado poligonal es de suma importancia, ya que previamente diseñado el personaje, se crea el o los objetos a baja resolución de geometría, conocido como Proxy, usualmente en mallado poligonal que más adelante puede sustituirse por uno de mayor resolución; es decir, de mejor acabado, pero que de inicio cumple con ciertos requisitos necesarios de construcción, incluso para animarse.

Sin embargo, cuando se empieza a construir cualquier modelo 3D, con este tipo de geometría, tanto los polígonos de tres lados (triángulos) como los de cinco y más lados suponen algunos problemas para animar parcial o completamente el modelo. En otras palabras, por un lado hay que subdividirlos o teselarlos, para que originen caras de cuatro lados, aumentando la resolución del objeto de manera inevitable pero necesaria y, a su vez, “propagar” sus consecuencias. Por otro lado, no se desempeñan

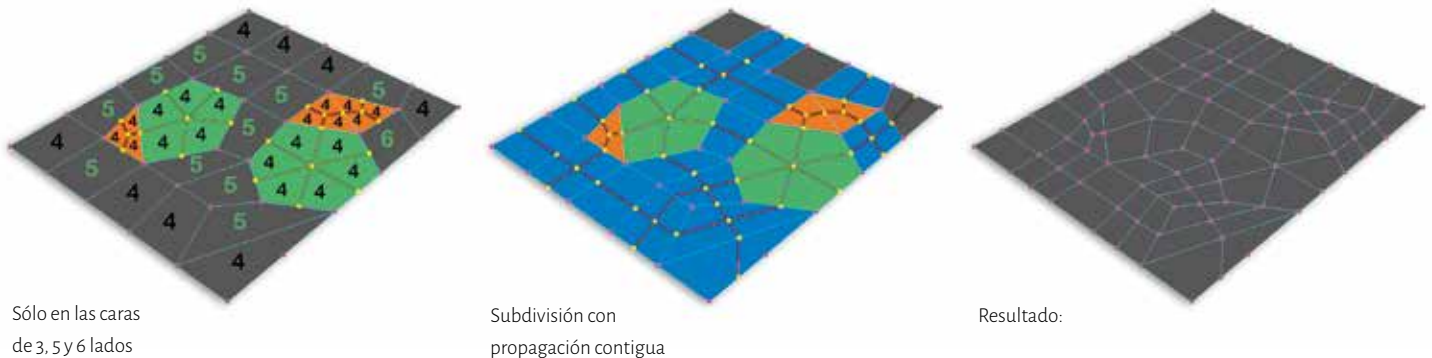
adecuadamente al momento de deformar y animar el objeto en cuestión; o bien, los polígonos de más de cuatro lados no son convenientes al momento de visualizar texturas y acabados. Las mallas triangulares pueden causar estrechamiento de texturas y parpadeo cuando hay deformación durante la animación, además son difíciles de aplicar como piel correctamente (Figura 6).

Por eso es necesario que cuando se crean nuevos modelos, se evite lo más posible la generación de este tipo de polígonos, pero si por cualquier operación aparecen, es conveniente corregirlos desde un principio para que los modelos tengan una geometría óptima y no generen problemas a futuro. Esto se logra editándolos y aprovechando una característica de la geometría poligonal llamada *Topología*.

TOPOLOGÍA

Para que la geometría poligonal sea eficiente y funcional tanto en la animación 3D, como para el análisis y simulación digital, es un requisito que los componentes de dicha geometría estén conectados adecuadamente, proporcionando “fluidez” alrededor de la superficie de los objetos 3D. En este sentido, cuando se trata de mallas poligonales, primero se debe considerar su “topología”, también conocida como conectividad de malla. En términos generales, significa

Objeto poligonal con subdivisión



Sólo en las caras de 3, 5 y 6 lados

Subdivisión con propagación contigua

Resultado:

Figura 6. Malla poligonal plana con subdivisiones.

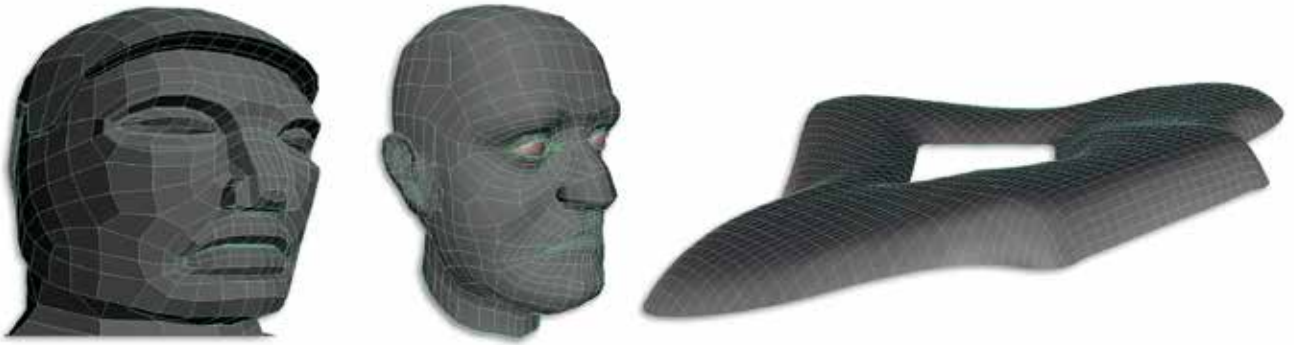


Figura 7. Ejemplos de malla cuadrangular.

que debe contar con un orden sistemático en cuanto a vértices se refiere, etiquetándolos para saber cómo está conformado el objeto, identificando los bordes y las caras.

Las mallas poligonales que tengan la misma conectividad pueden presentar formas muy diferentes, por lo que pueden manipularse con facilidad cambiando las coordenadas de los vértices (dentro de límites permitidos) y mantener toda la información de conectividad. Como en el caso de las primitivas geométricas, las generaciones de mallas poligonales de forma libre pueden tener diversas densidades, cuanto mayor sea el número de caras, más libertad se obtendrá en el diseño, sin embargo, esto también puede ser una desventaja, por lo que se necesitan estrategias para una adecuada generación de dichas mallas, buscando que sean lo más equilibradas posible.

En la búsqueda de estas estrategias, la topología de la malla desempeña un papel crucial ya que, en muchas ocasiones, es necesario cambiar la conectividad. Para esto existen diversos algoritmos que operan sobre una interacción inteligente de diseñar/cambiar la conectividad y geometría. Dentro de estos algoritmos, hay algunas alternativas de topología básica (plantillas), como las que ofrece el programa de Autodesk 3D Studio Max o el *plug-in* M+ para Rhinoceros, para propósitos arquitectónicos o de diseño industrial, donde no necesariamente se tiene que deformar la geometría al momento de representarse o animarse.

Modelo con geometría ideal

En todo objeto de diseño, la estética desempeña un papel importante, como los personajes que participan dentro de un escenario en un video, las fachadas o cubiertas de una edificación o los objetos de diseño industrial, entre otros. En estos casos, los modelos 3D basados en mallas poligonales,

no sólo deben ser viables a la referencia correspondiente, sino que deben cubrir la cualidad estética, sin importar la cantidad de polígonos requeridos para ello, por supuesto, con el mínimo necesario de información para representar una forma, superficie o volumen. Además, deben ser funcionales, es decir, que se comporten correctamente cuando se manipulen, deformen o animen.

Dicho comportamiento se verá cuando una parte o toda la estructura del modelo se vea comprometida al momento de ser modificada, como en el caso de los personajes animados que al tener mallas poligonales bien estructuradas con caras cuadrangulares o *quads*, ofrecerán un buen sistema de deformación por pesos (*Skeletal animation*), desde luego a partir del *Rigging* (cuando se articula internamente un modelo y sus “extremidades” con huesos, como es muy común en el desarrollo de personajes), aplicado a dichos objetos; o bien, por otras opciones de deformación. Esto permite al modelo 3D que sea transformado o modificado de manera flexible, en una o varias áreas del objeto, incluso en todo el objeto (Figura 7).

En la Figura 8 se muestra una tabla de subdivisión de polígonos, con la cantidad de lados de los mismos. Se recomienda aplicar a cualquier modelo por construir.

La topología es básicamente la forma como están organizados los polígonos entre sí, a través de ciertas agrupaciones de componentes (aristas y caras) sobre la superficie de los modelos 3D llamados *Loops* y *Poles*.

LOOPS (CICLO O BUCLE)

Son una serie de elementos o componentes geométricos de un objeto, seleccionados por cercanía y continuidad. Los más comunes en el caso de los objetos poligonales son: *Face Loop* y *Edge Loop* (Figura 9).

POLÍGONOS		SUBDIVISIÓN A POLÍGONOS CUADRANGULARES (QUADS)			▲ TRIÁNGULOS	□ CUADRÁNGULOS	◡ POLÍGONO DE + 4 LADOS	○ NUEVOS VÉRTICES	
TRIÁNGULO		TRIANGULAR CENTRAL		TRIANGULAR MEDIO		MEDIO CENTRAL		CENTRAL	
CUADRADO		TRIANGULAR CENTRAL		MEDIO Y PARALELO		CORRECTO MEDIO Y CENTRAL	CENTRAL Y PARALELO	CENTRAL, PARALELO Y RECILLA	
PENTÁGONO	TRIANGULAR	TRIANGULAR CENTRAL		MEDIO	PARALELO		PARALELO MEDIO	CORRECTO CENTRAL	
HEXÁGONO	TRIANGULAR	TRIANGULAR CENTRAL	POLÍGONOS REGULARES PARES (4, 6, 8, 10, etc.)			PARALELO	CENTRAL	CENTRAL 2	RECILLA
OCTÁGONO	TRIANGULAR	TRIANGULAR CENTRAL				PARALELO	CENTRAL	CENTRAL 2	RECILLA

Figura 8. Tabla de subdivisión de polígonos.

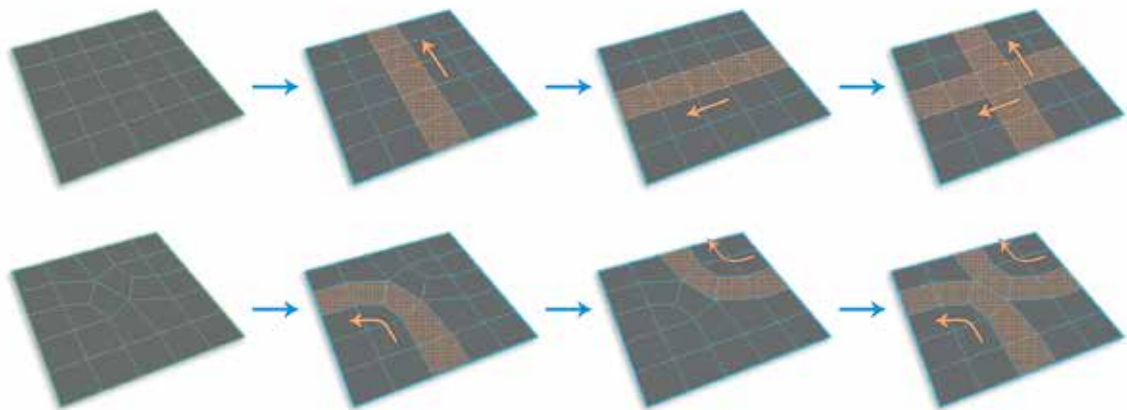


Figura 9a. Face Loops.

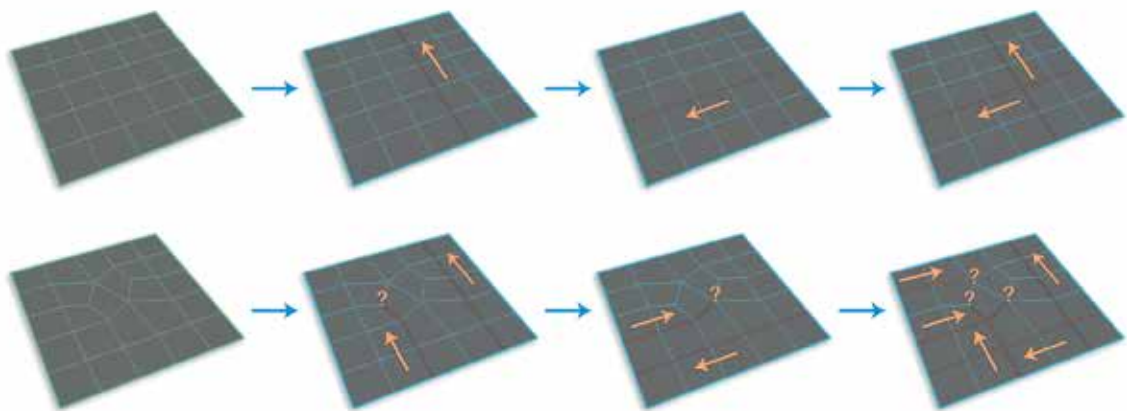


Figura 9b. Edges Loops.

Figura 9.

Face Loop. Es una ruta formada por caras poligonales seleccionadas, que están conectadas en secuencia por sus aristas compartidas en paralelo, tomando una dirección determinada sobre la superficie poligonal, de acuerdo con la primera y segunda cara seleccionada.

Edge Loop. Es una ruta formada por las aristas que están entre dos caras poligonales seleccionadas y que están conectadas en secuencia contigua por sus extremos con otras aristas, casi en la misma dirección que la primera arista seleccionada.

Ambos tipos de *Loop* pueden atravesar o recorrer en su totalidad la superficie de cualquier objeto poligonal, llegando a formar, en algunos casos, *loops cerrados* que, al final es uno de los objetivos de la topología aplicada en un buen modelo, permitiendo hacer flexibles las deformaciones sólo en las áreas o superficies necesarias para ello, siempre y cuando se cumplan las siguientes condiciones de construcción:

- Primordialmente todas las caras seleccionadas en *loop* deben ser polígonos de cuatro lados.
- Las aristas seleccionadas en *loop* deben tener caras de cuatro lados adyacentes a éstas.
- Un *loop* siempre tiene que terminar en un polígono de tres, cinco o más lados, excepto que sea el mismo con el que se inicia, o contiguo a otro polígono del mismo tipo.
- Si el objeto es abierto, es decir, que no encierra del todo un volumen, es posible que no todos los *loops* sean cerrados.
- Casi todas las aristas adyacentes a un *loop* pueden determinar la dirección del “fluido” mismo; con la debida orientación se puede mejorar la topología general del modelo (véase la recomendación “Orientación de la fluidez” en el subtema Recomendaciones de modelado poligonal 3D, así como la Figura 13a).
- Algunos vértices adyacentes a estos *loops*, también pueden definir la calidad y fluidez de estos mismos y, por consecuencia, la topología del objeto o modelo 3D. A estos vértices se les conoce como *Poles*.

POLES (POLO O NUDO)

Son vértices que no están conectados a cuatro aristas, como es común que suceda en una geometría tipo poligonal de caras cuadrangulares. Son aquellos vértices que están conectados a tres aristas (N) y cinco aristas (E) (en algunos casos aparecen con cierta cercanía uno del otro), y aunque hay *poles* para conectar con más de seis aristas, es preferible evitar su uso, aunque a veces se crean de manera automática, como por ejemplo cuando se generan objetos primitivos o básicos. Los *poles* definen, en cierta forma, la dirección que va a tomar la superficie del objeto poligonal y se pueden ajustar, en algunos casos creando, editando o eliminando componentes, como vértices, aristas o caras, a partir de algunas operaciones tanto constructivas como destructivas, a saber: extruir caras, unir vértices, suprimir aristas, recortando caras o aristas, orientando aristas, biselando aristas, o subdividiendo caras, entra las más comunes (Figuras 10 y 11).

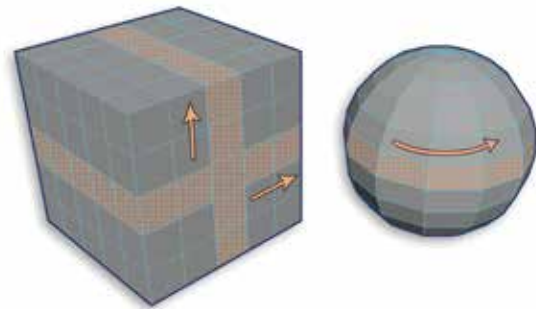


Figura 10a. *Loops* cerrados.

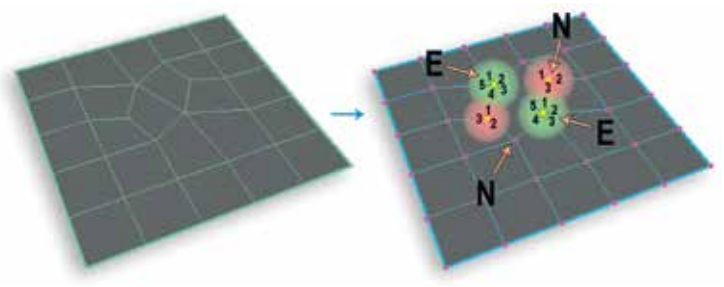


Figura 10b. *Poles* (polo o nudo) de tres aristas (N) y cinco aristas (E).

Figura 10.

Face Loops y Poles (E y N), con distintos arreglos de superficie

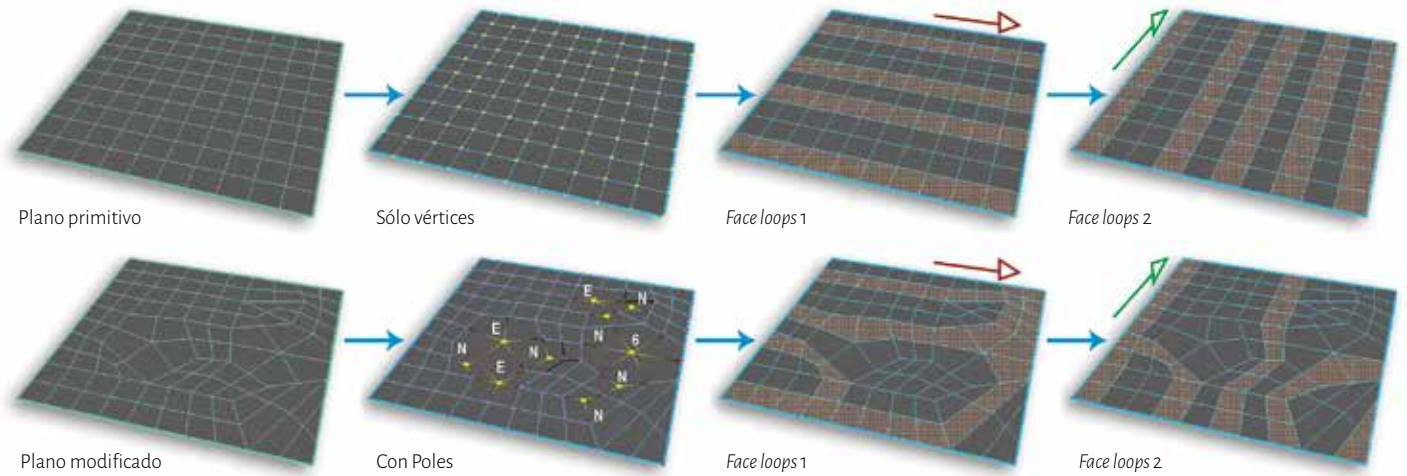


Figura 11a. Arreglos de superficie con o sin Poles.

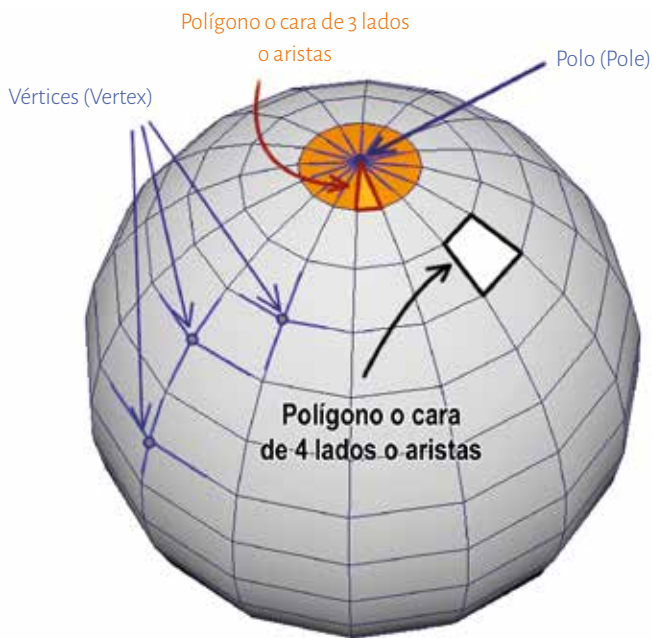


Figura 11b. Poles de cuatro o más aristas.

Figura 11.

RECOMENDACIONES DE MODELADO POLIGONAL 3D

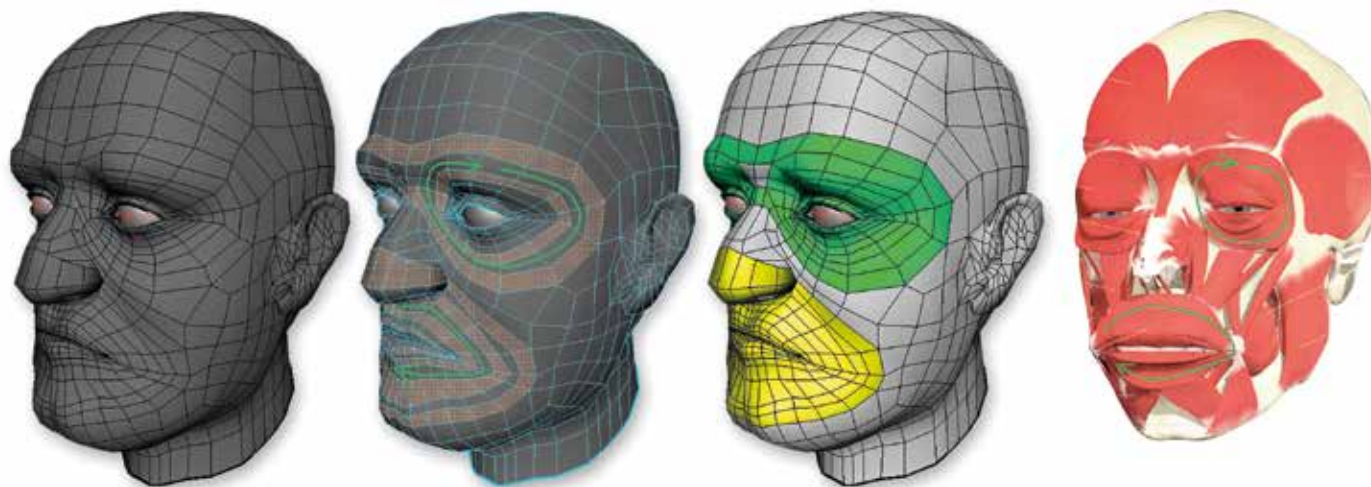
Enseguida presentamos algunas recomendaciones que se deben tomar en cuenta para que el modelo sea lo más útil según el propósito, cuando se está formando un modelo poligonal 3D, a partir de las operaciones ya citadas y otras que influyen en su desarrollo:

1. **Adecuación de la superficie.** Colocar o poner los *Edges* o *Face Loops* de acuerdo con el flujo de los músculos o de aquello que se va a deformar en el modelo. Los *Edges rings* (que son otra forma de agrupación de este tipo de componentes) deben fluir o distribuirse según la forma y el volumen o “abultamiento” de las partes por deformar, como lo sería en los músculos de un personaje.

2. **Geometría espacialmente uniforme.** De acuerdo con el “abultamiento” creado por esta cualidad, se recomienda mantener esta característica en la superficie; así, para cuando el modelo se subdivide, sea lo más predecible posible en cuanto a las deformaciones que llegara a tener (Figura 12).

3. **Topología cuadrangular (*Quad topology*).** Consiste en mantener lo más posible la geometría de polígonos de cuatro lados, como se ha mencionado de manera reiterada, en cualquier objeto 3D sin importar su forma, ya que los triángulos, cómo los polígonos de más de cuatro lados (o N lados), son impredecibles en cuanto a su comportamiento al deformarse sobre la superficie del modelo (Figura 13).

Rostro creado con geometría poligonal



Resaltando aristas

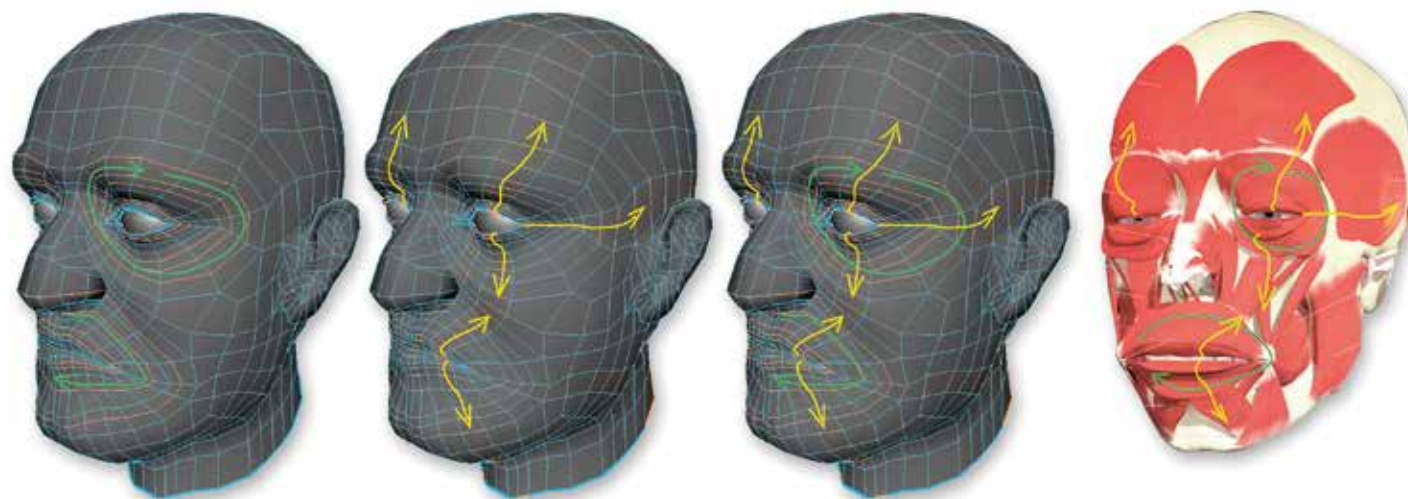
Resaltando algunos *Face Loops*

Resaltando los *Face Loops* más importantes

Fluidez y continuidad de los músculos (*referencia*)

Figura 12a. Adecuación de la superficie.

Rostro creado con geometría poligonal



Resaltando *Edges Loops*

Resaltando *Edges Rings*

Abultamientos de la superficie

Fluidez y continuidad de los músculos (*referencia*)

Figura 12b. Geometría espacialmente uniforme.

Figura 12.

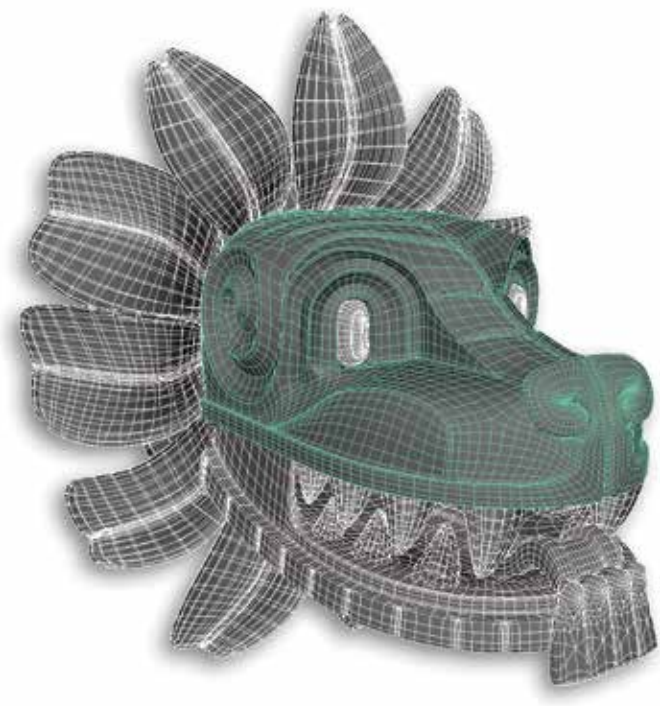


Figura 13a. Modelo con topología cuadrangular.

4. **Orientación de la fluidez.** Definir y ajustar los vértices de tipo *Pole* en particular, sobre la superficie de nuestro modelo, dicho ajuste va de la mano con la orientación de algunas aristas dependientes de estos vértices y también de los *loops* adyacentes a estos singulares elementos.

5. **Representación.** Podría no ser necesaria esta adecuación para aquellos objetos que no van a ser deformados para animarse, es decir, que son elementos estáticos. Sin embargo, es conveniente hacerlo por cuestiones de representación, como lo sería el sombreado y el texturizado del objeto, ya que los triángulos no son tan útiles para este propósito.

En el caso de los polígonos de más de cuatro lados, el riesgo que se tiene con ellos (si no se desea) es la "no planaridad" del componente, ya que al estar formado por más

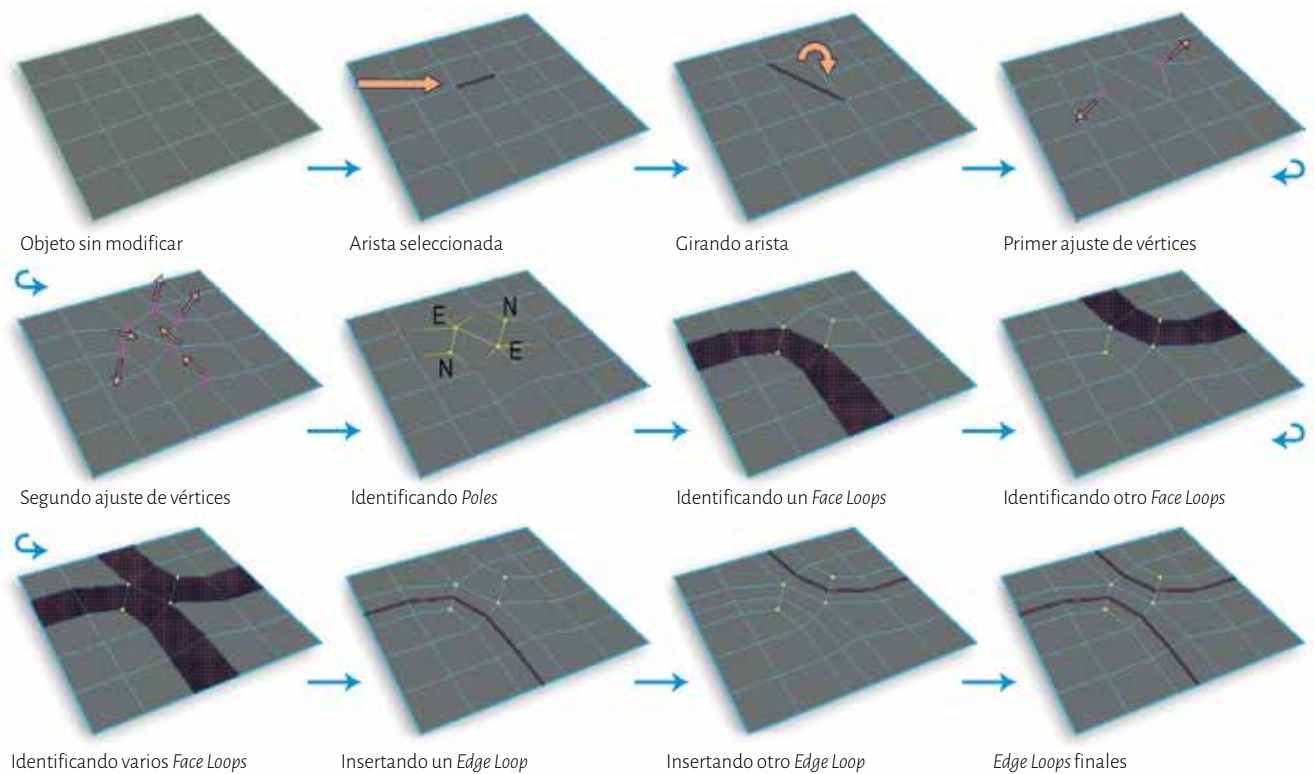


Figura 13b. Claves para modelado poligonal 3D con topología cuadrangular.

Figura 13.

caras triangulares que los polígonos cuadrangulares (dos solamente), es más difícil de controlar la planaridad de las caras triangulares entre sí, de tal suerte que al deformarse no queda clara la distorsión que llegan a tener, pues al ser invisible la división de estas caras, no se puede predecir adecuadamente dicha distorsión. Además, al deformarse intervienen otras características como la interpolación visual con otros polígonos a través de las aristas compartidas, o bien, con los mismos elementos triangulares del polígono y otros componentes no evidentes, como las que son normales de cada uno de éstos y de cada vértice del cual se conforman.

6. Excepción a la regla de mallas cuadrangulares. Si el modelo por usar está pensado para otros propósitos, como un videojuego o el análisis estructural por el método del elemento finito, o cualquier otro tipo de análisis como el bioclimático o térmico, incluso si se desea obtener un mallado totalmente plano, entonces se puede iniciar con un mallado triangular, aunque la organización de la superficie sería muy diferente de la ya mencionada hasta el momento. No obstante, es preferible modelar con mallas cuadrangulares y luego triangularlos, ya que con esto se garantiza una deformación más adecuada que, por así decirlo, se hereda de los polígonos de cuatro lados a los polígonos de tres lados resultantes.

Existen algoritmos eficientes que permiten la conversión de una malla cuadrangular a una triangular y viceversa, sin embargo, es necesario tomar en cuenta que hay diversos *software* como algunos CAE⁷ que generan el mallado de manera semi automática o automática a partir de modelos 3D con geometría NURBS, dando como resultado mallas poligonales, muchas de las veces con una configuración irregular (a veces mezcla de triángulos y rectángulos), que según el fin requerido, resulta suficiente (Figura 14).

Retopología

A partir de estas operaciones y recomendaciones, también es posible hacer retopología, es decir, reconstruir o reordenar

7. CAE: Ingeniería Asistida por Computadora (*Computer-Aided Engineering*, por sus siglas en inglés).

Triangulizar

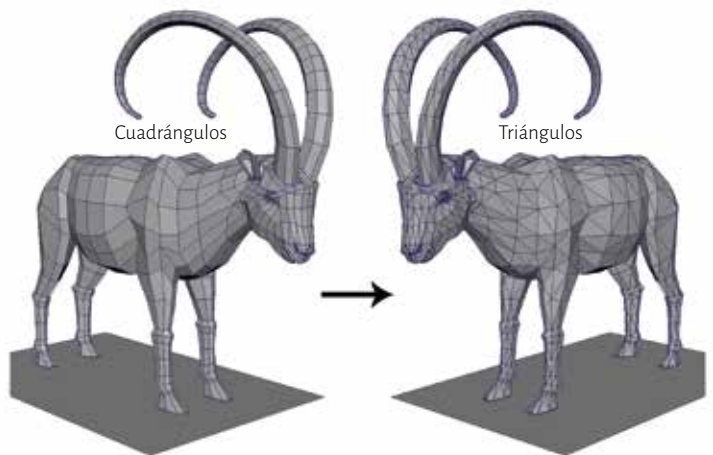


Figura 14a. Conversión de malla cuadrangular, modelo para videojuegos.

Malla cuadrangular



Malla triangular

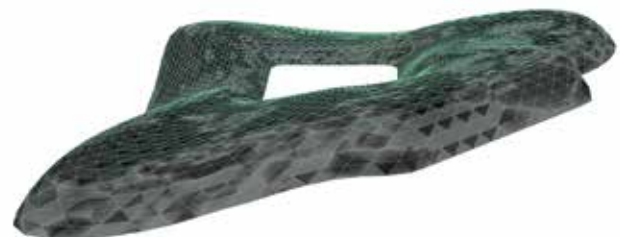


Figura 14b. Modelo para arquitectura (sistema Diagrid).

Figura 14.

los polígonos existentes de las superficies a un modelo (de baja cantidad de polígonos, mínima posible) previamente construido, convertido desde otro tipo de geometría, o generado por *software* de modelado 3D como Rhino, Z-Brush o Poser, entre otros, que en ciertas situaciones de exportación de geometría no consideran del todo el uso de polígonos cuadrangulares ni la fluidez y calidad necesaria para manipular el modelo y poderlo deformar, analizar, simular o animar.

Cabe decir que hay más alternativas para obtener modelos tridimensionales, y como en los comienzos de la computación gráfica, una de ellas es el escaneado de objetos en 3D, aunque, hay que señalar, dependiendo de la forma en que son “capturados” los datos correspondientes, pueden ser interpretados de varias formas y al igual que otros objetos generados por otros programas computacionales, es posible que tampoco generen una topología adecuada para ser aprovechados, por lo que será necesario aplicar retopología.

CONCLUSIONES

Como se ha podido verificar a lo largo de este documento, la geometría poligonal es un tema esencial para la generación de superficies y modelos 3D, por lo que es recomendable considerarlo no sólo en el ámbito profesional del diseño en general, sino también desde el ámbito de la enseñanza. Así que su estudio en cada uno de los cuatro programas de estudio de las licenciaturas de la División de CyAD Xochimilco resulta necesario.

Como se mencionó anteriormente, es fundamental que los alumnos conozcan el soporte teórico y metodológico de la geometría poligonal para que así, de acuerdo con las herramientas computacionales que se ocupan en las licenciaturas, las utilicen convenientemente en la realización de proyectos no sólo buscando la característica estética, sino también la funcional, es decir, como un soporte para el análisis y simulación digital.

No obstante, este tipo de geometría no es la única generadora de superficies y modelos tridimensionales.

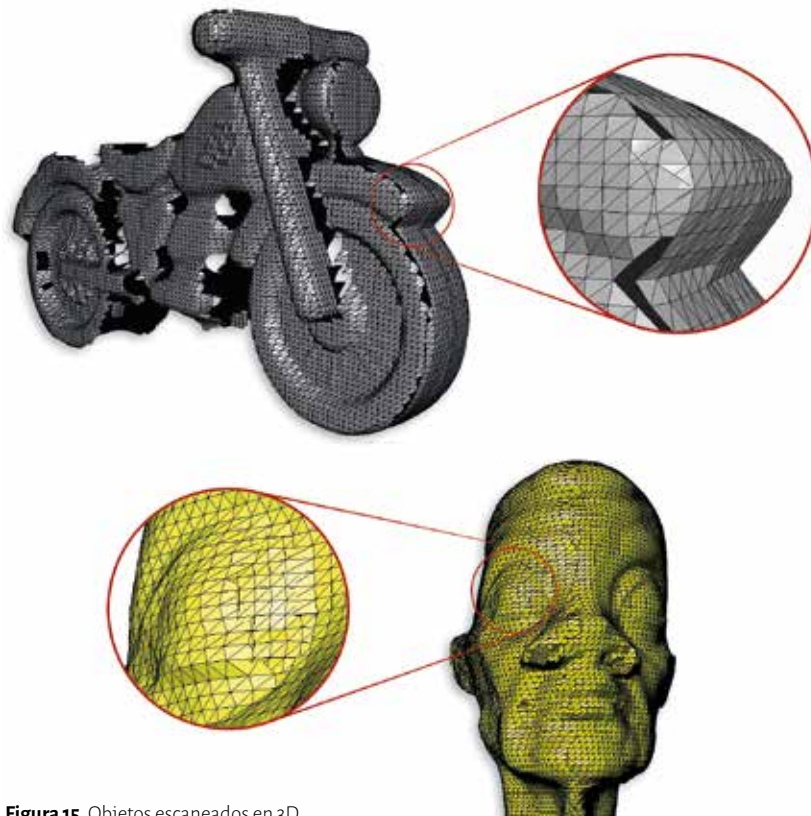


Figura 15. Objetos escaneados en 3D.

Tanto la geometría NURBS, como la geometría fractal o la geometría *Voronoi*, o incluso el método de superficie por subdivisión, son otras alternativas igual de valiosas que, por sí mismas, tienen un valor intrínseco que hay que considerar en los diferentes diseños. Como la geometría poligonal, estas otras geometrías que también tienen su propio soporte teórico y su metodología de aplicación. En este sentido, en el ámbito educativo sería aconsejable implementarlas, pero no de manera aislada, sino en conjunto, para poder ponderar los pros y contra de cada una de ellas.

Cabe decir, sin embargo, que tanto en el ámbito profesional, pero sobre todo en el académico, la utilización de estas herramientas sin la debida supervisión de expertos, no sólo en el manejo del *software*, sino también de los conceptos, procesos, técnicas y métodos de soporte, puede hacer que se conviertan en simples herramientas de uso, en lugar de verdaderos instrumentos pedagógicos, limitando a los diseñadores de hoy y del mañana, a simples operarios de cajas negras. En este sentido, es necesario que las escuelas de diseño capaciten a sus docentes en los conceptos anteriormente señalados.

FUENTES CONSULTADAS

AKLEMAN, Ergun, Jianer Chen, Qing Xing y Jonathan L. Gross, *Cyclic Plain-Weaving on Polygonal Mesh Surfaces with Graph Rotation Systems*. Documento en PDF.

MILLER, Erick, Paul Thuriot y Jeff Unay, *Autodesk Maya Technics, Hyper Realistic Creature Creation, Official Autodesk Training Guide*, 2a. ed., EUA, Autodesk, 2008.

BOTSCH, Mario, Mark Pauly, Leif Kobbelt, Pierre Alliez, Bruno Lévy, Stephan Bischoff y Christian Rössl, *Geometric Modeling Based on Polygonal Meshes*, Eurographics 2008, Full-Day Tutorial. Documento en PDF.

WALKER RICHARD, *El cuerpo humano*, Reino Unido, Dolphin Silver, Primal Pictures, Reino Unido, 2007.

KERLOW, Isaac V., *The Art of 3D Computer Animation and Effects*, 3a. ed., EUA, John Wiley & Sons, 2004.

KERLOW, Isaac V. y Judson Rosebush, *Computer Graphics for designers and artists*, EUA, Van Nostrand Reinhold, 1986.

Learning Maya 7. The Modeling & Animation Handbook, Alias Learning Tools, Official Alias Training Guide, Wiley, 2005.

LIJIMA, Takashi, *Action Anatomy, for Gamers, Animators, and Digital Artists*, EUA, Harper Design, 2005.

POTTMANN, Helmut, Andreas Asperl, Michael Hofer y Axel Kilian, *Architectural Geometry*, EUA, Bentley Institute Press, 2007.

Referencias electrónicas

ALLIEZ, Pierre, "Variational Tetrahedral Meshing", en www.sop.inria.fr/members/Pierre.Alliez/tet_meshing/tet_meshing.html (consultado en 2017).

Ayuda de Autodesk Maya, en http://download.autodesk.com/global/docs/maya2014/en_us/index.html?url=files/Polygons_overview_Introduction_to_polygons.htm.topicNumber=d30e151211 (consultado en 2017).

http://abreco.com.mx/manuales_topografia/teodolitos_estaciones/Manual%20de%20Operacion%20de%20Estacion%20Total.pdf.

LEE, Robert, "A Highlight of The History of 3D Graphics & Link to A Practitioner that Inspires You", en: http://exploringanimation.blogspot.mx/2015_03_01_archive.html (consultado en 2017).

MÄKELÄ, Niko, "Modeling for animation-Body", en: www.cgmascot.com/design/modeling-for-animation-body (consultado en 2017).

TABAJARA, Raúl, "Edge-Loop. Consejo y práctica", en: www.foro3d.com/f112/edge-loop-concepto-y-practica-33375.html (consultado en 2017).

UTTERSON, Andrew, "A Computer Animated Hand", en: <https://steemit.com/animation/@stino-san/a-computer-animated-hand> (consultado en 2017).

VILA ORTEGA, Pol, "Retopología", en: <http://polvilabcn.blogspot.mx/2011/03/retopologia.html> (consultado en 2017).