

RIKARDO MINGUEZ

GABIÑA

Reconstrucción digital de un cráneo humano

JAVIER MUNIOZGUREN

COLINDRES

1. Introducción

El proyecto de reconstrucción digital de un cráneo humano surge de la necesidad de obtener modelos digitales de calidad de los elementos del esqueleto humano, lo cual permite una posterior reproducción digital y el análisis de su movimiento. La investigación se ha realizado mediante herramientas de ingeniería inversa.

Este trabajo se ha realizado en el Laboratorio de Diseño de Producto (PDL), en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao (Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea).

Desde sus comienzos el Laboratorio de Diseño de Producto ha centrado sus esfuerzos en la investigación en las áreas de conocimiento de Ingeniería Inversa y Prototipado Rápido, y está buscando nuevos campos de aplicación de estos nuevos métodos de diseño y promocionando la transferencia tecnológica a las empresas del entorno.

La digitalización de la calavera es la primera etapa de un proyecto que el PDL está desarrollando junto con otro grupo de investigación en la Universidad de Córdoba.

En este primer paso, el proceso de digitalización y la evaluación de la calidad del modelo digital logrado se han realizado mediante las técnicas de ingeniería inversa disponibles en el PDL. Se ha elegido un cráneo para este propósito debido a su compleja geometría pues cuenta con varios agujeros y cavidades que hacen difícil el proceso de digitalización. Si es posible digitalizar correctamente el cráneo, se podrá digitalizar cualquier otro elemento del esqueleto.

Una vez que el cráneo es digitalizado, la siguiente etapa consiste en escanear una mandíbula humana y para reproducir digitalmente el movimiento real de los dos elementos (cráneo y mandíbula). El objetivo final es que se pueda digitalizar y reproducir cualquier elemento de su movimiento en una forma semi-automática y eficaz. Un análisis a fondo de este movimiento permitirá mejorar el diseño y la colocación de las prótesis dentales.

2. Recursos técnicos

El proceso de ingeniería inversa en el PDL usa el escáner 3D Handyscan REVscan y su software (VXscan), el Software de ingeniería inversa e inspección asistida por ordenador (Geomagic Studio cumple todos los requisitos) y una máquina Rapid Prototyping (Dimensión SST). La figura 1 muestra cómo el laboratorio PDL implementa este proceso.

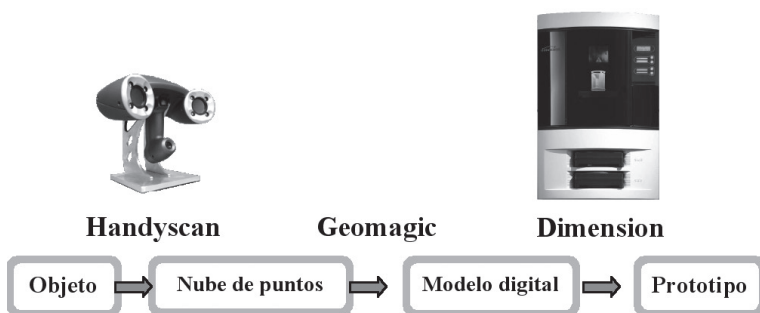


FIG. 1
Ingeniería Inversa en el PDL.

El escáner Handyscan REVscan de Creaform (Québec, Canadá) es un escáner láser de mano muy versátil. Puede crear rápidamente la nube de puntos de una superficie con una precisión de 0,05 mm. y una resolución de 0,1 mm. Otra de las ventajas de este escáner es su software: VXscan utiliza potentes algoritmos para crear una superficie poligonal de alta calidad.

Una de las principales características de este escáner es su método para posicionarse en el espacio con la ayuda de unas pequeñas referencias circulares en la pieza o en su entorno. Al comienzo de cada sesiones de captación de puntos, la primera vez que el escáner «ve» por lo menos cuatro referencias, fija el eje Z del sistema de coordenadas en la posición en la que se encuentra el escáner en ese momento, y así calcula y guarda la posición de cada referencia.

Estas referencias y las que el escáner «ve» a lo largo de la sesión de escaneado crean el modelo de posicionamiento. En cualquier momento, si el escáner puede «ver» por lo menos cuatro referencias del modelo de posición el software será capaz de calcular su propia posición en el sistema de coordenadas [1].

Una vez que el escáner se sitúa en el sistema de coordenadas, se puede empezar a tomar los datos necesarios para construir la nube de puntos del objeto a digitalizar.

Para obtener los datos de posición de los puntos de la superficie el escáner proyecta dos rayos láser en cruz sobre la superficie y la imagen de esta proyección es capturada por las cámaras. Como la posición relativa de ambas cámaras y de la fuente láser se calibra, el software calcula por triangulación las coordenadas de los puntos que marca la cruz [2].

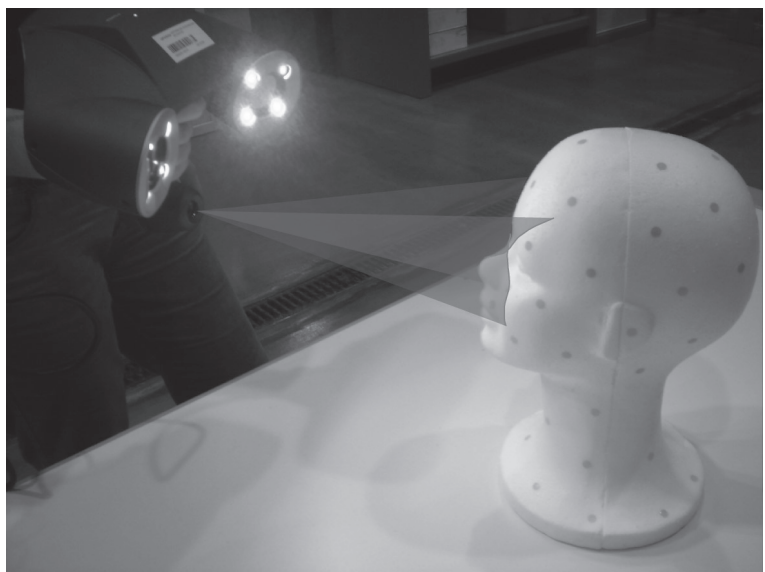


FIG. 2
Triangulación.

Cuando la cruz está bien definida en las imágenes captadas por las cámaras, el software es capaz de tomar datos de alta calidad, con el mínimo ruido. De lo contrario, puede aparecer ruido en la nube de puntos.

Para obtener la mejor definición en las imágenes, los parámetros del escáner se pueden ajustar a cada objeto que va a ser digitalizado. Los parámetros a ajustar son la potencia del láser y el tiempo de obturación; las superficies oscuras reflejan menos luz que las superficies claras, por lo que es necesario un mayor potencia del láser y un tiempo de obturación más largo. Una potencia demasiado baja o un tiempo de obturación demasiado corto producirá una reflexión demasiado débil, de manera que la cruz tendrá una mala definición. Por otra parte, cuando se trabaja con superficies claras, una potencia demasiado alta o un tiempo de obturación demasiado largo puede cegar las cámaras.

Moviendo el aparato a lo largo de toda la superficie, el escáner toma los datos necesarios para construir la nube de puntos de la superficie. El software procesa todos los datos disponibles para optimizar el resultado, por lo que barrer varias veces la misma superficie no significa un aumento de ruido en la nube de puntos, sino una mejora de la calidad de la nube de puntos [3].

Debido a una geometría complicada del objeto a registrar o a un mal posicionamiento del láser y las cámaras, puede haber zonas ciegas donde el escáner no pueda obtener ningún dato.

Una vez que el modelo es digitalizado, en función del nivel de detalle requerido en la nube de puntos, su densidad puede ser ajustada para optimizar la memoria. Como se ve en la figura 3, la densidad de los puntos puede reducirse considerablemente sin perder calidad superficial (la cantidad de puntos que se ha reducido al 20%) [4].



FIG. 3
Optimización de la densidad de la nube de puntos.

Una vez que la sesión de escaneado ha finalizado, la nube de puntos construida se puede exportar como un archivo STL y puede ser editado por Geomagic Studio. Este software ofrece una amplia gama de herramientas para reducir el ruido de la nube de puntos, rellenar agujeros, reconstruir zonas que faltan y modificar la nube de puntos original, y así obtener el modelo digital deseado.

Este modelo digital se pueden imprimir en la máquina de prototipado rápido Dimensión SST, de manera que el objeto original y el nuevo se puedan comparar [5].

Esta máquina de prototipado rápido usa el proceso FDM (Fused Deposition Modeling / Modelización por Deposición Fundida) para construir modelos funcionales en 3D de abajo hacia arriba, capa por capa. Estos modelos están hechos de un resistente y duradero plástico ABS (acrylnitrilo butadieno-estireno). Este plástico se calienta hasta un estado semi-líquido y es depositado en finas capas por una cabeza de extrusión.

Además de este ABS, en algunas capas la cabeza de extrusión deposita un material diferente llamado material soporte para crear estructuras de apoyo. En algunas partes esas estructuras son necesarias para sustentar las capas superiores. Como el material de apoyo es soluble, estas estructuras pueden ser eliminadas fácilmente una vez terminada la pieza.

Este método de fabricación hace posible la construcción de cualquier geometría compleja de un modo simple. El software Catalyst diseña las capas del modelo automáticamente y calcula las estructuras de apoyo necesarias que hay que crear para construir la pieza.

3. *Digitalización del cráneo*

Se describen a continuación algunas de las características del cráneo que hacen que el proceso de digitalización se complique.

3.1. *Superficie no uniforme*

La superficie del cráneo no tiene un color uniforme. Al establecer los parámetros de los sensores no ha sido posible encontrar una potencia del láser y un valor de obturación que den un buen resultado en toda la superficie del cráneo.

Generalmente, cuando se escanea una superficie no uniforme, el objeto se suele recubrir con polvo blanco o se pinta para lograr un acabado



FIG. 4
El cráneo a digitalizar.

mate y uniforme, el ideal para este sensor. Pero en nuestro caso, esta solución se ha descartado, con el fin de evitar daños en el cráneo.

Por lo tanto, se han buscado unos valores que den un resultado aceptable. Esto implica que se produzcan tres situaciones diferentes:

- Puntos más fiables hacen una nube de puntos de calidad.
- Algunos puntos con baja exposición producen agujeros en la nube de puntos.
- Algunos puntos con exposición saturada provocan la creación de ruido.

3.2. *Discontinuidad de la superficie*

Por otro lado, el cráneo tiene muchos agujeros que hacen difícil la obtención de una nube de puntos de buena calidad:

- Algunos agujeros son tan diminutos que el software no los ha detectado y ha creado una superficie continua.
- Para agujeros de tamaño medio, el software ha detectado que la superficie tiene una discontinuidad, pero no tiene suficientes datos para definir correctamente el hueco, y se ha generado ruido en torno a él.
- En los agujeros más grandes, el borde ha sido correctamente escaneado, por lo que el software ha sido capaz de reproducir fielmente el agujero.

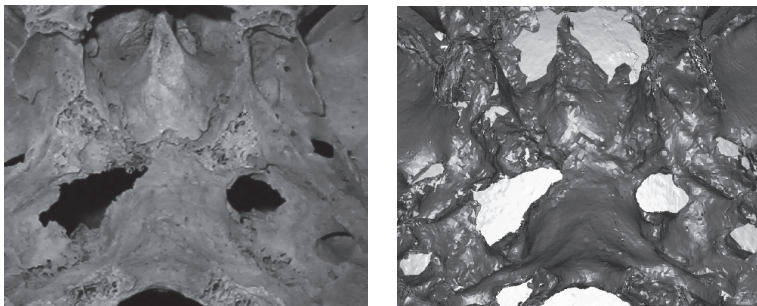


FIG. 5
Ruido en los datos en torno a los agujeros.

3.3. *Geometría compleja*

Otra dificultad que presenta el cráneo es su compleja geometría. Debido a la posición de las cámaras y del láser en el escáner, ha sido difícil o incluso imposible tomar datos de algunas zonas. Estas zonas difícilmente accesibles han sido escaneadas con un adecuado ángulo de ataque para capturar todos los datos posibles, pero incluso así han aparecido algunos huecos en la nube de puntos. [6]

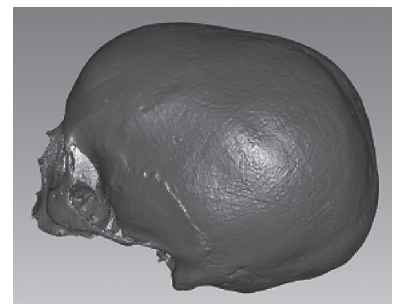


FIG. 6
Zonas ciegas generan huecos.

3.4. *Minimización de las referencias en el cráneo*

Para evitar la pérdida de datos de la superficie, se han fijado la mínima cantidad de referencias en el cráneo, y para poder llevar a cabo la adquisición digital de los puntos se han colocado las referencias alrededor del objeto, en elementos auxiliares. Para que el sistema de coordenadas se pueda situar respecto a esas referencias no se ha podido mover el objeto durante la sesión de escaneado.

Por lo tanto, el cráneo ha sido digitalizado en cinco posiciones diferentes para obtener cinco nubes de puntos diferentes que abarcan la superficie completa del cráneo. Cada posición ha sido digitalizada independientemente, sin objetivos comunes, por lo que cada nube de puntos está referenciada a su propio sistema de coordenadas.

4. *Edición de la nube de puntos*

como resultado de la digitalización de la calavera, cinco nubes de puntos han sido exportadas desde el VXscan. Estos archivos se han importado en Geomagic Studio para generar y editar el modelo digital del cráneo.

Para juntar las nubes de puntos y poder crear el cráneo en su conjunto, se indican los puntos comunes en las nubes de puntos, a fin de generar una primera composición del modelo. Para mejorar este primer intento, Geomagic procesa todo los datos para calcular la mejor posición relativa de las nubes de puntos [7]. Una vez registrado, las nubes de puntos parciales se fusionan para generar la nube de puntos general de todo el cráneo.

Los datos del borde de cada nube de puntos se han eliminado antes de la fusión con el fin de reducir la superposición de las superficies y, por lo tanto, reducir el ruido en la nube de puntos.

El escáner Handyscan REVscan procesa todos los datos recogidos para generar una nube de puntos de alta calidad. Si el escáner barre la superficie varias veces, el software tendrá más datos para procesar, y el resultado será más preciso. Pero, en los límites de las nubes de puntos hay pocos datos para ser procesados, por lo que los datos de los bordes se han suprimido, ya que pueden ser fuente de ruido.

Cuando se fusionan las superficies adquiridas, se obtienen una única nube de puntos de la totalidad del cráneo. Todavía tiene mucho ruido que debe ser quitado, especialmente alrededor de los agujeros. Geomagic

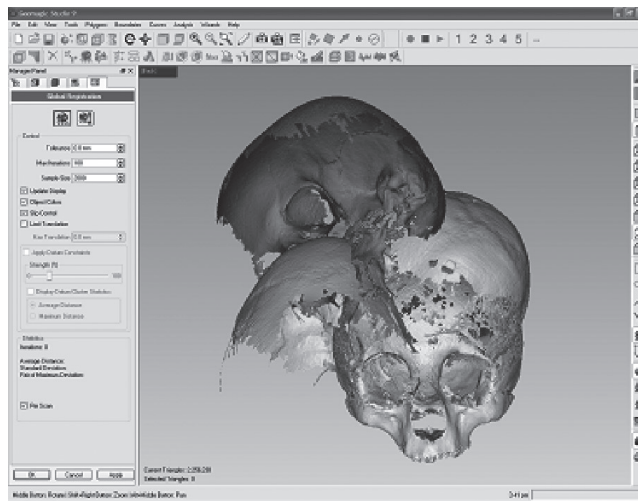


FIG. 7
El modelo se genera a partir de cinco superficies adquiridas.

tiene varias herramientas para detectar automáticamente, e incluso efectuar la reparación de este error en los datos. Sin embargo, estas herramientas deben utilizarse con sumo cuidado, ya que el usuario tiene poco control sobre las operaciones.

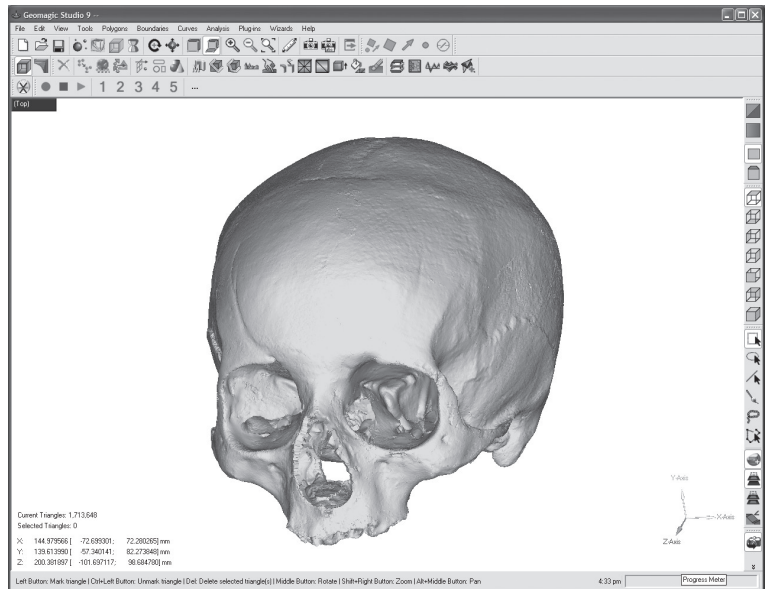
Como se ha señalado anteriormente, debido a la compleja geometría del cráneo, existen zonas ciegas en las que el escáner no es capaz de capturar los datos. Geomagic no tiene herramientas específicas para reconstruir estas zonas, pero se ha hecho un arreglo por medio de herramientas de llenado de agujeros.

Una vez que el modelo digital es editado, el último paso es la optimización de la nube de puntos. Hay varias herramientas que se pueden utilizar para optimizar el modelo.

VXscan genera una nube de puntos distribuidos de manera uniforme. Pero debido a la forma de la superficie, se requerirá una mayor densidad de puntos en algunas áreas que en otras [8]. El software de Geomagic puede reducir significativamente el tamaño del archivo mediante la adaptación de la densidad de puntos de la geometría del cráneo. Pero en este caso, como el cráneo no tiene una superficie lisa, la distribución original de los puntos se ha mantenido para evitar la pérdida de detalles en la superficie.

Para mejorar la visualización del cráneo, se pueden generar varias texturas e incluso se puede lograr un acabado similar al modelo original.

FIG. 8
Visualización mejorada.



5. Prototipado rápido

El modelo digital de la calavera ha sido prototipado en la máquina dimensión SST. El nuevo modelo está fabricado en plástico ABS, con una altura de capa de 0,254 mm.

Como el escáner sólo capta la superficie del cráneo, ha sido necesario crear una superficie cerrada para reconstruir el modelo. Esta superficie cerrada se ha logrado haciendo un offset de la superficie, generando una cáscara de 2 mm de espesor.

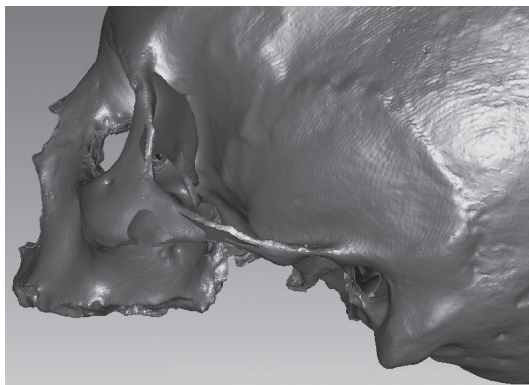


FIG. 9
Superficies autointersectándose.

Esta operación ha creado superficies autointersectándose tal como se muestra en la figura 10, que han sido reparadas para evitar cambios en la forma del modelo. Esta modificación debe hacerse con cuidado para mantener un mínimo espesor de la cáscara. Si la cáscara es muy delgada, pueden aparecer agujeros en el prototipo.

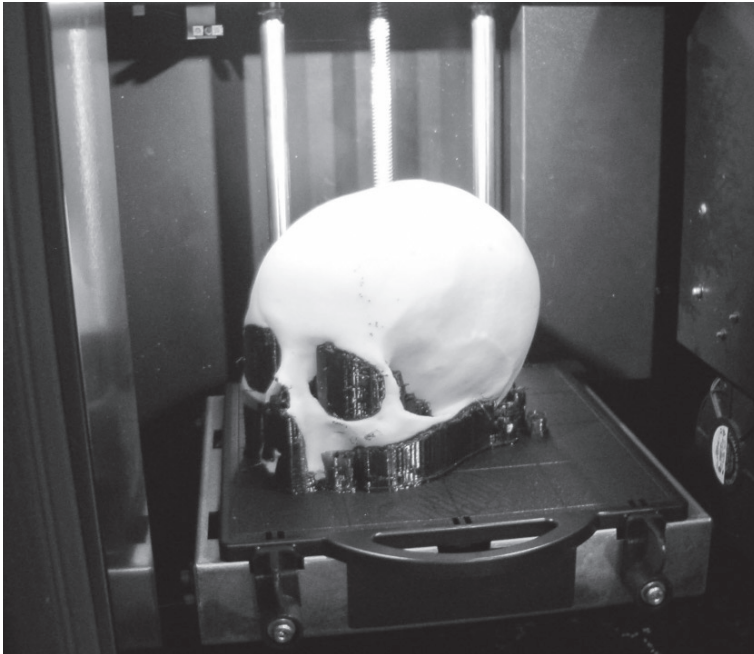


FIG. 10
El cráneo prototipado.

6. Conclusiones

Como se ha visto en este trabajo, el sistema de Ingeniería Inversa instalado en el PDL es un sistema válido para obtener un modelo digital del cráneo y de cualquier otro hueso del esqueleto de alta calidad. A pesar de su superficie heterogénea, no ha sido necesario aplicar el spray de polvo blanco en el cráneo para obtener un buen modelo digital. Además, incluso si el escáner no ha podido recoger puntos en determinadas zonas del cráneo, estas zonas se han reconstruido con Geomagic, el software de edición de la nube de puntos.

A lo largo del proceso de digitalización, se ha buscado una nube de puntos de la más alta calidad posible, y se ha evitado cualquier paso que pueda deteriorar el cráneo original.

Este proceso puede ser simplificado y puede obtenerse aún una mayor calidad de la nube de puntos. Los agujeros en la parte inferior del cráneo pueden cubrirse sin perder la forma de la calavera. Esto nos permite lograr una superficie continua, y, por tanto, una nube de puntos también continua, con una reducción de la cantidad de agujeros y de ruido.

Por otra parte, las referencias pueden ser fijadas al objeto en lugar de utilizar elementos auxiliares. Algún detalle de la superficie puede perderse en algunas zonas, pero toda la forma del objeto sería capturada en una única nube de puntos. Esto permitiría mover el objeto durante la sesión de escaneado.

Además, el aerosol puede ser aplicado para obtener una superficie más uniforme. Esto permite obtener una configuración óptima de escáner y, en consecuencia, reducir la aparición de ruido en la nube de puntos.

7. Trabajos futuros

El laboratorio tiene intención de repetir todo el proceso con un escáner de luz blanca estructurada. La resolución, la exactitud y el ruido de las nubes de puntos adquiridas por ambos, el escáner de láser y el escáner de luz estructurada, serán comparados, así como la calidad de los modelos digitales obtenidos tras edición. Esto permitirá elegir el mejor sistema para obtener el modelo digital del esqueleto.

Una vez digitalizado el cráneo humano, la siguiente etapa consiste en escanear una mandíbula humana. El movimiento de ambos elementos, cráneo y mandíbula, será analizado y, como resultado de este estudio, el diseño y la colocación de prótesis quirúrgicas se podrán mejorar.

Por último, con el fin de ampliar el estudio a todo el esqueleto, se intentará lograr un sistema para digitalizar semiautomáticamente cada uno de los elementos del esqueleto y reproducir el movimiento de todo el grupo. Un análisis profundo de este movimiento será el punto de partida para mejorar el diseño y la colocación de distintos tipos de prótesis quirúrgicas.

Referencias

- [1] Hébert, P., «A self referenced hand held range sensor». *LIBRO DE ACTAS DE LA IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANTAGES IN 3-D DIGITAL IMAGING AND MODELLING*, pp. 5-12 (2001).

- [2] Ouellet, J-N.; Hébert, P., «Developing assistant tools for geometric camera calibration: assessing the quality of input images». *LIBRO DE ACTAS DE LA 17TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PATTERN RECOGNITION*. Vol. 4, pp. 80-83 (2004).
- [3] Deschênes, D.; Hébert, P.; Lambert, P.; Quellet, J.-N.; Tubic, D., «Multiresolution interactive modeling with efficient visualization». *LIBRO DE ACTAS DE LA 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON 3D DIGITAL IMAGING AND MODELING*, pp. 39-46 (2005).
- [4] Kobbelt, L.; Botsch, M., «Freeform shape representations for efficient geometry processing». *SHAPE MODELING INTERNATIONAL*, pp. 111-115 (2003).
- [5] Sierra, E.; Solaberrieta, E.; Minguez, R.; Barrenetxea, L.; Belaustegigoitia, B.; Larrakoetxea, I., «A University-company project: design of a new surfboards digital modelling process». *LIBRO DE ACTAS DE LA 2TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMETRY AND GRAPHICS*, Salvador (Brasil) (2006).
- [6] Osorio, G.; Osorio, J.; Prieto, F., «Revisión sobre modelado de superficies complejas». *DYNA*. Vol. 71, pp-pp. 69-76 (2004).
- [7] Benkő, P.; Martin, R.; Varady, T., «Algorithms for reverse engineering boundary representations models». *COMPUTER AIDED DESIGN*, Vol. 33, No. 11, pp. 839-851 (2001).
- [8] Taubin, G., «Dual mesh resampling». *COMPUTER GRAPHICS AND APPLICATIONS*, pp. 180-188 (2001).