

**EXTRACCIÓN Y ESTRUCTURACIÓN DE LA INFORMACIÓN PROVENIENTE  
DE LA TECNOLOGÍA DE ESCÁNER LASER TERRESTRE.**

**Comparación de procesos de reducción poligonal relacionados con los  
mapas de desplazamiento.**

Autor: Arq. Juan Manuel Corso Sarmiento  
[juancorso@gmail.com](mailto:juancorso@gmail.com)

Director: Arq. Rolando Biere Arenas

Universidad Politécnica de Cataluña  
Máster Universitario En Gestión Y Valoración Urbana  
Departamento De Construcciones Arquitectónicas I  
Centro De Política De Suelo Y Valoraciones  
Barcelona, 2009

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>8</b>
1.1	Aspectos básicos de la tecnología de Laser Escáner Terrestre	9
<b>2</b>	<b>ESTADO DEL ARTE</b>	<b>16</b>
2.1	“Lasermapping”	16
2.2	Escáner Laser Aéreo Lidar	17
2.3	“Reflectance Field”	19
2.4	Ingeniería Inversa	20
2.5	Modelado y animación:	27
2.6	Aplicaciones en tiempo real	35
2.7	Arqueología y restauración	36
<b>3</b>	<b>ANÁLISIS DEL DETALLE DE LAS MALLAS</b>	<b>39</b>
3.1	Descripción de los proyectos analizados y estado de la información base	39
3.1	Construcción de la malla base, identificando la máxima resolución	46
3.2	Reducción del detalle de la malla como punto de comparación	54
4.1	Reducción de mallas libres	64
4.1.1	Reducción por curvatura y zonificación	64
4.1.2	Reducción por clasificación	74
4.2	Reconstrucción de la malla	82
4.2.1	Procesos semiautomático (Surface Phase)	82
4.2.2	Retopología	90
<b>5</b>	<b>MODELOS 3D A PARTIR DE IMÁGENES 2.5D</b>	<b>101</b>
5.1	Mapas de desplazamiento del modelo	102
5.2	Perdida de información entre mapas y modelos	107
5.2.1	Mapas de desplazamiento como herramienta de modelado	107
<b>6</b>	<b>ESTRUCTURA Y EXTRACCIÓN DE LOS MAPAS</b>	<b>115</b>
6.1	Estructura de los mapas	115
6.2	Extracción de la textura	118
<b>7.</b>	<b>EVALUACIÓN Y CONCLUSIONES</b>	<b>124</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS:

<b>Figura 1.1:</b> Nube de puntos Fachada Av. Drassanes.....	9
<b>Figura 1.2:</b> Referencia de la posición de la cámara y el escáner.....	10
<b>Figura 1.3:</b> Comparación entre escaneos y distancias de referencia.....	11
<b>Figura 1.4:</b> Funcionamiento del escáner de triangulación konica minolta 910.....	12
<b>Figura 1.5:</b> Rango del escáner, teoría de operación Konica minolta 910.....	12
<b>Figura 2.1:</b> Aplicación de Lasermat en fachadas volumétricas.....	16
<b>Figura 2.2:</b> Evaluación de los mapas de desplazamiento.....	17
<b>Figura 2.3:</b> Clasificación de escáner laser aéreo.....	17
<b>Figura 2.4:</b> Reconocimiento de planos de techo.....	18
<b>Figura 2.5:</b> Análisis de iluminación y porosidad entre “reflectance field” y laser escáner.....	19
<b>Figura 2.6:</b> Análisis de la iluminación sobre una superficie porosa.....	19
<b>Figura 2.7:</b> Modelos multiresolución David.....	20
<b>Figura 2.8:</b> Operaciones de reducción de superficie.....	20
<b>Figura 2.9:</b> Operaciones de reducción de la superficie.....	21
<b>Figura 2.10:</b> Error métrico.....	22
<b>Figura 2.11:</b> Observaciones de errores geométricos.....	23
<b>Figura 2.12:</b> Criterios de decimar arriba y plano de rendimiento máximo abajo.....	24
<b>Figura 2.12:</b> Ejemplos de aspect ratio.....	24
<b>Figura 2.13:</b> Optimización geométrica.....	24
<b>Figura 2.14:</b> Simplificación automática.....	25
<b>Figura 2.15:</b> Reducción progresiva de la malla según Hoppe.....	25
<b>Figura 2.16:</b> Reducción automática de los polígonos.....	26
<b>Figura 2.17:</b> Vertex Clustering.....	27
<b>Figura 2.18:</b> Metodología construcción mapa de desplazamiento.....	27
<b>Figura 2.19:</b> Selección de bordes: seleccionando puntos sucesivos en vistas 2D se traza la trayectoria más cercana entre puntos de los bordes de una malla.....	28
<b>Figura 2.20:</b> Vector de desplazamiento.....	29
<b>Figura 2.22:</b> Comparación desplazamiento y vector de desplazamiento.....	30
<b>Figura 2.23:</b> El conejo, 12 posiciones utilizadas para la construcción de la normal.....	32
<b>Figura 2.24:</b> Zonas poca visibilidad.....	32
<b>Figura 2.25:</b> Modelos con mapas de normales.....	33
<b>Figura 2.26:</b> Hercules vs. lion Nemeo, siglo XVII.....	34
<b>Figura 2.27:</b> Multipol passes.....	34
<b>Figura 2.29:</b> Estructura interior identificada con radiografías. Fuente: Mattia Mercante, Tesis.	
<b>Figura 2.28:</b> Reducción de modelos de malla, mediante la extracción algorítmica de mapas de desplazamiento.....	36
<b>Figura 2.30:</b> Prueba de barniz en el modelo 3D e identificación de zonas previamente restauradas.....	37
<b>Figura 2.31:</b> Modelo digital tridimensional.....	39
<b>Figura 3.1:</b> Libro de materiales y Material Perlato.....	39
<b>Figura 3.2:</b> Posiciones de escáner Konica minolta superpuestas.....	40
<b>Figura 3.3:</b> Render del capitel, con la imagen fotográfica para aumentar el detalle.....	41
<b>Figura 3.4:</b> Diferencia entre resolución y escala en un modelo de nube de puntos.....	42
<b>Figura 3.5:</b> Proceso de escaneo de la av. Drassanes.....	44
<b>Figura 3.6:</b> Posiciones del levantamiento de la Batlló.....	45
<b>Figura 3.7:</b> Error en la unión de posiciones de escaneo.....	46
<b>Figura 3.8:</b> Malla con un suavizado mínimo de la nube filtrada y resolución de 0,01m entre vértices.....	46
<b>Figura 3.9:</b> Comparación de mallas sin filtrar y filtrada en su construcción inicial.....	47
<b>Figura 3.10:</b> Malla de la nube de puntos sin filtros.....	48
<b>Figura 3.11:</b> Media entre modelos y nubes de puntos.....	49
<b>Figura 3.12:</b> Comparación entre la malla de la nube de puntos sin filtrar y la malla de la nube de puntos filtrada.....	49
<b>Figura 3.13:</b> Sección del modelo de la malla de la nube de puntos con filtro y sin filtro en cm.....	50
<b>Figura 3.14:</b> Izquierda VVD celda de 0,895mm y derecha celda de 0,448mm CDM.....	51
<b>Figura 3.15:</b> Comparación entre VVD vs CDM como puntos.....	51
<b>Figura 3.16:</b> Comparación de la malla limpia y la malla original 34.956 polígonos.....	51

<b>Figura 3.17:</b> Comparación del CCD contra mallas sin detalle.....	52
<b>Figura 3.18:</b> Comparaciones Shell/Shell, representadas con mapa temático.....	53
<b>Figura 3.19:</b> Malla base comparada con un plano.....	54
<b>Figura 3.20:</b> Suavizado de la superficie para reducir el detalle.....	54
<b>Figura 3.21:</b> Comparación de la malla plana y la malla suavizada.....	55
<b>Figura 3.22:</b> Comparación malla original limpia contra un plano.....	55
<b>Figura 3.23:</b> Comparación de la malla original contra la malla suavizada.....	57
<b>Figura 3.24:</b> Malla Suavizada comparada con la malla base y análisis de curvatura.....	57
<b>Figura 3.25:</b> Malla Suavizada hasta eliminar los indicios de los ladrillos comparada con la malla base y análisis de curvatura.....	57
<b>Figura 3.26:</b> Malla plana con la malla base y análisis de curvatura.....	57
<b>Figura 3.27:</b> Media entre malla de la nube de puntos sin filtro contra mallas suavizadas, malla proyectada a un plano, malla decimada 1% y retopología.....	58
<b>Figura 3.28:</b> Análisis de desviación estándar malla contra malla (Shell/Shell) de los segmentos del modelo de Drassanes.....	59
<b>Figura 3.29:</b> Secciones comparativas entre mallas de 0 a 50 cm.....	59
<b>Figura 3.30:</b> Secciones comparativas entre mallas de de 135 a 180 cm.....	60
<b>Figura 3.31:</b> Mapa de normales entre un modelo decimado 1% y la malla sin filtros.....	61
<b>Figura 3.32:</b> Mapa de normales entre un modelo de Retopología y la malla sin filtros.....	62
<b>Figura 4.1:</b> Selección por curvatura y decimación de la malla.....	64
<b>Figura 4.2:</b> Suavizado por curvatura y decimación.....	67
<b>Figura 4.3:</b> Problemática del ruido en los bordes.....	67
<b>Figura 4.4:</b> Desviación del modelo: Decimación directa y decimación porcentual sobre la selección por curvatura 106.314.....	68
<b>Figura 4.5:</b> Análisis de curvatura: Decimación directa y decimación porcentual sobre la selección por curvatura 106.314 $\Delta$ .....	68
<b>Figura 4.6:</b> Desviación del modelo: Decimación directa y decimación porcentual sobre la selección por curvatura 51.932 $\Delta$ .....	69
<b>Figura 4.7:</b> Análisis de curvatura: Decimación directa y decimación porcentual sobre la selección por curvatura 51.932 $\Delta$ .....	69
<b>Figura 4.8:</b> Desviación del modelo: Decimación a 30.000 $\Delta$ .....	69
<b>Figura 4.9:</b> Análisis de curvatura: Decimación a 30.000 $\Delta$ .....	69
<b>Figura 4.10:</b> Desviación del modelo: Suavizado por curvatura y decimación a 80.000 $\Delta$ .....	70
<b>Figura 4.11:</b> Análisis de curvatura: Suavizado por curvatura y decimación a 80.000 $\Delta$ .....	70
<b>Figura 4.12:</b> Desviación del modelo: Suavizado por curvatura y decimación a 50.000 $\Delta$ .....	70
<b>Figura 4.13:</b> Análisis de curvatura: Suavizado por curvatura y decimación a 50.000 $\Delta$ .....	70
<b>Figura 4.13:</b> Análisis desviación del modelo, comparación malla sin filtros y malla reducidas..	71
<b>Figura 4.14:</b> Metodología propuesta para la reducción por curvatura.....	71
<b>Figura 4.15:</b> Comparación de un arco proyectado a un cilindro, por la detección del radio contra la malla base.....	74
<b>Figura 4.16:</b> Desviación del modelo representado con vectores: Decimación 1%.....	77
<b>Figura 4.17:</b> Análisis de curvatura: Decimación 1%.....	78
<b>Figura 4.18:</b> Desviación del modelo representado con vectores: Planos suavizados y decimados 50.000.....	78
<b>Figura 4.19:</b> Análisis de curvatura: Planos suavizados y decimados 50.000 $\Delta$ .....	78
<b>Figura 4.20:</b> Desviación del modelo representado con vectores: Proyección en planos y cilindros.....	78
<b>Figura 4.21:</b> Análisis de curvatura: Proyección en planos y cilindros.....	78
<b>Figura 4.22:</b> Desviación del modelo, representado con vectores: Decimación 2%.....	78
<b>Figura 4.23:</b> Análisis por curvatura: Decimación 2%.....	78
<b>Figura 4.24:</b> Desviación del modelo representado con vectores: Bordes unidos malla decimada 2%con 24.000.....	79
<b>Figura 4.25:</b> Análisis de curvatura: Bordes unidos malla decimada 2% con 24.000 $\Delta$ .....	79
<b>Figura 4.26:</b> Análisis desviación del modelo, comparación malla sin filtros y mallas reducidas, distancia media.....	79
<b>Figura 4.27:</b> Metodología propuesta para malas nubes de puntos clasificadas.....	80
<b>Figura 4.28:</b> Proyección de superficies irregulares a planos y curvas.....	81
<b>Figura 4.29:</b> Comparación con la malla base.....	81
<b>Figura 4.30:</b> Superficie NURBS.....	82

<b>Figura 4.31:</b> Errores en los paths antes y después.....	82
<b>Figura 4.32:</b> Fases del Shape Phase con la información del Laser escáner Minolta.....	82
<b>Figura 4.33:</b> Corrección de los patches.....	82
<b>Figura 4.35:</b> Clasificación automática, 200001.....	83
<b>Figura 4.36:</b> Decimación de 200001 a 24000.....	83
<b>Figura 4.37:</b> Fashion Phase: Clasificación automática 80.000 y 42.204 $\Delta$ respectivamente....	86
<b>Figura 4.38:</b> Desviación del modelo vectores: Fashion Phase clasificación automática.....	86
<b>Figura 4.39:</b> Análisis de curvatura: Fashion Phase clasificación automática.....	86
<b>Figura 4.40:</b> Desviación del modelo vectores: Fashion Phase clasificación como planos.....	86
<b>Figura 4.41:</b> Análisis de curvatura: Fashion Phase clasificación como planos.....	86
<b>Figura 4.42:</b> Desviación del modelo vectores: Fashion Phase clasificación automática bordes por curvatura 42.204.....	87
<b>Figura 4.43:</b> Análisis de curvatura: Fashion Phase clasificación automática bordes por curvatura 42.204 $\Delta$ .....	87
<b>Figura 4.44:</b> Análisis desviación del modelo. Comparación sin filtros y las reducidas. ....	87
<b>Figura 4.45:</b> Metodología propuesta para reconstruir una malla desde Surface Phase.....	88
<b>Figura 4.46:</b> Planificación de la retopología.....	90
<b>Figura 4.47:</b> Malla de alta resolución adjunta a la zphere.....	91
<b>Figura 4.48:</b> Malla de alta resolución y trama de la retopología.....	91
<b>Figura 4.49:</b> Secciones por niveles de la malla de retopología.....	92
<b>Figura 4.51:</b> Comportamiento de las mallas de retopología en superficies ortogonales.....	93
<b>Figura 4.52:</b> Estructura de la retopología reforzando las aristas.....	94
<b>Figura 4.53:</b> Retopología con vértices más precisos.....	95
<b>Figura 4.54:</b> Malla de retopología de mayor resolución.....	96
<b>Figura 4.55:</b> Desviación del modelo, representación con vectores: Retopología homogénea, nivel de proyección 1.....	97
<b>Figura 4.56:</b> Análisis por curvatura: Retopología homogénea, nivel de proyección 1.....	97
<b>Figura 4.57:</b> Desviación del modelo representado con vectores: Retopología homogénea, nivel de proyección 1.....	97
<b>Figura 4.58:</b> Análisis por curvatura: Retopología homogénea, nivel de proyección 2.....	97
<b>Figura 4.59:</b> Desviación del modelo representado con vectores: Retopología homogénea, nivel de proyección 3.....	97
<b>Figura 4.60:</b> Análisis por curvatura: Retopología homogénea, nivel de proyección 3.....	97
<b>Figura 4.61:</b> Desviación del modelo representado con vectores: Reto. Sin “adaptive skin”, nivel de proyección 1.....	98
<b>Figura 4.62:</b> Análisis de curvatura: Reto. Sin “adaptive skin”, nivel de proyección 1.....	98
<b>Figura 4.63:</b> Análisis desviación del modelo, comparación de la malla de la nube de puntos sin filtro y las reconstruidas por retopología.....	98
<b>Figura 4.64:</b> Metodología propuesta para reconstruir la malla de escáner laser mediante retopología y “adaptive Skin” .....	99
<b>Figura 5.1:</b> Modelo de clasificación con normales invertidas y el modelo.....	101
<b>Figura 5.2:</b> Normales.....	101
<b>Figura 5.3:</b> Mapa de desplazamiento.....	102
<b>Figura 5.4:</b> Modelo 3D con herramientas GIS.....	103
<b>Figura 5.5:</b> Proyectando rayos para determinar el valor del desplazamiento.....	103
<b>Figura 5.6:</b> Correspondencia entre vértices.....	104
<b>Figura 5.7:</b> Proyección del modelo sobre un plano de múltiples niveles de resolución poligonal.....	104
<b>Figura 5.8:</b> Nube de puntos filtrada en XY.....	105
<b>Figura 5.9:</b> Modelo generado a partir de un Geotif.....	106
<b>Figura 5.10:</b> Modelo generado a partir de un DEM.....	106
<b>Figura 5.11:</b> Comparación de la malla original y el producto de la malla simplificada con el detalle del mapa de desplazamiento.....	108
<b>Figura 5.12:</b> Mapa de desplazamiento.....	109
<b>Figura 5.13:</b> Mapa de desplazamiento con punto flotante 32 bits.....	109
<b>Figura 5.14:</b> Análisis del modelo, distancia media de las mallas modeladas a partir de una malla de retopología de baja resolución a través de los mapas de desplazamiento comparada con la malla de la nube de puntos sin filtros.....	110

<b>Figura 5.15:</b> Análisis del modelo, distancia media de las mallas modeladas a partir de una malla de retopología de baja resolución a través de los mapas de desplazamiento comparada con la malla de la nube de puntos sin filtrar.....	101
<b>Figura 5.16:</b> Desviación entre modelos, distancia media.....	112
<b>Figura 5.17:</b> Ejemplos de las mallas comparadas.....	112
<b>Figura 5.18:</b> Niveles poligonales quards hasta el punto de equivaler a un pixel en programas de imagen de modelado.....	112
<b>Figura 5.19:</b> Desviación estándar entre malla y malla (Shell/shell) .....	114
<b>Figura 5.21:</b> UV automáticas.....	115
<b>Figura 5.22:</b> Maximizar el espacio de las UV.....	116
<b>Figura 5.23:</b> PolyCube.....	116
<b>Fuente 5.24:</b> Oclusiones.....	118
<b>Figura 5.25:</b> Estructura del mapa de color.....	117
<b>Figura 5.26:</b> Mapa con poca resolución en los Texels.....	119
<b>Figura 5.27:</b> Múltiples mapas con mayor resolución.....	119
<b>Figura 5.28:</b> Resolución del mapa de color.....	120
<b>Figura 5.29:</b> Metodologías para reestructurar la información de color de la nube de puntos..	122

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Comparación de modelos.....	33
<b>Tabla 2:</b> Toma de datos materiales.....	40
<b>Tabla 3:</b> Toma de datos parking.....	40
<b>Tabla 4:</b> Toma de datos capitel.....	41
<b>Tabla 5:</b> Comparación entre las mallas de la nube con y sin filtro.....	50
<b>Tabla 6:</b> Comparación de la malla CCD materiales con la malla limpia, suavizada y plana.....	52
<b>Tabla 7:</b> Comparación de la malla CCD parking con la malla limpia, suavizada y plana.....	53
<b>Tabla 9:</b> Tabla comparativa entre la malla de la nube de puntos sin filtros y mallas suavizadas, superficie plana, malla decimada al 1% y retopología.....	56
<b>Tabla 10.1:</b> Comparación entre malla de la nube de puntos sin filtro contra la malla limpia y contra la malla de polígonos homogéneos en tamaño.....	65
<b>Tabla 10.2:</b> Reducción progresiva.....	66
<b>Tabla 10.3:</b> Decimación directa y decimación porcentual sobre la selección por curvatura.....	66
<b>Tabla 10.4:</b> Reducción directa.....	67
<b>Tabla 10.5:</b> Comparación de los análisis de curvatura.....	68
<b>Tabla 11.2:</b> Comparación de la mala de la nube de puntos sin filtro y la clasificación proyectada a planos y cilindros.....	74
<b>Tabla 11.3:</b> Comparación de la malla de la nube de puntos sin filtros con las mallas decimadas.....	74
<b>Tabla 11.4:</b> Malla de la nube de puntos sin filtrar comparada con la malla decimada a un 1%, con los vértices de los bordes de las mallas fijas en el proceso de decimación.....	74
<b>Tabla 11.5:</b> Comparación malla de la nube de puntos sin filtrar vrs malla de la clasificación decimada un 2% con los bordes unidos.....	74
<b>Tabla 11.6:</b> Comparación malla de la nube de puntos sin filtro y mallas suavizadas y posteriormente decimadas.....	74
<b>Tabla 12.1:</b> Comparación de la malla de la nube de puntos sin filtrar y la malla de Fashion antes y después de filtrar.....	84
<b>Tabla 12.2:</b> Comparación de la malla de la nube de puntos sin filtros y la malla reconstruida por Fasion Phase.....	84
<b>Tabla 12.3:</b> Comparación malla de la nube de puntos sin filtros y malla Fashion Phase con bordes por curvatura.....	84
<b>Tabla 12.4:</b> Comparación entre la malla de la nube de puntos sin filtro y la malla clasificada proyectada a planos y cilindros.....	84
<b>Tabla 13.1:</b> Comparación entre Pixel y pìxol.....	84
<b>Tabla 13.2:</b> Número de quads según los niveles de resolución definidos.....	84
<b>Tabla 13.3:</b> Comparación entre malla de la nube de puntos sin filtrar con la malla de retopología sin “adaptive Skin”.....	93
<b>Tabla 13.4:</b> Comparación entre malla de la nube de puntos sin filtrar con la malla de retopología en superficies rectangulares con “adaptive skining”.....	94
<b>Tabla 13.4:</b> Comparación de la malla de la nube de puntos sin filtro y la retopología con las aristas reforzadas.....	94
<b>Tabla 13.5:</b> Comparación de la malla de la nube de puntos sin filtros y la malla de retopología con mayor precisión en los vértices de las aristas y mayor resolución.....	95
<b>Tabla 13.6:</b> Comparación de malla de la nube de puntos sin filtros y malla de retopología con mayor resolución 1 vértice cada 10cm en promedio.....	96
<b>Tabla 15:</b> Comparación de mallas modeladas a partir de mapas de desplazamiento contra el modelo de ala resolución de la nube de puntos sin filtro.....	110

## 1 Introducción

"In light of the current digital revolution. How does one create an architecture that engages participants simultaneously in the world of the real and the virtual?"<sup>1</sup>

La tecnología actual es capaz de producir tantos datos que llega al punto de la saturación y nos impide el aprovechamiento de la información que genera, por ello el creciente interés de filtrar y estandarizar la información, ya no solo de recolectar y agrupar según características, sino de plantear metodologías que nos permitan relacionar estas grandes bases de datos, para extraer la información que realmente necesitamos.

Por ello la tecnología de escáner laser terrestre, la cual genera millones de datos se ve limitada, ya que es tan densa que impide interactuar, al punto que percibimos su complejidad pero no la logramos entenderla del todo.

Por lo cual esta tesis se plantea un reto, el estructurar de diversas maneras la información del escáner laser en una escala concreta, que permita identificar diferencias en el proceso de estructurar la información, siendo una base para futuras aproximaciones.

En consecuencia se siguieron dos premisas, la primera es que los modelos de alta resolución se pueden descomponer en partes, logrando obtener un modelo que identifique las formas del objeto, excluyendo para ello la porosidad, los errores de la tecnología y pequeños detalles como grietas, ya que esta información de mayor detalle se extraerá en mapas que almacenen esta información, mostrando que aunque esta información se divide para su análisis y manipulación, se puede reunir en único modelo con diferentes capas de información, logrando un modelo estructurado de menor tamaño poligonal pero con la misma o mayor cantidad de información que el modelo original, ya que al ser manipulable puede ser complementado y corregido. La segunda premisa es que la información que se extrae del modelo es información manipulable en dos dimensiones aunque sea aplicada en un modelo de tres dimensiones, permitiendo no solo comprimir la información en diferentes formatos, sino que esta información se puede cruzar con otras, generando nuevos mapas, que afectan directamente al modelo analizado, llegando a resaltar, complementar o filtrar parte de la información, obteniendo con esto un modelo proveniente de una gran cantidad de información, pero a su vez un modelo manipulable en todos los sentidos, tanto geoméricamente, como al incorporarle detalles, o datos que permitan entender la información que esta tecnología extrae de la realidad.

En esta búsqueda se llegó un paso más adelante, al generarse modelos en los cuales su resolución poligonal es paramétrica, permitiendo tener un modelo que contiene la información del modelo simplificado, pero que a su vez gracias a esta parametría permite pasar al mismo modelo de millones de polígonos interactivamente, permitiendo tener un modelo que se adapta según se necesite, de igual forma este modelo simplificado puede llegar a ser paramétrica en cuanto a las piezas que lo componen, ya que se da una previa clasificación, de la geometría determinando su construcción geométrica, permitiendo alterar y analizar la geometría básica del modelo.

---

<sup>1</sup> TSCHUMI, Bernard, Bernard Tshumi Architects & Virtuale, Actar 2004.



## 1.1 Aspectos básicos de la tecnología de Laser Escáner Terrestre

El uso de sofisticados equipos de computación y el enorme poder que hay en los modelos digitales actuales en el campo del entretenimiento y la industria, como en los gráficos, efectos especiales y el enorme detalle tridimensional de los videojuegos, a alcanzado y superado las expectativas de la audiencia, en cuanto a la calidad del contenido y las técnicas de visualización. Estas expectativas no se han alcanzado en los modelos utilizados en la ingeniería inversa, en busca de descifrar los proyectos ya construidos. En los cuales el detalle y precisión de la información extraída de la realidad juega un rol muy importante tanto a escala arquitectónica como urbana, asociando el nivel de detalle con una cantidad de datos difíciles de manipular, imponiendo un reto en cuanto a la administración e implementación de estos recursos.

Una parte importante de esta información detallada con precisión tomada de la realidad, sólo puede ser alcanzada con ayuda de sensores terrestres, entre los cuales está el escáner laser terrestre, el cual comparado con otras metodologías presenta las siguientes ventajas:

- Alta productividad, en términos de adquisición de datos o puntos por unidad de tiempo y de área abarcada por el escáner.
- Densidad y resolución, permitiendo una densidad y distribución mayor que los medios tradicionales.
- Rápida toma de datos en zonas abiertas.
- Mayor precisión métrica.
- Simplifica la decisión de puntos a medir, ya que otros sistemas se basan en medir bordes o puntos y con el escáner se cubren superficies completas.
- Evita el contacto directo al objeto escaneado, siendo importante cuando el objeto es de interés cultural.
- Permite un pos proceso en sistemas convencionales CAD y GIS.
- Maneja la información por áreas no por puntos, facilitando la manipulación.
- Pocas personas son necesarias para coleccionar la información, permitiendo enfocar los recursos en el postproceso.

Por otra parte las nubes de puntos también están afectadas por vacíos de información, ya que no hay una distribución comprensiva de los puntos y porque hay áreas que no permiten una adecuada adquisición de los datos, dado tanto por oclusiones de fachada gracias a elementos externos, que hacen sombra o bloquean, como los arboles, los carros, los letreros, hasta por transeúntes, existiendo una oclusión generada por la misma fachada, debido al ángulo de visión oblicua, en la que los balcones o hasta las propias ventanas generen sombras en dirección a la superficie escaneada. Estos problemas se pueden solucionar aumentando el número de posiciones de escaneo, completando la superficie usando un escáner que tenga tanto la resolución que se necesita para la escala y la complejidad del objeto. Cuando se habla de escala arquitectónica estas soluciones no son fáciles de aplicar, por las restricciones impuestas por la



Figura 1.1: Nube de puntos Fachada Av. Drassanes

espacialidad, por la complejidad del elemento o del contexto.

Aumentando las complicaciones en las aplicaciones de modelos de tres dimensiones de gran complejidad por su escala, como la urbana, en las que el resultado final termina siendo una malla densa y complicada, que requiere en la mayoría de los casos un postproceso manual de simplificación, en el que también se busca cerrar huecos, para que sea útil el modelo 3D. Por ello se da una aproximación a proyectos que han buscado reemplazar grandes superficies planas con “planar primitivos”, extraídas por medio de un proceso de segmentación, en la que las superficies no planas se reemplazan con mallas de geometrías básicas, completando un modelo final muy comprimido.

La representación de elementos arquitectónicos en superficies de mallas proveniente de la información del TLS es normalmente inadecuada, ya que las esquinas son suavizadas por las superficies triangulares, sobre todo cuando estos bordes están cerca unos de otros, se filtran las nubes reduciendo el nivel de detalle en zonas que necesitan mayor densidad de puntos y se generan mallas libres que no tienen en cuenta la geometría del objeto, que no están estructuradas y que producen conflictos en las etapas del postproceso.

### Laser por tiempo de vuelo del pulso laser (Time of flight of a laser pulse)

El escáner de tiempo de vuelo mide el tiempo que tarda un impulso del laser en salir del sensor llegar al objeto y regresar, con ello calcula la distancia de cada punto del panorama.

Esto permite alinear virtualmente un panorama de una cámara digital, con la nube de puntos, mediante una co-alineación de los dos sensores, ya que la cámara esta integrada en el instrumento, podemos conocer la distancia e inclinación exacta con respecto al escáner, lo cual se muestra en la figura 2. Esta relación se puede formular por medio de la proyección de la matriz P. Con P a 3x4 que representa la relación entre el mundo 3D del punto (x) y la imagen 2D del punto (x) en coordenadas homogéneas.

“Compared to the six standard boresighting pose parameters, the added parameters (five in all) will account to intrinsic camera parameters. The projection matrix can be formulated as follows”<sup>2</sup>:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & s & x_0 \\ & f_y & y_0 \\ & & 1 \end{bmatrix}$$

$$x = \mathbf{KR}[\mathbf{I} \mid -\mathbf{t}]X = \mathbf{PX}$$

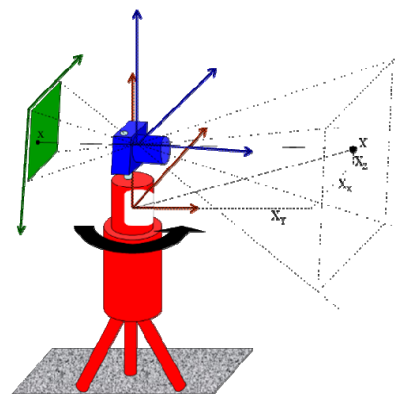


Figura 1.2: Referencia de la posición de la cámara y el escáner. fuente: BARNEA Shahar, Segmentation Of Terrestrial Laser Scanning Data By Integrating Range And Image Content

<sup>2</sup>BARNEA Shahar, Segmentation Of Terrestrial Laser Scanning Data By Integrating Range And Image Content, Transportation and Geo-Information, Civil and Environmental Engineering Faculty, Technion – Israel Institute of Technology, Haifa, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing 2008.

En donde  $f_x$  y  $f_y$  son las longitudes focales en las direcciones  $x,y$ , respectivamente,  $s$  es el valor para delimitar,  $x_0$  y  $y_0$  son las compensaciones con respecto a la imagen de dos ejes.  $R$  es la matriz de rotación entre el escáner y el marco de la cámara (el rojo y el azul de sistemas de coordenadas en la figura, respectivamente) y  $t$  es el vector de traslación<sup>3</sup>.

La proyección de la matriz define la imagen-escáner transformación y permitiendo vincular el color los puntos del láser 3D. Esta transformación se traduce en pérdida de información del color, por diferencias entre la resolución de la nube a la de la fotografía, pero se presenta como una gran ventaja el poder fusionar estas dos informaciones.

“El método de espejos giratorios se usa comúnmente porque estos son mucho más ligeros y así pueden ser girados mucho más rápido y con una precisión más grande. Escáneres típicos de láser de tiempo de vuelo 3D pueden medir la distancia en puntos de 10,000 ~ 100,000 cada segundo”<sup>4</sup>.

El RIEGL z420i: Este escáner es de clase 1, con un Campo Visual  $80^\circ \times 360^\circ$ , alcance 2 a 1000m (reflectividad del 80%) pero hasta 350m con un rango de reflectividad del 10%, una precisión 10mm, su ángulo máximo de resolución de  $0.004^\circ$ , la rapidez de escaneo es de más de 11000 medidas por segundo.

Se han realizado diversos estudios comparativos entre escáneres, destacando los de Wolfgang Boehler<sup>5</sup> y Thomas Kersten<sup>6</sup>, analizando el ruido, precisión, precisión angular, resolución, efecto de los bordes, la influencia de las superficies reflectantes, las condiciones ambientales, del RIEGL z420i, comparado con otros escáneres, determinando las ventajas y desventajas de cada uno. De los cuales se puede resaltar el estudio de precisión según la distancia del instrumento, ay que es la mayor ventaja de este tipo de escáner, la precisión a grandes distancias, para la cual han utilizado un target reflectante, siendo escaneado tres veces desde cada distancia (figura 3). Las diferencias distancias representativas hasta los 205 m son de  $\pm 5\text{mm}$  y hasta 430m disminuye significativamente, debido a la distancia y al tamaño del target.

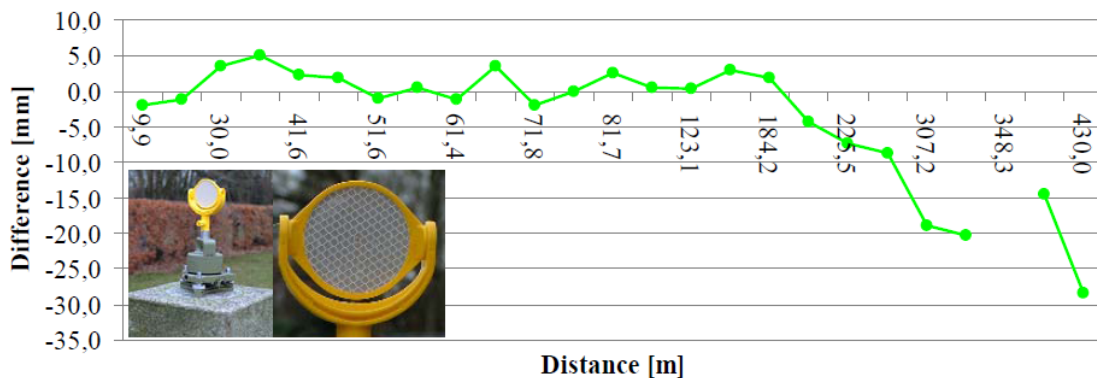


Figura 1.3: Comparación entre escaneos y distancias de referencia. Fuente: Thomas KERSTEN, Geometric Accuracy Investigations of the Latest Terrestrial Laser Scanning Systems, 2008.

<sup>3</sup> BARNEA Shahr , Registration Of Terrestrial Laser Scans Via Image Based Features, ISPRS Workshop on Laser Scanning and SilviLaser, Finland, 2007.

<sup>4</sup> [http://es.wikipedia.org/wiki/Esc%C3%A1ner\\_3D](http://es.wikipedia.org/wiki/Esc%C3%A1ner_3D)

<sup>5</sup> BOEHLER, Wolfgang, Investigating Laser Scanner Accuracy, i3mainz, Institute for Spatial Information and Surveying Technology, FH Mainz, University of Applied Sciences, Mainz, Germany

<sup>6</sup> KERSTEN, Thomas, Geometric Accuracy Investigations of the Latest Terrestrial Laser Scanning Systems, Integrating Generations FIG Working Week, Stockholm, Sweden, 2008.

## Escáner de triangulación

Esta técnica se llama triangulación porque el punto de láser, la cámara y el emisor del láser forman un triángulo.

El Concilio Nacional de Investigación de Canadá estaba entre los primeros institutos en desarrollar la tecnología basada de exanimación por triangulación en 1978<sup>7</sup>.

Se puede realizar esta triangulación porque se conoce la longitud de un lado del triángulo, la distancia entre la cámara y el emisor, al igual que el ángulo del rincón de emisor de láser y el ángulo del rincón de cámara se determina al mirar la ubicación del punto del laser en la cámara. Esta longitud y estos dos ángulos se concretan como tres informaciones que determinan completamente el tamaño y la forma del triángulo, dando la ubicación del rincón punteado del triángulo.

En la mayoría de casos este escáner se puede visualizar como una raya de laser, en vez de un punto de laser, que barre el objeto en la adquisición de datos.

El VIVID 910: Este escáner genera más que una nube de puntos, genera una malla poligonal al relacionar la información, eliminando automáticamente ambigüedades geométricas, mejorando el detalle que captura. El objeto es escaneado por un plano del escáner laser, este proyecta la luz desde el punto de vista del espejo que rota con la precisión de un galvanómetro, la luz es reflejada desde la superficie del objeto escaneado y cada línea es observada por un cuadro único capturado por un CCD de la cámara. El contorno de la superficie es derivado de la forma de la imagen de cada línea de escaneo. El área entera es capturada en 2,5 segundos (0,3 segundos en modo rápido) y la forma de la superficie se cubre de una red de más de 300,000 vértices (puntos conectados). Por otra parte al tener integrado el CCD puede tomar imágenes de color de 24-bits y no presenta errores por parallax its spon-on.

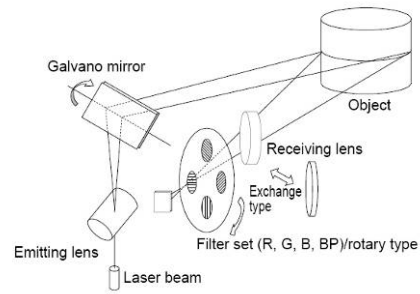


Figura 1.4: Funcionamiento del escáner de triangulación konica minolta 910. Fuente: Fuente: Catalog for 3D Mesurement, Konica Minolta, investement Ltd. China, 2002.

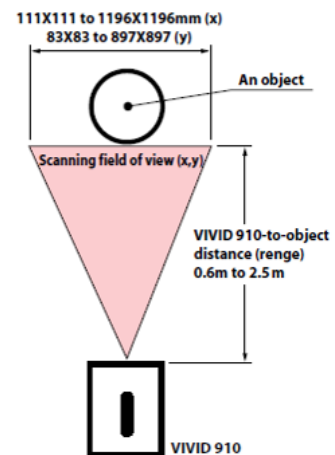


Figura 1.5: Rango del escáner, teoría de operación Konica minolta 910. Fuente: Catalog for 3D Mesurement, Konica Minolta, investement Ltd. China 2002.

<sup>7</sup> Catalog for 3D Mesurement, Konica Minolta, investement Ltd. China, 2002 <http://www.konicaminolta.com/sensingusa/download/catalog>

## 1.2 Definición de la investigación

### PROBLEMÁTICA:

La información resultante de la adquisición de datos de la realidad mediante la tecnología de Escáner Laser Terrestre no es de fácil acceso para Arquitectos y mucho menos para Urbanistas, por la complejidad de su manipulación, por la cantidad de datos que retrasa los tiempos de procesamiento y porque no está generada en formatos adecuados para su aprovechamiento en programas propios de la profesión. Por lo cual actualmente se trabaja sobre imágenes de dos dimensiones, que no aprovechan el carácter tridimensional de estas herramientas, las cuales permiten un mayor entendimiento, fruto de la espacialidad que simula esta tecnología.

Al profundizar en esta problemática encontramos que:

- Al manejar la información del escáner como un elemento único se limita la manipulación e interpretación de los componentes del espacio urbano, por lo cual surge la necesidad de segmentar y clasificar de forma semiautomática la información de la nube de puntos, llevándonos a organizar, parametrizar y postprocesar esta información en elementos identificables.
- El proceso de mallar la información del escáner ha adquirido mucha importancia a nivel industrial, arqueológico y arquitectónico, pero la cantidad de polígonos limitan el tamaño de los proyectos en programas de "ingeniería inversa", obligando a una mayor reducción en programas de uso tradicional en arquitectura y urbanismo, restringiendo la actuación a elementos particulares o a fachadas filtradas, en las que se pierde el detalle y la calidad del modelo.
- La forma en que se construyen los modelos como mallas libres desde las nubes de puntos genera irregularidades, que se evidencian en los tiempos de procesamiento, especialmente impidiendo o restringiendo los análisis por simulación.

### HIPÓTESIS

Por medio de la comparación de los principales procesos de reducción y reconstrucción de mallas, en relación a los niveles de detalle, los promedios de las superficies y la estructura de las mallas, se plantear una metodología para extraer el detalle de mallas de alta resolución poligonal a través de mapas de desplazamiento, reduciendo la pérdida de información, facilitando la gestión, manipulación e interpretación de modelos de tecnología de escáner laser.

## **OBJETIVO:**

Desarrollar una metodología que permita la manipulación de una gran cantidad de información proveniente de la tecnología de escáner láser terrestre mediante la integración de modelos simplificados y mapas.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

**Objetivo 1:** Enmarcar el estado actual de la tecnología de escáner laser terrestre y de procesos de mallado en diferentes disciplinas, enfatizando en la simplificación geométrica y los modelos 2.5.

**Objetivo 2:** Estudiar el detalle de la información del escáner laser RIEGL z420i y el VIVID 910 en el proceso de mallado, determinando la metodología que nos permite distinguir y extraer más información del detalle de la malla.

**Objetivo 3:** Identificar cual es el mejor proceso de reducción del detalle de la malla que permita diferenciar esta información al compararla con la malla inicial, estableciendo un punto de análisis para el proceso de reducción de las mallas.

**Objetivo 4:** Confrontar diferentes procesos de mallado y de simplificación, enfocado a la extracción de mapas de desplazamiento. Identificando procesos de reducción de la malla, y de reconstrucción de la malla.

**Objetivo 5:** Analizar el nivel de detalle y los limitantes de extracción de los mapas de desplazamiento y de normales, en los diferentes modelos propuestos.

**Objetivo 6:** Cuantificar la pérdida de información de los mapas de desplazamiento, al reincorporarle la información de desplazamiento al modelo simplificado comparándolo con la malla inicial, determinando el numero de subdivisiones del modelo necesarios para recuperar la información.

**Objetivo 7:** Estructurar el detalle extraído en los mapas, permitiendo su interpretación, buscando procesos de extracción y organización para los mapas complementarios, que resultan de la información del color e intensidad de las nubes de puntos.

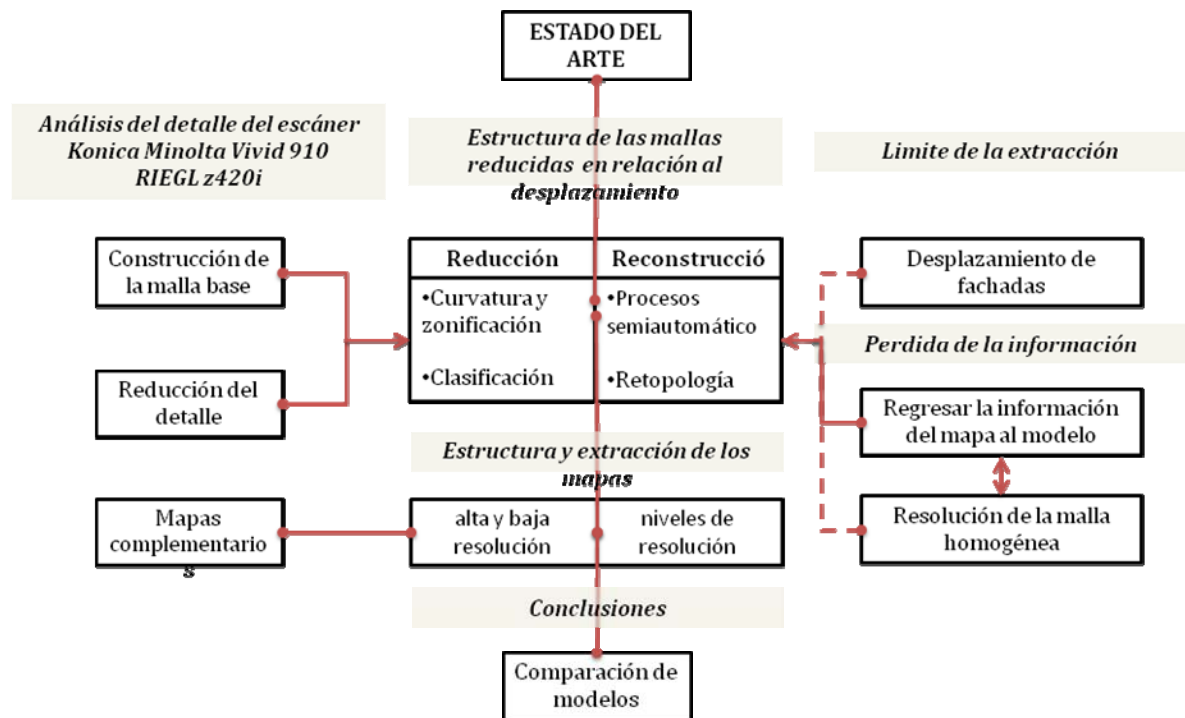
**Objetivo 8:** Evaluar la diferencia entre los modelos reducidos con mapas de desplazamiento y la información base, identificando sus ventajas y desventajas y el nivel de fiabilidad de la información en cada etapa del proceso.

## METODOLOGÍA:

La metodología se centra en la comparación de los cuatro procesos más importantes de reducción de mallas desde el punto de vista de la extracción del detalle mediante los mapas de desplazamiento, dividiéndolos en la reducción directa con la reducción por curvatura y por clasificación y mediante la reconstrucción de la malla con procesos semiautomáticos y por retopología. Estructurando tanto las mallas como los mapas de UV, buscando simplificar y hacer más legible la información de la tecnología de escáner laser para arquitectos y profesiones afines.

Antes de confrontar los modelos como punto base de comparación se identificaron los errores y límites de la información base disponible, tanto del escáner de tiempo de vuelo RIEGL z420i, como el de triangulación Konica Minolta VIVID 910, enfatizando en la pérdida de información comparada con la nube de puntos base. Paralelamente se redujo el detalle de la superficie de la malla utilizando operaciones que promedian los vértices, permitiendo identificar la porosidad, las grietas y el relieve de la superficie, mediante la diferencia de la malla base y las suavizadas, como referencia para los pasos posteriores de reducción de mallas y la extracción de los mapas de desplazamiento.

A modo de verificación se llegó al límite en la extracción de mapas de desplazamiento de modelos de fachadas complejas. Se identificó la pérdida de información al reagrupar la información de los mapas y los modelos de baja resolución comparándolos con el modelo base, verificando el número de divisiones necesarias del modelo de baja resolución poligonal para recuperar el detalle de la malla base.



## 2 Estado del Arte

Se analizaron las líneas de investigación que se relacionan con la simplificación de modelos de alta resolución poligonal y con los mapas de desplazamiento, comenzando con el trabajo de Jan Böhm, el cual amplió el estudio de los mapas de desplazamiento al realizarlos de fachadas de edificios, planteando la unión de escáner aéreo con el terrestre a través de modelos reducidos y como principal aportación la corrección de los errores de la malla en los mapas de desplazamiento de forma semiautomática. Complementario a ello se analiza la forma de trabajo con las herramientas de escáner aéreo Lidar, en cuanto a las aplicaciones de desplazamiento como lo son los DTM y DSM y por otra parte los aportes del “Relectance Field”, en la aplicación de mapas de normales como detalle extra de las mallas de alta resolución.

Se analizan los procesos de reducción tanto de la ingeniería inversa como del campo de la animación y modelado, siendo complementarios los procesos de retopología profundizados en estas dos disciplinas.

De forma complementaria se estudiaron los antecedentes que nos han permitido extraer los mapas de normales de los modelos, marcando la importancia que han generado desde el 2002 y como han influido en el campo de los videojuegos, permitiéndonos en la actualidad aplicaciones de tiempo real, que no solo hace un efecto de luz, sino que subdividen y desplazan las superficies en tiempo real.

Por ultimo se analizo un campo complementario de la arquitectura, la arqueología, que esta en relación directa con el nivel de detalle analizado en esta tesis, realizando un énfasis en la integración de tecnologías y en el análisis de los objetos de forma integral, como uno de los objetivos de investigación de la tecnología laser, la integración de diferentes instrumentos y la integración de diferentes disciplinas en el estudio de un elemento escaneado.

### 2.1 “Lasermap”

Se han desarrollado aproximaciones que combinan una geometría básica LOD2 con mapas de desplazamiento como si fuera un “ground-based LIDAR”<sup>8</sup>, en la que a una superficie simplificada se le agrega un mapa, que en lugar de color contiene como dato una longitud de desplazamiento, en dirección de la normal.

En los ejemplos mostrados en la figura 2.1, se muestra como se genero una fachada como modelo digital de superficie DSM, exportando la nube de puntos dentro de programas de sistemas de información geográfica SIG, para generar el mapa de desplazamiento, que fue insertado en una geometría simplificada con un mapa de desplazamiento, Renderizado como un mapa de normales mediante la aplicación de filtros<sup>9</sup>. En esta geometría de polígonos se aplican también imágenes de intensidad, las cuales fueron usadas para generar mapas de textura, realizando un proceso similar a un 2D sobre un 2D

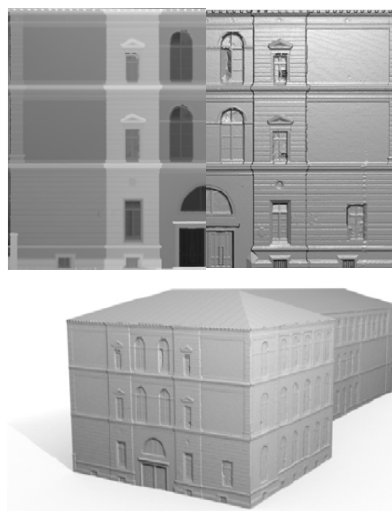


Figura 2.1: Aplicación de Lasermap en fachadas volumétricas. Fuente: Jan BÖHM, Facade Modeling For Historical Architecture 2007.

<sup>8</sup> BÖHM, Jan, Efficient Integration Of Aerial And Terrestrial Laser Data For Virtual City Modeling Using Lasermaps, University Of Stuttgart, Institute For Photogrammetry, Isprs Wg Iii/3, Iii/4, V/3 Workshop "Laser Scanning", Germany, 2005

<sup>9</sup> BÖHM, Jan, Facade Modeling For Historical Architecture, Institute for Photogrammetry, Universität Stuttgart, Germany, Publicado en XXI International CIPA Symposium, Athens, Greece, 2007



mapeado integrándose el LIDAR terrestre, derivando en un 2D que representa la nube de puntos, siendo un proceso que no fue aplicable para toda la nube de puntos, por lo cual se tuvo que dividir en grupos orientados a las fachadas, mediante una operación de simple buffering para los grupos de polígonos de cada fachada. Posteriormente este modelo fue evaluado (figura 2.2) para detallar la pérdida de información con respecto de la original y las posibles zonas con errores en el “Lasemap”, por densidad de la nube de puntos, realizando un proceso de corrección semiautomática de las ocultaciones en las imágenes 2.5, también se evaluó el procesamiento de la información en los procesos de evaluación.<sup>10</sup>.

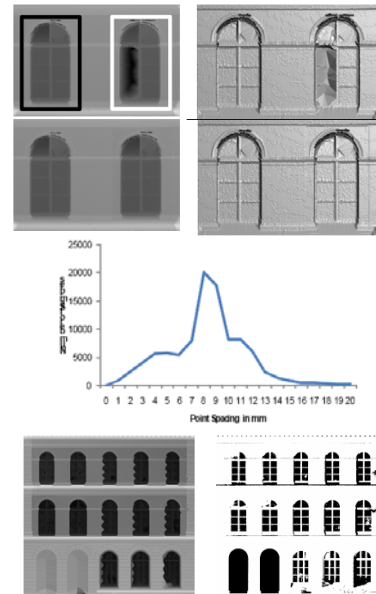


Figura 2.2: Evaluación de los mapas de desplazamiento. Fuente: Jan BÖHM, Facade Detail From Incomplete Range Data 2008

Este proyecto tiene sus limitantes, ya que sólo permite generar fachadas simples que no tengan complejidad volumétrica, sobretodo curvas, ya que el mapa de desplazamiento esta orientaron en una única dirección, por ello se tiene que integrar esta idea con las técnicas desarrolladas para el modelado de alta resolución, en programas 2.5, en los cuales se pueda generar mapas de Uv que orienten la dirección hacia la que se desplaza cada parte del modelo, mediante herramientas que permitan cargar una cantidad importante de polígonos, como lo hacen los programas que manejan unidades como el pixel, las cuales no manipulan el modelo 3D propiamente dicho, sino que utilizan el pixel con dato de profundidad llamado pixel, para manejar esta cantidad de polígonos como una imagen 2.5, la cual puede ser exportada como un modelo 3D o como un mapa de desplazamiento complejo.

## 2.2 Escáner Laser Aéreo Lidar

En la actualidad se desarrolla una creciente proliferación de modelos urbanos de baja densidad, en su mayoría con la información de escáner laser aéreos LIDAR, como las “digital globes”, plataformas populares de modelos LOD1 (level of detail 1), que se componen de bloques simples sin techo. Después han surgido los LOD2, los cuales tienen un techo detallado con un cuerpo de geometría simple pero con el color de la textura.

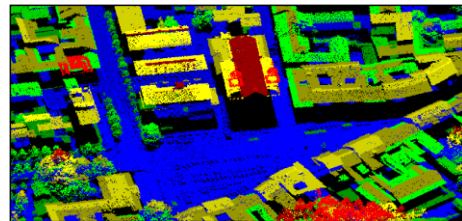


Figura 2.3: Clasificación de escáner laser aéreo. Fuente: Visintini, D, e-preimetro, international quarterly e-journal on sciences and technologies 2007

Esta geometría parte de la identificación de los bordes de los edificios, siendo esta detección ampliamente estudiada en las imágenes 2.5D<sup>11</sup>, al igual que la identificación de líneas de quiebre y de mallado en aplicaciones de información geográficas SIG.

<sup>10</sup> BÖHM, Jan, Terrestrial Laser Scanning - A Supplementary Approach for 3D Documentation and Animation, Photogrammetric Week, Wichmann Verlag, Heidelberg, 2005

BÖHM, Jan, Model Refinement By Integrated Processing Of Laser Scanning And Photogrammetry, Institute for Photogrammetry, Universitaet Stuttgart, Geschwister, 2005

<sup>11</sup> VOSSelman, George, 3d Building Model Reconstruction From Point Clouds And Ground Plans, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXXIV-3/W4 Annapolis, 2001

Estos modelos se basan en una información en altura proporcionada por los escáneres aéreos, que no identifican las operaciones formales ni los vacios de las fachadas, generando una información de muy baja resolución por metro cuadrado, creando modelos generales con un margen de error considerable en las volumetrías a escala arquitectónica, pero aceptable a escala urbana. De allí de la importancia de unir la información detallada del TLS con la visión general del escáner aéreo, siendo punto de partida para diversas investigaciones<sup>12</sup>, que plantean la integración y la georreferenciación de estas tecnologías, al igual que la unión en términos de mallado<sup>13</sup>.

Esta continua necesidad de generar modelos de diversas resoluciones y para diferentes aplicaciones plantea problemas y retos, que se desarrollan a pasos agigantados, buscando tanto la precisión, la visualización y sobretodo la automatización, mostrando aplicaciones cada vez más acordes a la realidad, pero siempre como una simplificación de esta, ya que no se ha logrado solucionar del todo partes del proceso de tratamiento de la información de la TLS, sobretodo en cuanto al modelado, siendo la fotografía una ayuda para corregir la visualización de los proyectos.

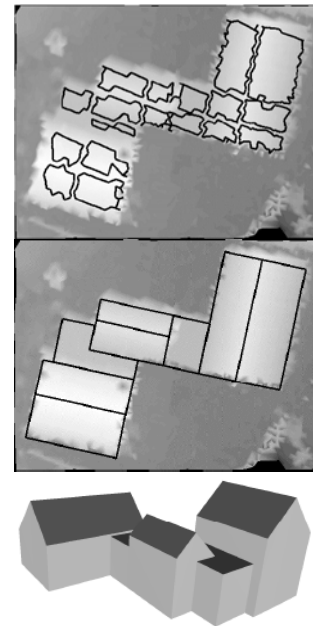


Figura 2.4: Reconocimiento de planos de techo, George Vosselman, 3d Building Model Reconstruction From Point Clouds And Ground Plans, 2001

Por otra parte la clasificación de nubes de puntos se ha desarrollado extensamente en las aplicaciones de laser escáner aéreo, los cuales son usados para generar modelos digitales de terreno DTM. Para obtener sólo los puntos que conforman el terreno hay que pasar filtros a esta información, por medio de la aplicación de algoritmos, pasando de un modelo digital de superficie DSM al DTM quitando el llamado "normalized digital surface model" nDSM, el cual es usado para la detección de los edificios y otros elementos. Esta clasificación de objetos provenientes del nDSM es compleja, permitiendo la identificación de objetos pequeños (por un rango de altura), vegetación (por la rugosidad de la superficie) y los edificios.

Esta representación de elementos arquitectónicos en superficies de mallas proveniente de la información del TLS es normalmente inadecuada, ya que las esquinas son suavizadas por las superficies triangulares, sobre todo cuando estos bordes están cerca unos de otros, se filtran las nubes reduciendo el nivel de detalle en zonas que necesitan mayor densidad de puntos y se generan mallas libres que no tienen en cuenta la geometría del objeto, que no están estructuradas y que producen conflictos en las etapas del postproceso. Un ejemplo de ello es la figura 3, la cual fue realizada con un escáner 2D, generando una gran cantidad de vacios por ocultaciones, sobretodo de arboles y carros, ello dio la necesidad de establecer un método para auto completar estos vacios de forma automática, quedando mallas estiradas, con ruido, perdiendo la precisión.

<sup>12</sup> HANSEN, Wolfgang, Line-Based Registration Of Terrestrial And Airborne Lidar Data, FGAN-FOM Research Institute of Optronics and Pattern Recognition Gutleuthausstr. 1, 76275 Ettlingen, Germany, 2008.

<sup>13</sup> AGUGIARO, G, Definition Of A Transition Surface With The Purpose Of Integration Between A Laser Scanner 3d Model And A Low Resolution DTM, Università Di Padova, Laboratorio de Rilevamento e Geomatica, Padova, Italia, 2009.

### 2.3 “Reflectance Field”

Es una técnica que utiliza diferentes focos de iluminación sobre un modelo desde todos los ángulos posibles, para analizar las diferentes clases de iluminación y como afectan al objeto, con una rapidez de 320 focos en 5 minutos, permitiendo recrear sobre un objeto todo tipo de iluminación, en un entorno virtual en tiempo real. De igual forma esta tecnología permite su fusión con un escáner, ya que en el mismo proceso de “reflectance field” proyecta unas líneas de luz que iluminan el objeto mediante franjas paralelas y se graba en video al igual que el “reflective field”.

Con esta técnica se llega a altos niveles de precisión, de porosidad en las superficies de los materiales, “For scattering materials, we show that the specular normal maps yield the best record of detailed surface shape while the diffuse normals deviate from the true surface normal due to subsurface scattering, and that this effect is dependent on wavelength.”<sup>14</sup> Al igual que se logra analizar el efecto de la iluminación en los objetos escaneados, aunque estos estén en movimiento<sup>15</sup>.

Con este proceso se ha permitido ampliar el conocimiento sobre la iluminación y entornos virtuales, llegando a una nueva etapa de hiperrealismo, ya que la realidad puede ser simulada bajo cualquier ambiente digital, también ha estudiado la reflectancia complementada con el escáner métrico, permitiendo generar mapas de vectores de normales, que aumentan el detalle del escáner a una resolución de micras, llegando a obtener hasta la porosidad de los objetos escaneados, como lo puede ser la porosidad de la piel a una velocidad que reduce los problemas de que el objeto escaneado se mueva.

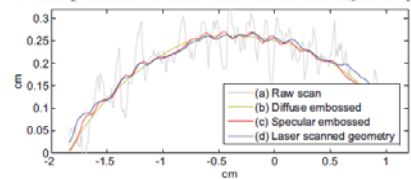
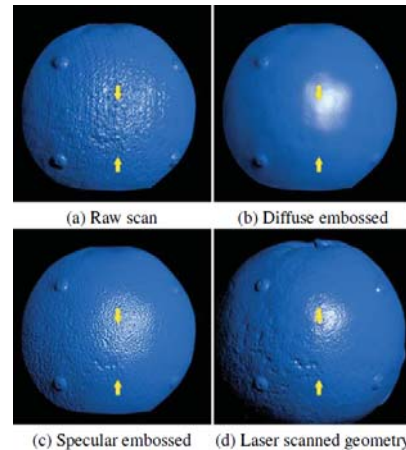


Figura 2.5: Análisis de iluminación y porosidad entre “reflectance field” y laser escáner. Fuente: Wan-Chun Ma, Rapid Acquisition of Specular and Diffuse Normal Maps from Polarized Spherical Gradient Illumination, 2007



Figura 2.6: Análisis de la iluminación sobre una superficie porosa. (a) Diffuse normals (b) Specular normals (c) Hybrid normals (d) Real photograph, An orange rendered from acquired measurements Fuente: Wan-Chun Ma, Rapid Acquisition of Specular and Diffuse Normal Maps from Polarized Spherical Gradient Illumination. 2007

<sup>14</sup> MA, Wan-Chun, Rapid Acquisition of Specular and Diffuse Normal Maps from Polarized Spherical Gradient Illumination, Eurographics Symposium on Rendering, 2007.

<sup>15</sup> DEBEVEC, Paul, Acquiring the Reflectance Field of a Human Face, Conference Proceedings, To appear in the SIGGRAPH, 2000

## 2.4 Ingeniería Inversa

### 2.4.1 Herramientas usadas para administrar modelos de múltiple resolución:

Se busca que la simplificación del modelo LOD sea una reducción de la complejidad del modelo con un mínimo impacto en la cualidad visual, usando las siguientes técnicas:

- Visibility Culling: Se evita cargar información de partes del modelo que el usuario no puede ver<sup>16</sup>
- Image-base representation: Se representa la geometría con imágenes<sup>17</sup>
- Database management: Solo los datos necesarios se cargan en la memoria, aunque el modelo entero no quepa en ella<sup>18</sup>.

La visualización de modelos poligonales de alta resolución ha sido una preocupación constante, dada la necesidad técnica de no perder el detalle de los modelos escaneados, lo cual podemos ver en proyectos ampliamente estudiados como el Bonsai, el David o st. Matthew, los cuales han sido probados con diversas metodologías para no perder el detalle, una de ellas es los modelos de múltiple resolución, basados en la posición del observador, llamando más o menos polígonos agrupados en patches, según la distancia del modelo, dependiendo de la vista del render, logrando un procesamiento y rendimiento adecuado, pero limitando el modelo solo a la visualización, siendo un proceso de construcción de malla lento y que con el avance de nuevas tecnologías se convierten en modelos de utilidad únicamente de documentación.

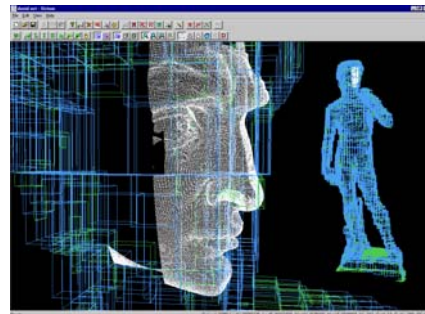


Figura 2.7: Modelos multi resolución David. Fuente: ARNOLD, D., VCLab's Tools for 3D range data processing, 4th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage VAST, 2003

### 2.4.2 Operaciones básicas usadas en el proceso de reducción de la superficie a través de los vértices son<sup>19</sup>:

- A. Agrupamiento de vértices (Vertex cluster)
- Se unen un grupo de vértices basados en la proximidad de la geometría.
  - Algunos triángulos que desaparecen se convierten en líneas o puntos
  - Tiene un mayor impacto en la topología, modificando la malla, causando irregularidades.
- B. Eliminación de vértices (Vertex remove)

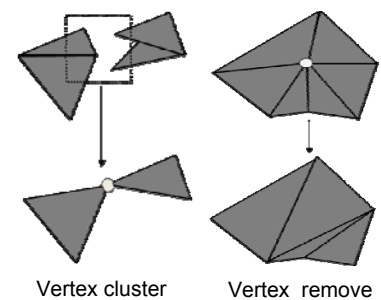


Figura 2.8: Operaciones de reducción de superficie. Fuente: GARLAND, M., Multiresolution modeling, 1999

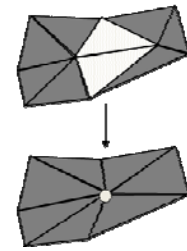
<sup>16</sup>CIGNONI, Paolo, Adaptive TetraPuzzles: Efficient Out-of-Core Construction and Visualization of Gigantic Multiresolution Polygonal Models, 2005

<sup>17</sup>XIANFENG, Wu, A New 3-D Mesh Simplification Algorithm, A New 3-D Mesh Simplification Algorithm, 2003.

<sup>18</sup> CIGNONI, Paolo, External Memory Management and Simplification of Huge Meshes, 2004.

<sup>19</sup> GARLAND, M., Multiresolution modeling: Survey and Future Opportunities, Eurographics'99, State-Of-The-ART Report, 1999. <http://graphics.cs.uiuc.edu/~garland/papers/STAR99.pdf>

- Remueve los vértices y caras adyacentes
- Re-triangula para rellenar huecos, quitando dos triángulos o con un numero exponencial de re-triangulaciones.
- Requiere un “manifold surface” sobre el vértice
- Preserva la estructura local de la topología, generalmente alterar visualmente la superficie



Edge collapse

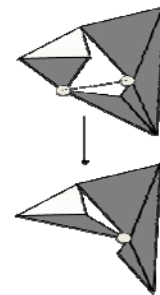
#### C. Colapso de la arista (Edge collapse)

- Une dos vértices en uno, eliminando así el borde. Se relocaliza el atributo del nuevo vértice al igual que su posición.
- Borra triángulos degenerados, reduciendo a dos los “manifold edges”
- La eliminación puede ser animada facilitando la transición, moviendo el vértice a la nueva ubicación y luego borrándolo.

#### D. Colapso parcial de la arista “Half-Edge collapse”<sup>20</sup>

- Colapsa el borde a uno de sus vértices finales
- Los conjuntos de vértices pertenecen como un subconjunto del original, las propiedades de remover vértices en el suavizado es posible.

Half-Edge Collapse



Vertex pair

#### E. “Vertex pair”:

- Une dos vértices cualquiera
  - Basándose en la geometría, la topología, los atributos, etc.
- Mayor flexibilidad que colapsar bordes
  - Puede modificar la topología rápidamente
- Mayor control local sobre el clúster de los vértices
  - Escoge los vértices basándose en mas que la proximidad

Figura 2.9: Operaciones de reducción de la superficie.  
Fuente: GARLAND, M.,  
Multiresolution modeling, 1999

### 2.4.3 Para seleccionar la operación hay que tener en cuenta:

- Que la nueva topología mejore la apariencia del modelo.
- Al soportar non-manifolds aumenta el dominio y la eficiencia
- El tipo de operación debe soportar las transiciones de suavizado.
- La operación “Vertex remove” afecta una menor porción de la malla comparado con “edge collapse”
- Un conjunto de “vertex remove” es equivalente a un conjunto “edge collapse”

#### Comparación entre “Vertex Remove vs. Edge Collapse”

- Entre vecinos: Sobre un vértice vs. Sobre dos vértices

<sup>20</sup> CHEOL Myeong Ko, Feature-preserving Simplification of Polygonal Surface based on Half-edge Contraction Manner, Multimedia/Graphics Lab. Dept. of Computer Science, Yonsei Univ., Seodaemun-Gu, Seoul 120-749, Korea. <ftp://ftp.risc.uni-linz.ac.at/pub/private/ADG02/ko-paper.pdf>.

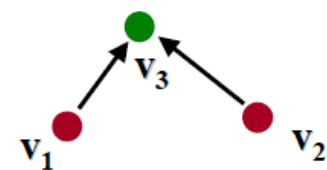
- Nuevos vértices: Ninguno vs. Uno en posición libre
- Nueva "tessellation": Varios posibles vs. Uno en posición libre.
- Transición en el suavizado: Difícil vs. natural

Simplificación de algoritmos:

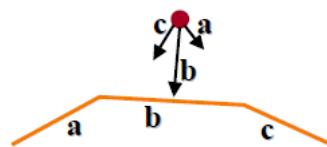
- Posicionar las posibles operaciones de acuerdo a el error que introducen
  - Debe ser capaz de medir el error
  - El error métrico hace toda la diferencia
- Repetitivamente:
  - Realizar la operación que introduzca el mínimo error
  - Re-evaluar el error de los vecinos de una operación

#### 2.4.4 Para calcular el error métrico hay los siguientes procesos:

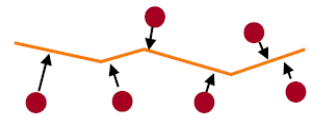
- Siempre se incluye un componente geométrico:
  - Distancia vértice - vértice
  - Distancia vértice - plano
  - Distancia punto-superficie
  - Distancia superficie- superficie
- Puede incluir atributos métricos
  - Necesidad de preservar el color del pixel
  - Componentes de la normal de los vectores, coordenadas de texturas, etc.



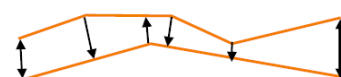
Vértice - vértice



vértice - plano



Punto - superficie



Superficie- superficie

- A. Distancia vértice - vértice
- Almacena un grupo de planos con cada vértice
    - Error basado en la distancia de cada vértice desde el vértice al plano
    - Une un grupo de planos cuando los vértices se unen
    - Trata de mantener los vértices cerca de la superficie original
    - Almacena planos usando la máxima distancia
  - "Error Quadratics" (*mirar* Garland en el punto 2.4.5)
    - Forma cuadrática en vez de planos, usa la suma del cuadrado de las distancias

#### B. Distancia punto - superficie

- Mide la distancia de un grupo de puntos a la superficie suavizada
  - Un grupo de puntos representativos de la superficie original
  - Usa la suma del cuadrado de las distancias
- Aproximación a la superficie- distancia a la superficie
- Coste para el ordenador

#### C. Distancia superficie - superficie

- Límite de la máxima distancia entre la base y la superficie simplificada
  - Volúmenes de tolerancia
  - Simplification Envelopes
  - Hausdorff Distance

Figura 2.10: Error métrico.  
Fuente: Thomas Funkhouser ,  
Polygonal Meshes, Princeton  
University, 2002.

- Mapping Distance
- La mejor medida Posible

#### Notas de errores métricos

- Una buena comprobación métrica permite transformar el error de objetos en el espacio al espacio de la pantalla.
  - Decisión de simplificación de cual modelo ejecutar
- Note que hay diferentes tipos de métrica
  - Considera el borde:
  - $E=0$  en el vértice y borde
  - $E \neq 0$  en cualquier lugar
- El tiempo del proceso se tiene que tener en cuenta

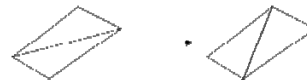


Figura 2.11: Observaciones de errores geométricos. Fuente: Thomas Funkhouser, Polygonal Meshes, Princeton University, 2002.

### 2.4.5 CRITERIOS DE SIMPLIFICACIÓN USADOS SEGÚN DIVERSOS AUTORES<sup>21</sup>:

“The goal of the decimation algorithm is to reduce the total number of triangles in a triangle mesh, preserving the original topology and a good approximation to the original geometry.”<sup>22</sup>

#### A. CRITERIOS DE DECIMAR UNA MALLA DE TRIANGULOS SEGÚN SCHROEDER<sup>23</sup>:

A cada vértice se le asigna uno de los siguientes criterios:

- Simple: complejo, limite, borde interior y esquina,
- Vértice complejo: (non-manifold) el cual no se borra.
- Si un vértice no esta dentro de una distancia especifica a un plano promedio (que rodea  $\Delta s$ ), debe ser borrado.
- El limite y el borde de los vértices utilizan el criterio de distancia al borde
- En relación con las pequeñas  $\Delta s$  con grandes ángulos, que contribuyen poco a las propiedades de la superficie son borradas.

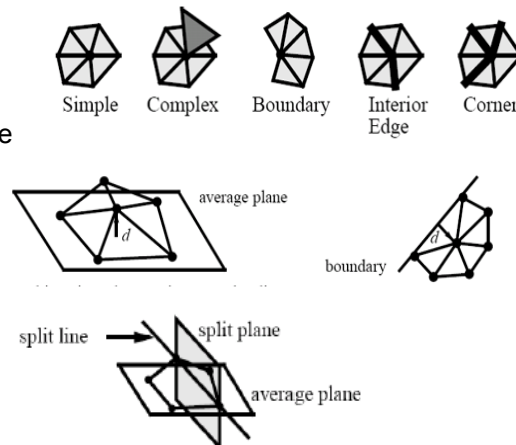


Figura 2.12: Criterios de decimar arriba y plano de rendimiento máximo abajo. Fuente: SCHROEDER, William, Decimation of Triangle Meshes, General Electric Company Schenectady, Nueva York, 2003.

#### Triangulación:

En la triangulación se dividen y definen la esquina hasta que solo quede 3 vertices. Calculando La mejor división del plano por rendimiento máximo.

El “aspect ratio” es la mínima, la distancia del bucle del vértice a la división del plano, definida por el largo de esta división (limitados a  $> 0.1$ )

<sup>21</sup> CHENG, Irene, 3D Model Simplification & Efficient Transmission, DEpartament os computing Scince, University of Alberta

<sup>22</sup> SCHROEDER, William, Decimation of Triangle Meshes, General Electric Company Schenectady, Neva York, 2003.

<sup>23</sup> Ibid

Ejemplo del "Aspect Ratio":

$d_i$  es la mínima distancia de  $V_i$  desde el plano dividido.

— split line

Paso 1: Computar  $caso1 = \min\{d1, d3\}$  y  $caso2 = \min\{d2, d4\}$

Paso 2: Seleccionar  $\max\{caso1, caso2\}$

Se asume que la Split line tiene un longitud desde  $d2 > d1$ , Split line2 producirá un mejor aspect ratio.

El fin es generar un mayor balance de los triángulos, en vez de astillar triángulos.

De este proceso se puede destacar:

- Uso de operaciones locales sobre la geometría para reducir el número de polígonos
- Se preserva la topología original
- Se realizan "multiple passes" sobre los vértices
- El vértice y la asociación de triángulos son borrados si el criterio específico de decimación coincide.
- El hueco resultante se tapa por una triangulación local
- El proceso termina cuando el número de triángulos es reducido.

## B. OPTIMIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA SEGÚN HIKER<sup>24</sup>:

- Unir coplanares y coplanares cercanos
- Comenzando por la representación de la normal, añadiendo triángulos adyacentes si la normal interior es con la  $\epsilon$  especificada.
- Reemplazar la normal representada con la normal promedio
- Preservar huecos

### Triangulación:

Atravesar el triángulo o-1-2

- Desde el segmento 0-2, si este no se intercepta con ningún otro segmento, borra el vértice 1
- Se repite el paso anterior para el triángulo 2-3-4.
- Si la intercepción ocurre, el vértice de inicio se ve incrementado por una 3-4-5
- Puede producir una proporcionalidad pobre entre los triángulos, pero es fácil y rápido de aplicar.

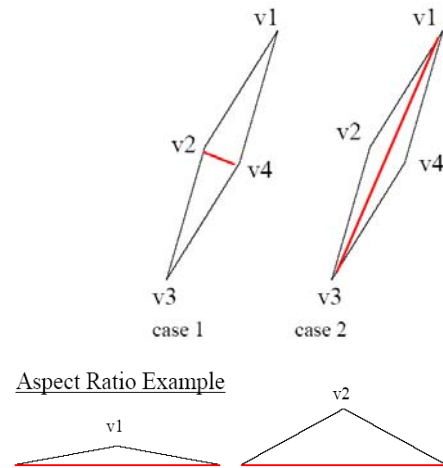


Figura 2.12: Ejemplos de aspect ratio. Schroeder. Fuente: SCHROEDER, William, Decimation of Triangle Meshes, General Electric Company Schenectady, Nueva

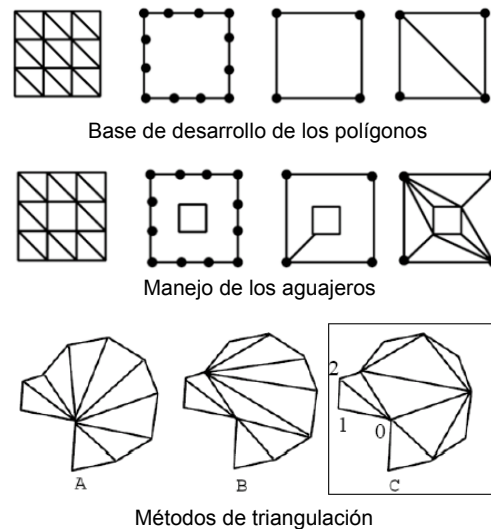


Figura 2.13: Optimización geométrica. Fuente: HINKER, Paul, Geometric Optimization, 1993.

<sup>24</sup> HINKER, Paul, Geometric Optimization, Advanced Computing Laboratory, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, 1993. <http://www.ccs.lanl.gov/ccs1/projects/Viz/pdfs/93-vis.pdf>



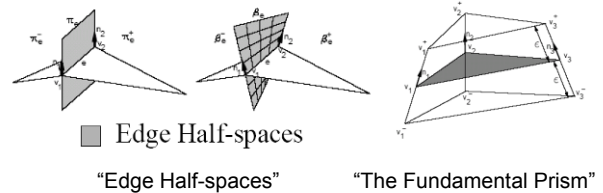
### C. SIMPLIFICACIÓN DE ENVOLVENTES SEGÚN COHEN<sup>25</sup>

Es un método automático que se basa en niveles de detalle de jerarquías, el usuario especifica la tolerancia de error, la máxima desviación del modelo simplificado con respecto al modelo original y el nuevo modelo. Este método se basa en la generación de dos envolventes sobre la malla original. En donde la distancia entre la superficie envolvente y la original es siempre menor que la tolerancia especificada por el usuario.

El modelo resultante es generado por modificaciones sucesivas del modelo original, teniendo en cuenta el estar dentro de estas dos superficies envolventes.

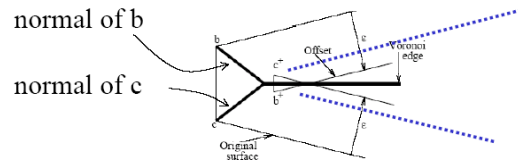
Genera la jerarquía del LOD

- Garantiza que la aproximación con  $\epsilon$  (+/-) la distancia del modelo original.
- Previene la auto-intersección
- Preserva las características de la forma.
- Permite la variación del modelo a una distancia proporcional en a través de diferentes partes del modelo.



Computo de la envolvente

$\text{Coord}(v_i^+) = \text{Coord}(v_i) + \epsilon \mathbf{n}(v_i)$  and  $\mathbf{n}(v_i^+) = \mathbf{n}(v_i)$   
 $\epsilon$  puede ser igualmente definido en dirección opuesta.



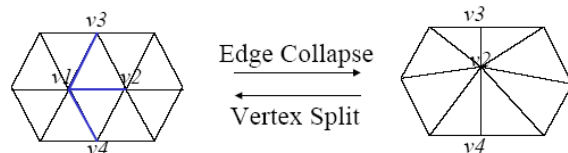
Evitar auto intercepción

Figura 2.14: Simplificación automática. Fuente: COHEN, Jonathan, Simplification Envelopes, 1996

- Evitar la auto-intercepción
- Creación del hueco y rellenado del mismo.

### D. "PROGRESSIVE MESHES PM" SEGÚN HOPPE<sup>26</sup>

- Menor pérdida de información
- Se aplica el colapso del borde (simplificación) y partición del vértice (refinamiento).



Mínima pérdida de energía:

- Estima el coste de energía para cada borde triangulado en la transformación por colapso y la guarda por orden de prioridad.
- En cada intersección realiza la transformación con los mínimos triángulos.
- Re computa las prioridades de los bordes con los vecinos de la transformación.

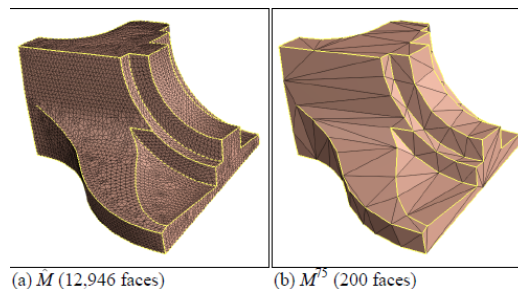


Figura 2.15: Reducción progresiva de la malla según Hoppe. Fuente: Hugues Hoppe, Progressive Meshes, Microsoft Research

<sup>25</sup> COHEN, Jonathan, Simplification Envelopes, Proceedings ACM SIGGRAPH, New Orleans, 1996, [http://www.cs.umd.edu/projects/gvill/papers/simp\\_env.pdf](http://www.cs.umd.edu/projects/gvill/papers/simp_env.pdf) Source code: <http://www.cs.unc.edu/~geom/envelope.html>

<sup>26</sup> Hugues Hoppe, Progressive Meshes, ACM SIGGRAPH 1996 Conference Proceedings, 99-108. Microsoft Research, 1996. <http://research.microsoft.com/en-us/um/people/hoppe/>

### E. Quadric Error Metric (QEM) según GARLAND<sup>27</sup>

Presenta un algoritmo de simplificación “based on iterative vertex pair contraction. This technique provides an effective compromise between the fastest algorithms, which often produce poor quality results, and the highest-quality algorithms, which are generally very slow”<sup>28</sup>

Utiliza contracciones interactivas para los vértices pares.

- Conserva las aproximaciones de los errores de la superficie usando matrices cuadráticas.
- Tiene la capacidad de unir regiones desconectadas de los modelos.
- Selecciona el conjunto de pares validos, basado en el supuesto de que en una buena aproximación, los puntos no se mueven lejos de las posiciones originales.

Coste / error de la contracción vértice  $(v_1, v_2) \rightarrow v$

- Se asocia el coste con cada vértice.
- Se calcula al inicio el coste acumulado de los planos para los triángulos que se encuentren en el vértice. Se tiene en cuenta que la primera aproximación de error para cada vértice es 0, porque el vértice cae en el plano de todas las incidencias de los triángulos.
- Define el error de los vértices w.r.t el conjunto de planos como la suma de distancias cuadradas a los planos.
- Selecciona  $v_1, v_2$  o  $(v_1+v_2)/2$  como posición de  $v$ , dependiendo en cual produce el menor numero de vértices.
- $Q_v = Q_1 + Q_2$ .

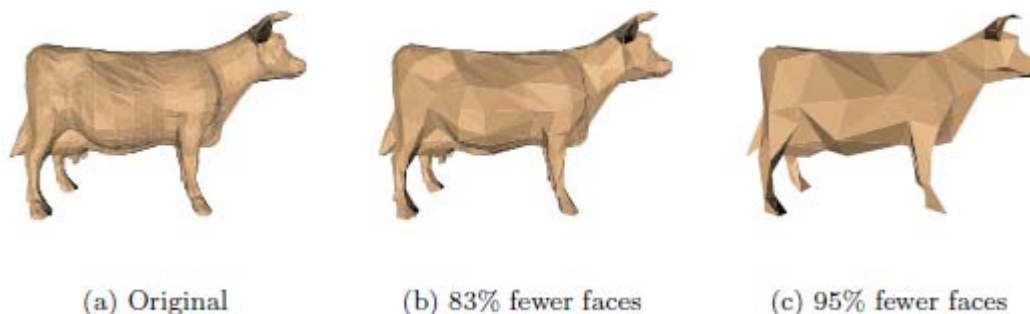


Figura 2.16: Reducción automática de los polígonos. Fuente: Michael, Garland, Quadric-Based Polygonal Surface Simplification, School of Computer Science Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 1999

<sup>27</sup> HECKBERT P. y GARLAND M., Survey of Polygonal Surface Simplification Algorithms, Course Notes SIGGRAPH1997. <http://graphics.cs.uiuc.edu/~garland/papers/simp.pdf>

<sup>28</sup> GARLAND, Michael, Quadric-Based Polygonal Surface Simplification, Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. School of Computer Science Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 1999

## F. Vertex clustering según LOW <sup>29</sup>

Determina la proximidad de los vértices.

- Los vértices se agrupan según su proximidad
- Un nuevo vértice se crea para remplazarlos
- 

El vector de desplazamiento se muestra para la iso-curve de la superficie de la spline a una iso-curve P de la "spring mesh". Este mapa recrea la "spring mesh" con una reconstrucción bilinear (figura 2.17).

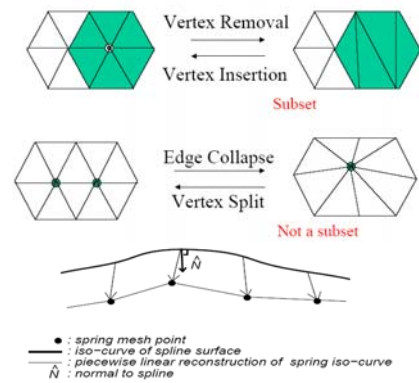


Figura 2.17: Vertex Clustering, Fuente: Venkat Krishnamurthy, Fitting Smooth Surfaces to Dense Polygon Meshes

## 2.5 Modelado y animación:

En el mundo de la animación se ha trabajado con superficies suavizadas para la representación de los modelos y llegando a dos conclusiones muy importantes en cuanto a su detalle<sup>30</sup>:

- Una superficie regular (nurbs) no es la mejor aproximación para representar las superficies, por ejemplo una splines es insuficiente para representar un detalle fino de una geometría.
- El detalle geométrico es importante solo en el momento del renderizado, y no durante el proceso de animación.

Por ello se separo la geometría del detalle fino, desarrollando los primeros intentos de generar este detalle con mapas de desplazamiento. Siendo las principales ventajas que el mapa es solo una imagen y como tal puede ser retocada, comprimida y manipulada usando procesos de herramientas de imágenes.

Desarrollando en el 2002 la primera metodología que integra el laser escáner con mapas de desplazamiento, el siguiente es el flujo de trabajo planteado:

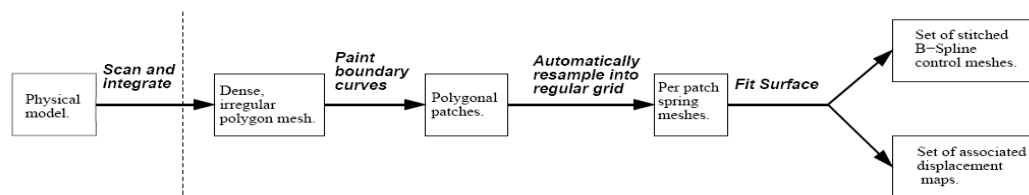


Figura 2.18: Metodología construcción mapa de desplazamiento. Fuente: WANG, Yigang, Fast Normal Map Generation for Simplified Meshes, Computer School, Hangzhou Institute of Electronics Engineering, China, 2002.

<sup>29</sup> LOW, Kok-Lim, Model simplification using vertex-clustering, Symposium on Interactive 3D Graphics Proceedings, symposium on Interactive 3D graphics, Providence, Rhode Island, United States, 1997. <http://www.comp.nus.edu.sg/~tants/Paper/simplify.pdf>

<sup>30</sup> KRISHNAMURTHY, Venkat, Fitting Smooth Surfaces to Dense Polygon Meshes, Computer Science Department, Stanford University

En este ejemplo se utilizó como input una malla irregular, proveniente de 75 escaneos con un escáner Cyberware laser range, llegando a obtener 350.000 polígonos.

Como primer paso se definió los bordes (figura 2.19). Posteriormente con los spline patches (los patches son las regiones poligonales) seleccionando los bordes de la superficie del modelo, obteniendo los pasos para definir los bordes de las regiones. Con ello se logra generar una nueva superficie regular que se proyecta sobre los patches predefinidos, llamado este proceso de regularización de la malla "spring mesh". Con ello se logra parametrizar de cierta forma la superficie llegando a generar superficies B-spline.

En este proceso se utilizaron tres premisas para determinar la las especificaciones de la malla:

1. Arc length uniformity: El espaciado a lo largo de la malla en particular de la iso-curve debe ser uniforme (refiriéndose a la línea de la malla que sigue una misma dirección).
2. Aspect ratio uniformity: El espaciado de la malla a lo largo de la iso-curve debe ser el mismo que el espaciado de la malla a lo largo de "v" iso curve ("v" y "u" se refieren a las direcciones que no siguen la trayectoria de la iso-curve).
3. Parametric fairness: Todas las "u" y "v" iso-curve deben tener el ancho mínimo considerando los criterios anteriores.

Esta técnica de manejar las mallas con B-spline presenta desventajas en este tipo de aproximación, ya que con la mínima presencia de huecos en la malla poligonal se rompe la conectividad de la nueva malla generada, por otra parte este tipo de malla tiene un mal comportamiento con superficies muy complejas con animación, ya que presenta una excesiva distorsión en su parametrización<sup>31</sup>.

## TÉRMINOS USADOS EN MODELADO Y ANIMACIÓN:

### Heightmap:

Llamado también "heightfield" y en sistemas de información geográfica llamado "digital elevation models". Es una imagen raster que se usa para guardar valores, como los datos de elevación. Este se puede usar en bump mapping para calcular en el modelo la sombra en el material, en mapas de desplazamiento para desplazar la posición de la geometría actual en puntos sobre la textura de la superficie, o en una superficie donde el heightmap la convierte en una malla con relieve.

El heightmap contiene un canal que se interpreta como la distancia de desplazamiento o altura visualizada en escala de grises, en donde el negro representa la mínima altura y el blanco la máxima y en el momento de renderizado el usuario puede especificar la cantidad de desplazamiento para cada unidad del canal de altura, correspondiendo con el contraste de la

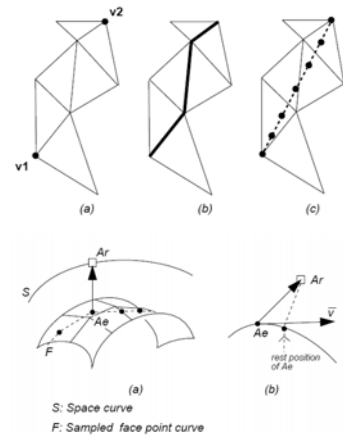


Figura 2.19. Selección de bordes: seleccionando puntos sucesivos en vistas 2D se traza la trayectoria más cercana entre puntos de los bordes de una malla. Fuente: Venkat Krishnamurthy, Fitting Smooth Surfaces to Dense Polygon Meshes

<sup>31</sup> WANG, Yigang, Fast Normal Map Generation for Simplified Meshes, Computer School, Hangzhou Institute of Electronics Engineering, China, 2002.

imagen, el Heightmaps puede guardar la información en sí mismo en un formato de escala de grises o también en metadatos especializados,

### Bump mapping:

Llamado también “fake” bump mapping, es una técnica que logra que logra un mayor realismo en un modelo 3D, mediante la interacción de el bump, la textura y la luces del ambiente, dando a un modelo de baja resolución la apariencia de tener un mayor número de polígonos, aplicándole un mapa de de dos dimensiones en la superficie, cambiando el brillo de cada pixel de la superficie, respondiendo al mapa de alturas determinado en cada superficie, por ello se obtiene un mayor detalle de la superficie, mientras que la geometría sigue siendo la misma. Después de que el cálculo de la geometría de la superficie determina si el objeto es visible y se debe mostrar la trigonometría es usada para calcular la geometría de la normal de la superficie del modelo, definida como el vector de cada pixel que determina la posición en el modelo.

Esta técnica fue presentada por James F. Blinn en 1978, la cual funcionaba igual que el Phong que estimaba el brillo de cada pixel, diferenciándose en que la textura de Phong calcula la reflexión de la luz para dar una superficie de iluminación especular y el Bump mapping cambia la forma de la superficie. En ausencia del bump mapping la geometría de la superficie de la normal define la interacción del modelo con la luz que proviene de una dirección preestablecida usando sombras de Phong o un algoritmo de una luz similar.

La diferencia ente el mapa de desplazamiento (llamado también 'true' bump mapping) y el 2D bump mapping (llamado “fake” bump mapping) es que el “fake” bump mapping perturba solo la normal y no la geometría a diferencia que el mapa de desplazamiento, manteniendo la silueta del modelo con su actual geometría y en el mapa de desplazamiento es aplicado en la geometría. El “fake” bump mapping es muy eficiente en el procesamiento del ordenador y consume menos memoria grafica, mientras que el desplazamiento generalmente es reservado para un “no-real-time ray traced images” (es un proceso de renderizado).

### Displacement Mapping

Un Displacement Bump es una imagen que contiene información de relieve, de manera que las zonas claras se representan como puntos más elevados y las zonas más oscuras como los puntos hundidos

Fue Introducido este término por Robert L. Cook en 1984.

“Idealmente, un Bump o un desplazamiento debería ser una imagen DEM (Digital Elevation Model). Se trata de un sistema empleado en topografía para representar el relieve de terrenos a partir de una escala de grises. Como las variaciones de altitud en la superficie de la Tierra son muy grandes —oscilando entre la cota cero a nivel del mar y los 8.848 metros del Everest— se utilizan imágenes de 16 bits en vez de las de 8 bits que estamos acostumbrados a emplear. De ese modo, en lugar de contar sólo con 256 niveles de gris (28), tenemos 65.536 niveles (216), unos “poquitos más” que vienen muy bien para que no se vean escalones (con 8 bits habría que emplear uno de los 256 posibles tonos de gris cada 34,5 metros y con los 16 bits disponemos de un gris diferente para cada 13 centímetros”<sup>32</sup>

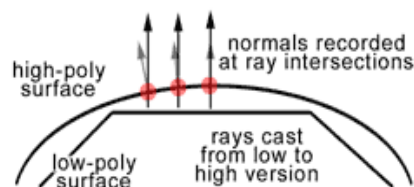


Figura 2.20: Vector de desplazamiento  
Fuente: Crytek, CryENGINE® 3  
<http://www.crytek.com/index.php>

### Vector Displacement (Normal mapping)

<sup>32</sup> [http://www.etereaestudios.com/training\\_img/relief\\_maps/relief\\_maps\\_1.htm](http://www.etereaestudios.com/training_img/relief_maps/relief_maps_1.htm)

También conocida como “Dot3 bump mapping”<sup>33</sup> y trabaja como un mapa de desplazamiento en cuanto que altera la geometría, pero tiene la ventaja de que permite el desplazamiento en diferentes ejes, ya que reemplaza por completo la normal a la hora de renderizar, permitiendo el desplazamiento en todas direcciones. Esta técnica es generalmente utilizada en modelos de alta y baja resolución de polígonos, calculando y almacenado la dirección de la superficie del modelo de mayor resolución con relación al de menor resolución, convirtiendo la superficie de la normal resultante en un mapa, incrementando el número de normales existentes a la misma cantidad del modelo de mayor resolución de polígonos.

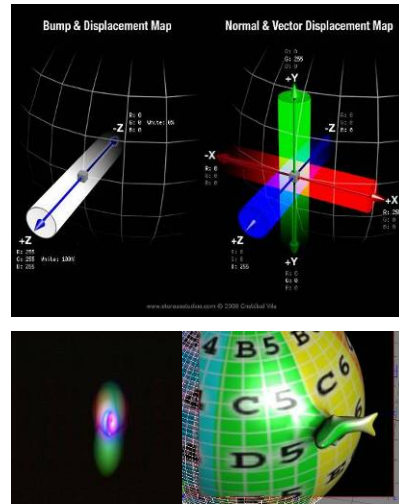


Figura 2.22: Comparación desplazamiento y vector de desplazamiento. Fuente: [http://www.etereaestudios.com/training\\_img/relief\\_maps/relief\\_maps\\_1.htm](http://www.etereaestudios.com/training_img/relief_maps/relief_maps_1.htm)

La idea de extraer el detalle geométrico de un modelo de alta resolución fue introducida por Krishnamurthy y Levoy en el artículo "Fitting Smooth Surfaces to Dense Polygon Meshes" en SIGGRAPH 1996, permitiendo crear un mapa de desplazamiento sobre superficies nurbs y se comenzó a trabajar sobre transferir el detalle de modelos poligonales de alta a los de baja resolución en 1998 con dos artículos, por Cohen en "Appearance Preserving Simplification" en SIGGRAPH 1998 y por Cignoni "A general method for recovering attribute values on simplified meshes" en IEEE Visualization 1998, indicando<sup>34</sup>

Se han generado algoritmos que en el proceso de simplificación sigue el detalle perdido que se debe mapear sobre la malla simplificada, siendo este aproximamiento una relación entre los dos modelos recreando una correlación en donde la forma de cómo se creó el modelo de baja resolución no interfiere en el proceso. Este aproximamiento tiene variantes que dependen de la aplicación que extraiga esta información.

El mapa utiliza 24 bits RGB en donde cada pixel representa la normal y los colores azul, verde y rojo representan las coordenadas para cada vértice, esto da la posibilidad de mover las normales a cualquier número de diferente dirección, que no dependen de la normal original del objeto. El resultado de mover la normal es que altera la forma en que la cámara las calcula y la geometría del modelo sigue siendo la misma.

El mapa de normales se genera al calcular la luz lambertian (tipología de material difuso, “diffuse”) para cada unidad del vector desde el punto en sombra hacia la fuente de luz, colocando un vector de normal a la superficie, siendo el resultado la intensidad de la luz en la superficie. Otros modelos producidos por la iluminación dependen del producto que se use para generar el vector de normales. Estas dimensiones espaciales son relativas a una coordenada del sistema constante para el “object-space” del mapa de la normal o a una variante suavizada del sistema de coordenadas (basado en las derivaciones de la posición con respecto a la coordenada de la textura) en el caso de “tangent-space” del mapa de normales. Añadiendo más detalle a la superficie del modelo, especialmente en conjunción con una técnica avanzada de iluminación.

La mayoría de de aplicaciones convencionales de mapa de normales usan un motor de engine y implementan mejoras en las tarjetas graficas, estableciendo en estas el canal rojo como material de relieve cuando la luz procede de la derecha, el verde cuando el material esta iluminado desde abajo y el canal azul cuando es frontal la fuente de luz, por lo cual se puede

<sup>33</sup> ÖHRN, Tina, Different Mapping Techniques for Realistic Surfaces, tesis, Department of Mathematics, Natural and Computer Science, 2008

<sup>34</sup> [http://wiki.cgsociety.org/index.php/Normal\\_maps](http://wiki.cgsociety.org/index.php/Normal_maps)

decir que XYZ son colocados en los valores de RGB en el mapa de normales. Si el material es clasificado como reflectaba es generalmente codificada en el canal alfa.

El mapa de normales, puede ser creado de diferentes maneras, entre las cuales esta generarlo desde NVIDIA Normal Map Filter plug-in en Photoshop, es un proceso rápido y produce buenos resultados visuales (pero no tiene en cuenta la precisión del detalle en el sentido métrico), basándose en mapas de desplazamiento<sup>35</sup>.

También se puede entender el desplazamiento de la normal expresado matemáticamente<sup>36</sup>

$$S'(u, v) = S(u, v) + D(u, v)\vec{N}$$

$$\vec{N} = \frac{\delta}{\delta u} S' x \frac{\delta}{\delta v} S'$$

$$\frac{\delta}{\delta u} S' = \frac{\delta}{\delta u} S + \frac{\delta}{\delta u} D\vec{N} + D \frac{\delta}{\delta u} \vec{N} \quad \text{Similar para } v$$

Asumiendo  $D \frac{\delta}{\delta u} \vec{N} = 0$  para pequeños desplazamientos

$$\vec{S}'_u = \vec{S}' + D_u \vec{N}$$

$$\vec{N} = \vec{S}'_u x \vec{S}'_v$$

$$= [\vec{S}'_u x \vec{S}'_v] + [\vec{S}'_u x (D_v \vec{N})] + [\vec{S}'_v x (D_u \vec{N})] + [(D_u \vec{N}) x (D_v \vec{N})]$$

$$= \vec{N} + D_u [\vec{S}'_u x \vec{N}] + D_v [\vec{S}'_v x \vec{N}] + D_u D_v [\vec{N} x \vec{N}]$$

$$\vec{N} x \vec{N} = 0$$

$$N' = \vec{N} + D_u [\vec{S}'_u x \vec{N}] + D_v [\vec{S}'_v x \vec{N}]$$

S=superficie  
N= Normal  
D=desplazamiento  
S=superficie

**Mipmap:** los mapas MIP (comúnmente llamados mipmaps), son colecciones de imágenes de mapas de bits que acompañan a una textura principal para aumentar la velocidad de renderizado y reducir sus artefactos. Son ampliamente usados en los videojuegos en 3D, simuladores de vuelo, y otras aplicaciones con imágenes tridimensionales. La técnica se conoce como mipmapping. El acrónimo "MIP" proviene de la frase en latín multum in parvo, que significa "mucho en poco espacio". Aunque necesitan más espacio en memoria, forman la base de la compresión de imágenes basada en transformación de ondas<sup>37</sup>.

## La iluminación

Se puede expresar la normal como una línea extendida desde un punto de la superficie, la cual es perpendicular a la superficie (la dirección perpendicular puede ser alterada, por lo cual no siempre es perpendicular), al saber la posición de la luz podemos trazar una línea desde este punto de la superficie a la luz, llamado vector de la luz, por lo cual si medimos el ángulo entre estas dos líneas conoceremos como iluminar ese punto.

<sup>35</sup> INGRASSIA, Michael, Maya for Games - Modeling and Texturing Techniques with Maya and Mudbox, focal press, 2009

<sup>36</sup> [www.janesrevolt.com/ray\\_tracing/cs6620-18-o.pdf](http://www.janesrevolt.com/ray_tracing/cs6620-18-o.pdf)

<sup>37</sup> <http://es.wikipedia.org/wiki/Mipmap>

Cuando el ángulo es pequeño se entiende que los dos miran a una posición similar, por lo que conocemos que el punto es brillante porque esta mirando a la luz casi directamente y si el ángulo es grande sabemos que la superficie es más oscura, asumiendo que solo hay una luz.<sup>38</sup>

### The Z-Depth Frame Buffer

Es la representación de la profundidad de una escena basada en el punto de vista de una cámara mirando un plano, usada generalmente para difuminar (2D fog) partes selectivas de un render, al utilizar múltiples “passes” o para generar un rápido efecto de “depth-of-field post-process”. Mental ray permite un formato de imagen ZT para exportar la imagen de profundidad en z. Estas imágenes se unifican los diferentes mapas como el de color, con cada iluminación del modelo independientemente, con las sombras, entre otros y se maneja cada variante por separado, permitiendo un control independiente de cada variable del modelo<sup>39</sup>.

### ANTECEDENTES DE LOS MAPAS DE NORMALES:

Entre 1996 y 2001 Varios grupos han trabajado en la textura y el mapa de normales como una representación eficiente para preservar la geometría y el detalle cromático de otro modelo con más detalle

Hasta este entonces pocos métodos fueron planteados, usualmente usaban un proceso de “scan-convert” para cada triangulo del modelo simplificado para obtener una nube de puntos regular, computando las correspondientes normales. Otro proceso consistía en tomar el modelo de alta resolución y tratar de agrupar en “paquetes” una matriz rectangular- el mapa de normales, logrando la construcción de un mapa desde un modelo simplificado y un original detallado, calculando la correspondiente normal para cada punto del mapa, sugiriendo dos aproximaciones para abordar este proceso, la primera calculando directamente la correspondiente normal para cada punto, el otro acercamiento se basa en la Parametrización en la asignación del valor de cada parte de la normal. Sin embargo estos procesos consumen mucho tiempo de procesamiento en modelos complejos.

Posteriormente en el 2002<sup>40</sup> se genero un proceso donde los mapas de normales se determinaban mediante la correspondencia de cada vector de la normal con el punto que se desplazaba, siendo la distancia entre estos puntos una parte de la normal, que necesita en promedio 12 posiciones para generar un correcto mapa de desplazamiento (siendo lo mínimo dos posiciones, mirar figura 28). Este proceso se logro gracias a que las tarjetas graficas lograron soportar esta clase de técnica de hardware permitiendo un “single pass” en “real-time rendering” de texturas complejas y de la normal que mapea la geometría, mediante las tarjetas Nvidia’s GeForce3 y GeForce4 graphics cards, permitiendo la representación del mapa de normales de 16 bits por componente. En estas aproximaciones

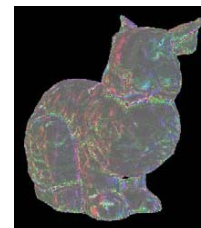
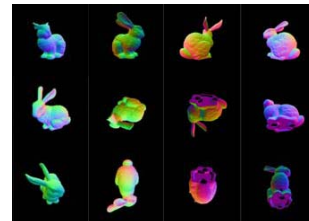


Figura 2.23: El conejo, 12 posiciones utilizadas para la construcción de la normal, Fuente: Bernd Fröhlich, China, 2002

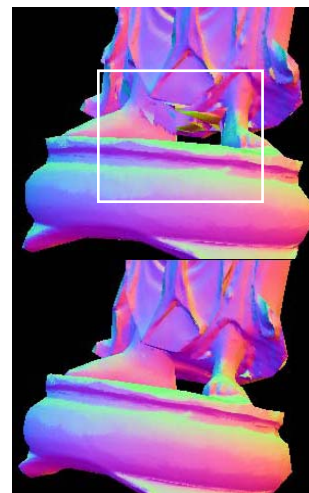


Figura 2.24: Zonas poca visibilidad, fuente: Bernd Fröhlich, China, 2002

<sup>38</sup> [http://www.bencloward.com/tutorials\\_normal\\_maps3.shtml](http://www.bencloward.com/tutorials_normal_maps3.shtml)

<sup>39</sup> [http://www.animation.dreamers.com/clases/3d/crear\\_pinscreen.php](http://www.animation.dreamers.com/clases/3d/crear_pinscreen.php)

<sup>40</sup> FRÖHLICH, Bernd, Fast Normal Map Generation for Simplified Meshes, Computer School, Hangzhou Institute of Electronics Engineering, China, 2002



se a demostrado que ciertas posiciones fijas aseguran un correcto mapa de normales, pero en modelos complejos hay zonas que no se ven por las posiciones predeterminadas, por lo cual se da la necesidad de interpolar los vértices de la normal con los del modelo, o especificar un factor de distancia donde solo las distancias menores a una preestablecida, permiten la actualización del modelo, lo cual vemos en la figura 29.

Para verificar la efectividad de este proceso se realizo una comparativa entre dos modelos complejos, en donde el tamaño del mapa de normales fue de 1024x1024, demostrando que la complejidad del modelo no afecta significativamente este proceso, ver tabla 1.

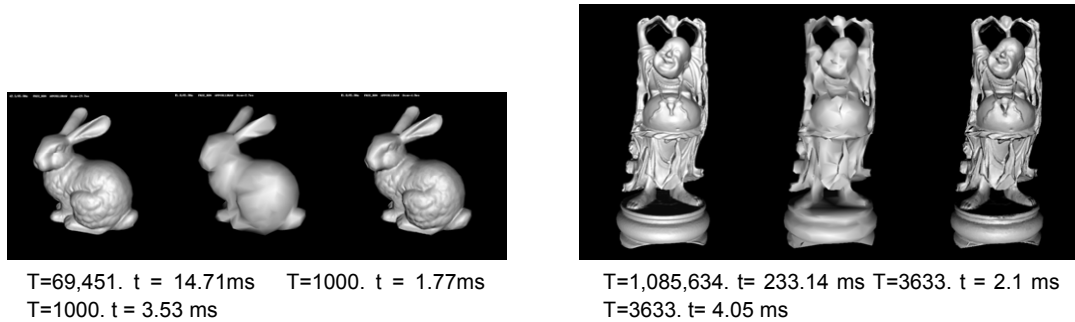


Figura 2.25: Modelos con mapas de normales. Fuente: Bernd Fröhlich, China, 2002

Modelo	Número de polígonos del modelo simplificado	Tiempo de construcción (segundos)	Número de muestras
Conejo Modelo original de 69,451 polígonos	500	7.39	900,000
	1001	7.26	882,882
	1860	7.75	952,320
	2306	7.51	903,952
	3109	7.51	895,392
	7200	7.7	921,600
Buddha Modelo original de 1'085.634 polígonos	2446	12.23	890,344
	3161	12.07	910,368
	4072	12.18	895,840
	6000	12.03	864,000

Tabla 1: Comparación de modelos, fuente: Bernd Fröhlich, China, 2002

### RETOPOLOGÍA:

La retopología es una técnica usada sobretodo en el mundo de la animación, ya que la forma en que se construye la geometría de los objetos es indispensable para determinar su manipulación y al ser la animación una acción constante de manipulación de las mallas, el proceso de retopología es contante, generando mallas con una construcción geométrica racional con su morfología, identificando cada una de sus partes y como estas se construyen para poder ser alteradas, siendo una preocupación constante en el modelado desde la perspectiva de los arquitectos, ya que las tecnologías actuales en el campo son restrictivas e impiden alterar los modelos arquitectónicos de forma flexible y siendo un problema realmente importante en la ingeniería inversa, en la cual se trata de reconstruir un edificio preexistente, tratando de mantenerse fiel al modelo, por lo cual se utiliza la tecnología de escáner laser como información base, pero esta información es desordenada y tan densa que es imposible de manipular sin un proceso previo de filtrado o reestructuración de la malla.

Por ello de la importancia de utilizar la retopología, para definir las mallas libres,

- Selección por líneas continuas, las cuales al corresponder con la geometría del modelo permiten trabajar el modelo selectivamente, sin tener restricciones en la unión entre planos, permitiendo separar o unir diferentes zonas.
- Reducción de polígonos utilizando solo pos que se necesiten para definir una superficie.
- Corrección de irregularidades, los problemas de normales o huecos en la malla desaparecen al crearse una malla nueva basándose en la malla libre figura 31 arriba.
- La mapificación es más lógica sobre modelos de pocos polígonos y con los bordes continuos, ya que se pueden desdoblar las superficies y unirlos sin problemas entre las uniones.
- Al generar modelos de modelos de múltiple resolución se tiene tanto el modelo simplificado como el de alta resolución, pero la información de los dos modelos se tiene que extraer de forma independiente, ya que los programas de modelado y de CAD no permiten mallas de tal número de polígonos, pero eso no impide que en el futuro se puedan manejar ambos modelos, por lo cual la información se reestructura pero no se pierde.
- Permite generar modelos cerrados, que pueden ser impresos en 3D manteniendo la relación CAD-CAM.
- La integración con diferentes plataformas y programas de edición de modelos es muy amplia, aunque se maneje para el modelo solo el formato OBJ, se puede exportar los mapas teniendo en cuenta las diferencias entre plataformas y programas, al igual que sus formatos.

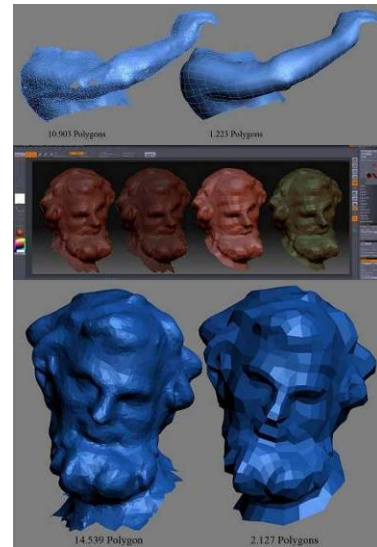


Figura 2.26: Hercules vs. lion Nemeo, siglo XVII, Fuente: Sbrush center. [www.zbrushcentral.com/zbc/showthead.php?t=47628](http://www.zbrushcentral.com/zbc/showthread.php?t=47628)

**MULTIPOL PASSES:** Los modelos tradicionales parten del estudio de la geometría del elemento a modelar, utilizando como ayuda planos del modelo en 2D ubicados en el espacio 3D, permitiendo alinear el modelo con las imágenes en las vistas paralelas.



Figura 2.27: Multipol passes. Fuente: INGRASSIA, Michael, Maya for Games - Modeling and Texturing Techniques with Maya and Mudbox, focal press, 2009

## 2.6 Aplicaciones en tiempo real

Los mapas de normales de renderizado interactivo fueron originalmente posibles en PixelFlow, una máquina de gráficos "parallel" construida en la Universidad de North Carolina en Chapel Hill. Posteriormente fue posible realizar un mapeado de normales en "high-end SGI workstations" usando "multi-pass rendering" y operaciones de "frame buffer" en un PC con algunos trucos usando texturas "paletted". Más adelante con el aumento en procesamiento, la sofisticación de los PC en los hogares y las consolas de videojuegos, los mapas de normales se esparcieron por los videojuegos de alto rendimiento. Siendo Microsoft's Xbox los primeros en soportar esta clase de efecto en consolas en el mercado,

Los mapas de normales actualmente se han usado extensivamente gracias a la tercera versión de Unreal engine (Epic Games), ya que cada empresa de videojuegos tiene sus propias aplicaciones y Unreal engine ha permitido utilizar este recurso en tiempo real fuera de las empresas del entretenimiento. Pero la popularidad de estas herramientas se debe a la mejora las cualidades gráficas y la reducción en el procesamiento a diferencia de otros métodos que producen efectos similares. Esta reducción en el procesamiento se debe en parte al detalle según la escala y la distancia del elemento, permitiendo reducir el detalle del mapa de normales en la textura dada (usualmente se utiliza la técnica de "mipmapping"). También la distancia a la superficie requiere una simulación menor de la compleja iluminación.

En la mayoría de aplicaciones de desplazamiento de real time (desarrollados en aplicaciones de video juegos) utilizan per-vertex Gouraud shading, produciendo una pobre iluminación basada en los contornos de los polígonos, en la que los píxeles se interpolan para obtener la luz, permitiendo un cálculo rápido en estas aplicaciones, pero no con realismo, generando que escenas con pocos polígonos tengan defectos y no se vean muy reales, obligando a modelos con mayor número de polígonos, los cuales están limitados por el límite de la programación.

Actualmente se utiliza la iluminación Per-pixel utilizada por primera vez con las tarjetas gráficas GeForce 2, permitiendo calcular la iluminación para cada píxel en vez de cada vértice.

### **Consolas de nueva generación (Parallax mapping, Realtime games)**

Los desarrolladores de consolas de nueva generación como la Xbox360 permiten utilizar mapas de normales muy pesados en tiempo real y comienzan a implementar el "parallax mapping".

Parallax mapping también llamado "offset mapping" o "virtual displacement mapping". Es una mejora de las técnicas Bump mapping o Normal mapping que se aplican a texturas en aplicaciones 3D como los videojuegos. Para el usuario final, esto significa que las texturas como las de las rocas tendrán una profundidad más clara y un realismo mayor con poca influencia en el desempeño de la simulación. Con esta técnica se logra implementar desplazando las coordenadas de la textura a un punto en el polígono por una función desde el ángulo de vista en el espacio de la tangente (el ángulo relativo a la superficie normal) y el valor del mapa de alturas en tal punto. Desde un punto de vista inclinado, las coordenadas de la textura se desplazan más, y así se logra la ilusión de profundidad debido a los efectos parallax mientras la vista se mueve<sup>41</sup>.

Los mapas de desplazamiento utilizados en las aplicaciones de tiempo real son:

---

<sup>41</sup> [http://es.wikipedia.org/wiki/Parallax\\_mapping](http://es.wikipedia.org/wiki/Parallax_mapping)

- El mapa de normales es más usado en video juegos en tiempo real, siendo el “parallax mapping” una técnica que consume más recursos del sistema, pero que genera mejores resultados.
- El mapa de “Bump” es una técnica de textura que nunca cambia el hecho de que los polígonos son planos.
- La técnica de "parallax mapping" en comparación con las anteriores es una técnica avanzada que combina las ventajas de las dos anteriores, sin el consume de recursos de los mapas de desplazamiento. Esta técnica tiene un efecto parallax propio cuando la cámara se mueve por la superficie, pero sin modificar la geometría como el mapa de desplazamiento.

## 2.7 Arqueología y restauración

El campo de la arqueología abarca un amplio rango de escalas de proyectos a restaurar, destacando en las investigaciones sobre reducción de mallas, ya que los proyectos más importantes en cuanto a decimación y precisión se dan en el campo de la escultura, con modelos de formas libres orgánicas, llegando a una precisión de micras y a millones de polígonos en las mallas. Un ejemplo de ello lo vemos en el proyecto de st. Matthew vemos como una malla de 4M de triángulos se simplifica en 500 y mediante un mapa de desplazamiento se regresa al detalle de la malla origina, con el David vemos el mismo proceso en cuanto a diferentes cualidades de visualización de la maya simplificada, pasando de 1,683K a 10K en los polígonos, y mediante un mapa de desplazamiento de “bump texture” se recupera la resolución original, considerando un archivo de 1024\*1024 RGB para el mapa de desplazamiento con un peso de 1.5MB, en formato PNG, preservando la cualidad de la imagen y con un modelo de 905KB en un archivo binario comprimido, comparado con 1.6M caras de la malla, la cual necesitaría 36MB de almacenamiento en el disco duro. Por otro lado el error cuadrático de la simplificación de la maya se puede considerar como un factor del tamaño de la malla con 176 byte para cada cara, teniendo en cuenta que podemos procesar alrededor de 1.1M-1.3M Caras en un sistema de 256MB de RAM<sup>42</sup>.

También interesa como la arqueología ha documentado algunos proyectos, ya que al tener estos una escala pequeña, permiten y exigen un mayor nivel de documentación de la pieza, reforzando la precisión y la utilidad del proceso de escaneado, ya que al ser más

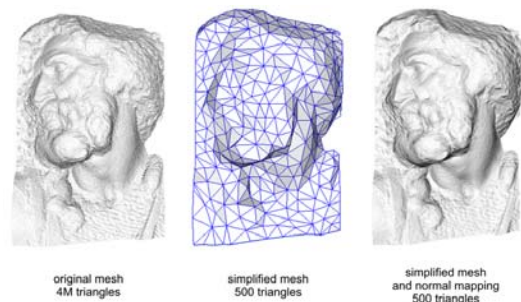


Figura 2.28: Reducción de modelos de malla, mediante la extracción algorítmica de mapas de desplazamiento. Fuente: CIGNONI, Paolo, Adaptive TetraPuzzles: Ecient Out-of-Core Construction and Visualization of Gigantic Multiresolution Polygonal Models, escultura: St. Matthew



Figura 2.29: Estructura interior identificada con radiografías. Fuente: Mattia Mercante, Tesis. Due bozzetti per fontane da giardino dal Museo Nazionale del Bargello di Firenze. 2007.

<sup>42</sup> P. Cignoni, External Memory Management and Simplification of Huge Meshes [http://vcg.isti.cnr.it/publications/papers/oemm\\_tvcg.pdf](http://vcg.isti.cnr.it/publications/papers/oemm_tvcg.pdf)

manipulables que los objetos arquitectónicos permiten extraer más información, lo cual vemos en el proyecto de documentación informatizada de “Ercole lotta con il leone Nemeo”, datado en esta tesis en el siglo XVII.

Este proyecto se basa en la mínima intervención y en la búsqueda de utilizar materiales reversibles, compatibles con la obra, Para ello se generaron modelos digitales de las diferentes partes que conforman la obra, desde modelar la estructura de madera, como la de metal y el cuerpo que conforma el interior del elemento, ello se logro mediante el uso de tecnología del escáner laser y de las radiografías generadas por la tomografía, acompañado de los siguientes procesos para identificar la obra<sup>43</sup>:

- A. Identificación del material de construcción de la obra de arte
- B. Protección de agentes patógenos
- C. Eliminación, cuando sea posible, de antiguas intervenciones
- D. Recomposición de los materiales y recuperar la lectura adecuada de los volúmenes
- E. Recuperación parcial del aspecto original, con la consecuente reconstrucción de la obra como del esbozo del patinado de bronce
- F. A través de la investigación físico-química, estilística y de la técnica artística, formular una hipótesis de la época y el origen de los dos modelos de fuentes

La facultad de adoptar un modelo digital tridimensional de la escultura ha resaltado la problemática de cómo obtener los datos informáticos y consecuente con ello la necesidad de organizar los datos aportados, en cuanto a la gestión de la información de las administraciones públicas de los bienes culturales, buscando un estándar informático (material infra numérico, vectorial, de imagen, etc.) fácilmente accesible a la comunidad restauradora.

Esta investigación de integración de tecnologías en el campo de la arqueología permitió; la reversibilidad de la intervención, la compatibilidad con la obra (materiales, estructura, cromatismo), la durabilidad y

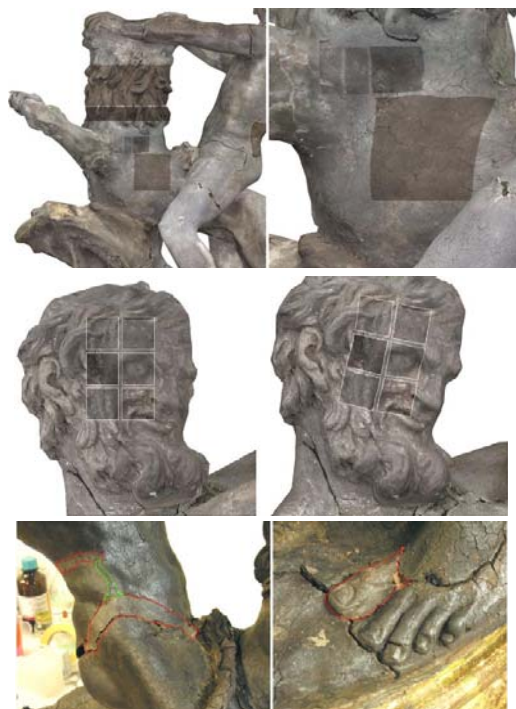


Figura 2.30: Prueba de barniz en el modelo 3D e identificación de zonas previamente restauradas. Fuente: Mattia Mercante, Tesis. Due bozzetti per fontane da giardino dal Museo Nazionale del Bargello di Firenze. 2007.

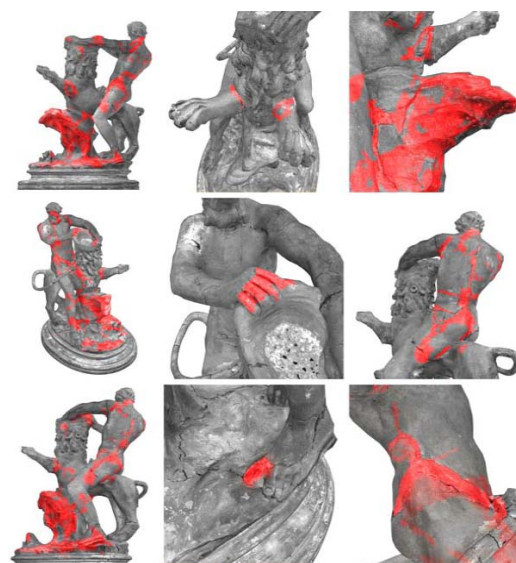


Figura 2.31: Modelo digital tridimensional: datos del barrido exterior de la superficie de la escultura, que unida con el estudio tomográfico permitió distinguir áreas de intervención. Las tres imágenes del centro en vertical se refieren a la pérdida de material. Fuente: Mattia Mercante, Tesis. Due bozzetti per fontane da giardino dal Museo Nazionale del Bargello di Firenze. 2007.

<sup>43</sup> MERCANTE, Mattia, Due bozzetti per fontane da giardino dal Museo Nazionale del Bargello di Firenze. Il caso dell “Ercole lotta con il leone Nemeo”: documentazione informatizzata al servizio del restauratore, Tesi di Diploma di Restauratore dei Beni Culturali, Opificio delle Pietre Dure, 2007.

fidelidad de la restauración, la fuerza del adhesivo para la consolidación de las grandes fracturas y la ligereza para no hacer frágil la escultura.

Este proyecto de restauración busco obtener la información con presupuestos limitados por ser un proyecto universitario, por lo cual se utilizo el scanner David para tomar los datos externos de la pieza, pero al mismo tiempo se utilizo la tomografía para registrar el interior de la pieza, logrando reconocer características interiores, con el ejemplo de este proyecto encontraron que la estructura de madera como apoyo del modelo es solida, no tiene presencia de sedimentación o de termitas, la estructura metálica, se valoro en cuanto a su estabilidad, oxidación y como soporte del yeso, manteniendo las características originales y la carta de investidura está intacta y no particularmente degradada<sup>44</sup>.

En la figura 34.2 vemos simulaciones y pruebas de limpieza: En la parte superior la resina "bezoino" en contacto con un disolvente, oscurece y satura la masa, la cara Se simularon diferentes grados de saturación, suponiendo que el efecto de la limpieza con acetona, también se probó la forma de pulir la pintura dorada de la base, de con diferentes sustancias, determinando la forma de pulirla antes de alterar la obra. En la parte inferior de esta misma figura 34.2 vemos que también se identificaron zonas que anteriormente fueron restauradas, en la que un dedo del pie izquierdo es identificada, al igual que se identifican las demás patologías de la pieza. También se registro el proceso de pulir la pieza, documentando el cambio de la superficie, resaltando las partes trabajadas.

---

<sup>44</sup> MERCANTE, Mattia, Due bozzetti per fontane da giardino dal Museo Nazionale del Bargello di Firenze. Il caso dell "Ercole lotta con il leone Nemeo": documentazione informatizzata al servizio del restauratore, Tesi di Diploma di Restauratore dei Beni Culturali, Opificio delle Pietre Dure, 2007.

### 3 ANÁLISIS DEL DETALLE DE LAS MALLAS

#### 3.1 Descripción de los proyectos analizados y estado de la información base

##### Descripción del LMVC:

“El Laboratorio de Modelización Virtual de la Ciudad (LMVC) fue creado en el año 2000, como una iniciativa del Centro Específico de Investigación de la Universidad Politécnica de Cataluña, Centro de Política de Suelo y Valoraciones (CPSV), junto con la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona (ETSAB), impulsado por los departamentos de Construcciones Arquitectónicas I y de Expresión Gráfica en la Arquitectura. Actualmente el LMVC lleva más de ocho años en la investigación y desarrollo de usos y aplicaciones de la tecnología láser en el registro del Patrimonio Arquitectónico. Su objetivo principal es ofrecer una integración de las nuevas tecnologías en el estudio, visualización y modelización de la ciudad. También entregar soporte a profesores y estudiantes para la difusión de estas nuevas tecnologías.”<sup>45</sup>

##### Escalas de trabajo y proyectos:

**Detalle:** Acceso Metro, Porta del Trentenari, Retaule Sant Pere, Caballerizas Güell

**Arqueológico:** Born, Empúries, Escaladei, Franqueses, Mèdol, Megalito, Sicilia, Termes Ca l'Arnau

**Arquitectónico:** Barberà del Vallès, Breda, Canillo, Casa Batlló, Casa Milà, Cellar Cooperatiu, Estadio, Esparreguera, Monasterio de Pedralbes, Palau Güell, Sagrada Família, Saló de Cent, San Severo, Santa María del Mar

**Urbano:** Alicante, Cadaquès, Cuba, Esplugues, Fossar de las Moreras, Sitges, Tossa de Mar, Castell follit de la roca, Lloret de Mar.

##### Proyectos analizados:

##### Materiales

Se realizaron pruebas para indicar el límite del escáner minolta, para ello se utilizó el lente tele y se escaneó a una distancia de un metro, de forma perpendicular al objeto, siendo el objeto de escaneo del tamaño de un A2, con una distancia al objeto que permitiera obtener la máxima resolución, ya que número de celdas es la misma lo que varía es el tipo de lente, la concentración de celdas sobre un área determinada por la distancia y la pérdida de la información en la toma de datos, por la posición enfoque y morfología del modelo.

Tamaño de la imagen a color 640\*480. Área escaneada 16\*21 por posición, con un traslape del 10% con cada posición.

Tamaño aproximado de la celda:

VVD 0,895mm

CDM 0,448mm

Número aproximado de celdas CDM 173.151

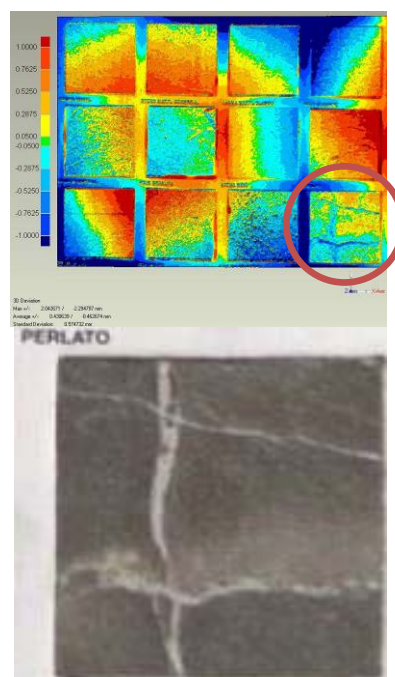


Figura 3.1: Libro de materiales y Material Perlato (3x3cm).

<sup>45</sup> [http://www-cpsv.upc.es/lmvc/lmvc\\_archivos/frame.htm](http://www-cpsv.upc.es/lmvc/lmvc_archivos/frame.htm)

Pos.	Puntos VVD	Puntos CDM	Tamaño CDM	Lente focal	Posición
0	56629	302780	3,605	25,573 mm Tele	Perpendicular sup.
1	68484	286511	3,605	25,573 mm Tele	Perpendicular sup.
2	75383	303130	3,605	25,573 mm Tele	Perpendicular sup.
3	74721	300011	3,605	25,573 mm Tele	Perpendicular sup.
Total	275217	1192432	Tamaño del proyecto #1	23,262	
Diferencia de:		917215	Tamaño del proyecto #2	23,262	

Tabla 2: Toma de datos materiales. Fuente propia

## Parking

Información de la toma de datos: Se escaneo con un ángulo de 50° teniendo una diferencia de presión mínima entre la zona más cercana y la más lejana en cuanto a la inclinación de la toma de datos, la cual en otros proyectos ha sido muy visible cuando se llega cerca del limite de distancia del escáner que es de 2,5m

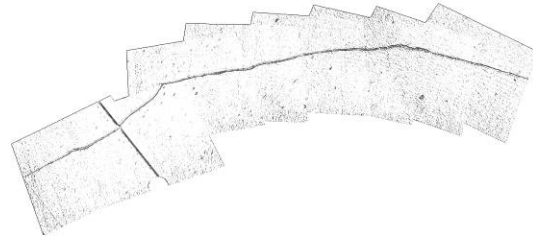


Figura 3.2: Posiciones de escáner Konica minolta superpuestas (8 pos).

Área escaneada 55\*80 por posición, con un traslape del 10% con cada posición.  
Tamaño aproximado de la celda: CDM 0.12mm  
Número aproximado de celdas CDM 30'553.333

Posición	Puntos VVD	Puntos CDM	Tamaño CDM	Lente focal	Posición
0	73457	296973	2,701	14 mm Middle	Inclinada 45°
1	72750	296973	2,701	15 mm Middle	Inclinada 45°
2	74047	295542	2,701	16 mm Middle	Inclinada 45°
3	73843	298352	2,701	17 mm Middle	Inclinada 45°
4	73374	297571	2,701	18 mm Middle	Inclinada 45°
5	73134	295835	2,701	19 mm Middle	Inclinada 45°
6	72804	294715	2,701	20 mm Middle	Inclinada 45°
7	73512	294607	2,701	21 mm Middle	Inclinada 45°
8	73491	296209	2,701	22 mm Middle	Inclinada 45°
Total	660412	2666777	Tamaño del proyecto	243,839	
Diferencia de:		2006365			

Tabla 3: Toma de datos parking.

La información de color es reducida al estar en un parking sin iluminación, por lo cual necesitan una manipulación posterior. El tamaño de las imágenes es de 640\*480



## Capitel

Información de la toma de datos: Se escaneo perpendicularmente al objeto, identificando los problemas de falta de información en las caras laterales, por lo cual se escanearon también las esquinas del modelo permitiendo tener más puntos de unión entre posiciones, a una distancia de 1,2 m.

El área de escaneo de cada posición es de 20\*25, con un traslape del 30% con cada posición.

Tamaño aproximado de la celda: CDM 0,57 mm

Número aproximado de celdas CDM 153.894

Tamaño de la imagen 640\*480.



Figura 3.1.3 Render del capitel, con la imagen fotográfica para aumentar el detalle.

Pos.	Puntos VVD	Polígonos CDM	Tamaño CDM	Lente focal	Posición
0	141846	142002	3,605	25,573 mm Tele	lateral esquina
1	125399	130076	3,605	25,573 mm Tele	lateral
2	145193	145256	3,605	25,573 mm Tele	lateral esquina
3	124528	128833	3,605	25,573 mm Tele	lateral
4	140515	141535	3,605	25,573 mm Tele	lateral esquina
5	126179	129846	3,605	25,573 mm Tele	lateral
6	146012	147083	3,605	25,573 mm Tele	lateral esquina
7	125829	130530	3,605	25,573 mm Tele	lateral
8	146513	144258	3,605	25,573 mm Tele	Superior
9	160796	156880	3,605	25,573 mm Tele	superior esquina
10	145439	140113	3,605	25,573 mm Tele	Inferior esquina
11	138659	132259	3,605	25,573 mm Tele	Inferior esquina
12	142774	138422	3,605	25,573 mm Tele	Inferior esquina
13	144946	139901	3,605	25,573 mm Tele	Inferior esquina
Total	1954628	1946994	Tamaño del proyecto 673,849		
Diferencia de:	7634				

Tabla 4: Toma de datos capitel. Fuente propia

## Drassanes

Tras realizar una serie de proyectos en las que se integran las imágenes fotográficas y la información métrica, se encontraron repetitivamente los mismos problemas, en cuanto a la correcta visualización de las nubes de puntos que dependen de la información de color o de intensidades, siendo estas poco definidas al unir posiciones en que la información de color es diferente, planteando las siguientes interrogantes:

- ¿Cómo las fotos modifican la forma de escanear?
- ¿Qué normas seguir para asignar el color a los puntos?
- ¿Cuál es la diferencia entre resolución y escala para un modelo de nube de puntos?



Figura 3.4: Diferencia entre resolución y escala en un modelo de nube de puntos.

Lo cual se tuvo en cuenta en los procesos tanto de toma de datos como en el pos proceso de la siguiente forma:

Se generaron dos modelos de nubes para el proyecto de Drassanes, uno de alta resolución buscando el mínimo traslape entre las diferentes posiciones mediante el manejo de ángulos de escaneo (ángulo  $0.08^\circ$ ) y otro de poca resolución como modelo de contexto (ángulo  $0.2^\circ$ ), que permitió la unión de las diferentes posiciones. El primer modelo se considera el de detalle, aumentando la resolución de los modelos previos del laboratorio de modelización virtual de la ciudad, teniendo en cuenta tanto la precisión como la correcta proyección del color sobre la nube de puntos, permitiendo como veremos más adelante de generar mallas de resolución de  $0.005\text{ m}$  que poseen una información de color que puede ser extraída para modelos con texturas, con una alta resolución teniendo en cuenta el tamaño de los mapas de textura máximos y los texels.

Con este proyecto se desarrollaron nuevas estrategias para el proceso de escanear, ya que se llegó a la conclusión de que al manejar modelos de color la información de la fotografía era más restrictiva que la información proveniente del escáner, por las siguientes razones:

Reducción de los puntos en la toma de datos:

El ángulo del lente focal de la cámara de  $20\text{ mm}$  (cámara nikon D100) que se utilizó para este proyecto es menor que el que el ángulo que recoge el sensor el escáner de  $80^\circ$ , reduciendo un hasta un  $30\%$  la información que se recoge en una posición de escaneo (por ejemplo en escáneres panorámicos con un ángulo de  $0.08$  se llega a perder un  $25\%$  de los puntos, al comparar la nube de color contra la de intensidades), por lo cual los límites del panorama de escaneo no se debe interpretar desde el escáner sino desde el panorama que genera la cámara.

## PROBLEMÁTICA ENTRE PANORAMAS:

Se identifico que los problemas de color e iluminación entre fotos pasaban a un segundo plano, ya que la verdadera pérdida de información se da al unir los panoramas entre posiciones de escaneo:

- El color de la fotografía cambia con la distancia y al unir posiciones distantes el color se ve tan alterado que no se puede igualar con las posiciones más cercanas, debido a la profundidad de campo<sup>46</sup> y factores ambientales.
- Al unir posiciones de diferentes horas o diferentes días, cambia el valor tonal de la fotografía ya que con la cantidad de fotos no permite realizar un control del color de la fotografía (balance del blanco), por lo cual se debe tomar un panorama como referencia e igualar el color de los demás en base a este, por lo cual debe limitarse cruzar panoramas distantes ya que se dificulta la homogeneidad del color.
- Entre posiciones las fuentes de luz cambian, generando desde panoramas a contra luz hasta panoramas con sobreexposición, en los cuales se da cierta perdida de información que no se puede recuperar, obligando a eliminar estas zonas en las nubes de puntos, ya que una posición puede dañar la definición de otra. En estas circunstancias una sola posición es coherente, pero al mezclar tomas de datos se visualiza de forma errónea y de poca calidad la nube de puntos. Por otra parte las sombras de las superficies ayudan a resaltar su volumetría, pero al unir posiciones esta se tiene que reducir para que al unirse con otros panoramas dos posiciones con diferentes sombras no sean tan aparentes.
- La diferencia entre el sensor de la cámara y la del escáner es más evidente en interiores, ya que elementos cercanos se pueden proyectar a zonas lejanas, por la diferencia en la posición de los sensores y porque la cámara toma los datos con un mayor punto de fuga que el escáner, por lo cual se tiene que tener en cuenta los elementos lejanos y cercanos en la decisión de determinar la posición de escaneo.
- Problemas de adaptación a la luz en lugares oscuros con una fuente de luz muy contrastante entre fotos de un panorama. Para solucionar este problema se utilizo la técnica HDR "High Dynamic Range Rendering" (Renderizado de alto rango dinámico) es una tecnología de renderizado que busca imitar el funcionamiento de la pupila del ojo, al consigue iluminar correctamente todas las zonas de una fotografía aunque estas contengan diferentes luminosidades, ya que el ojo al adaptarse de forma continua a las diferentes iluminaciones permite que el cerebro adapte esta información, lo cual no es posible directamente con las maquinas fotográficas en la actualidad, ya que la capacidad de adaptación que tienen está basada en el fotómetro (medidor de luz).
- La relación entre panoramas interiores y exteriores también tienen restricciones en la forma de escanear, ya que las posiciones interiores que toman datos del exterior pierden la información de color en estos puntos, ya que la cámara no puede tomar el interior y el exterior adecuadamente en la misma foto y en algunos casos de diferencia de luz fuerte desde el exterior se daña tanto lo exterior como el interior, por ello los panoramas de color entre interior y exterior no se pueden unir directamente sin comprometer la calidad del exterior o del interior. También en esta relación existen límites técnicos en cuanto al tiempo de descarga de las fotos en el ordenador impidiendo abrir mucho el obturador, y el flash tiene un límite muy restringido. Por lo

---

<sup>46</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Depth\\_of\\_field](http://en.wikipedia.org/wiki/Depth_of_field)

cual se utilizo HDRR<sup>47</sup>, teniendo en cuenta las cosas que se movían y los reflejos de los materiales, siendo un retraso en la toma de datos y en el postproceso.

Con ello se demuestra que la toma de datos debe ser selectiva en proyectos de escala moderada, reduciendo al máximo el traslape entre Tomás de datos, al punto de sectorizar el espacio a escanear.

Se aumento la resolución de escaneo pasando de 0.1° a 0.08° ya que se redujo el tiempo de toma de datos al reducir la zona a escanear, en la que se tomaron solo 140° del panorama permitiendo solo el traslape entre posiciones continuas y reduciendo este al mínimo.

Se separo los escáneres de contexto con escáneres de detalle, ya que el contexto siempre va a ser una construcción de escáneres lejanos con una perdida de información importante, pero a su vez los escáneres de contexto permiten la correcta unión entre panoramas y aumentan las posiciones que puede mallar los programas usados para unir las posiciones, ya que al ser escáneres de contexto se disminuyo la resolución de la toma de datos a 0.2° lo cual permitió a su vez reducir el tiempo en la toma de datos.

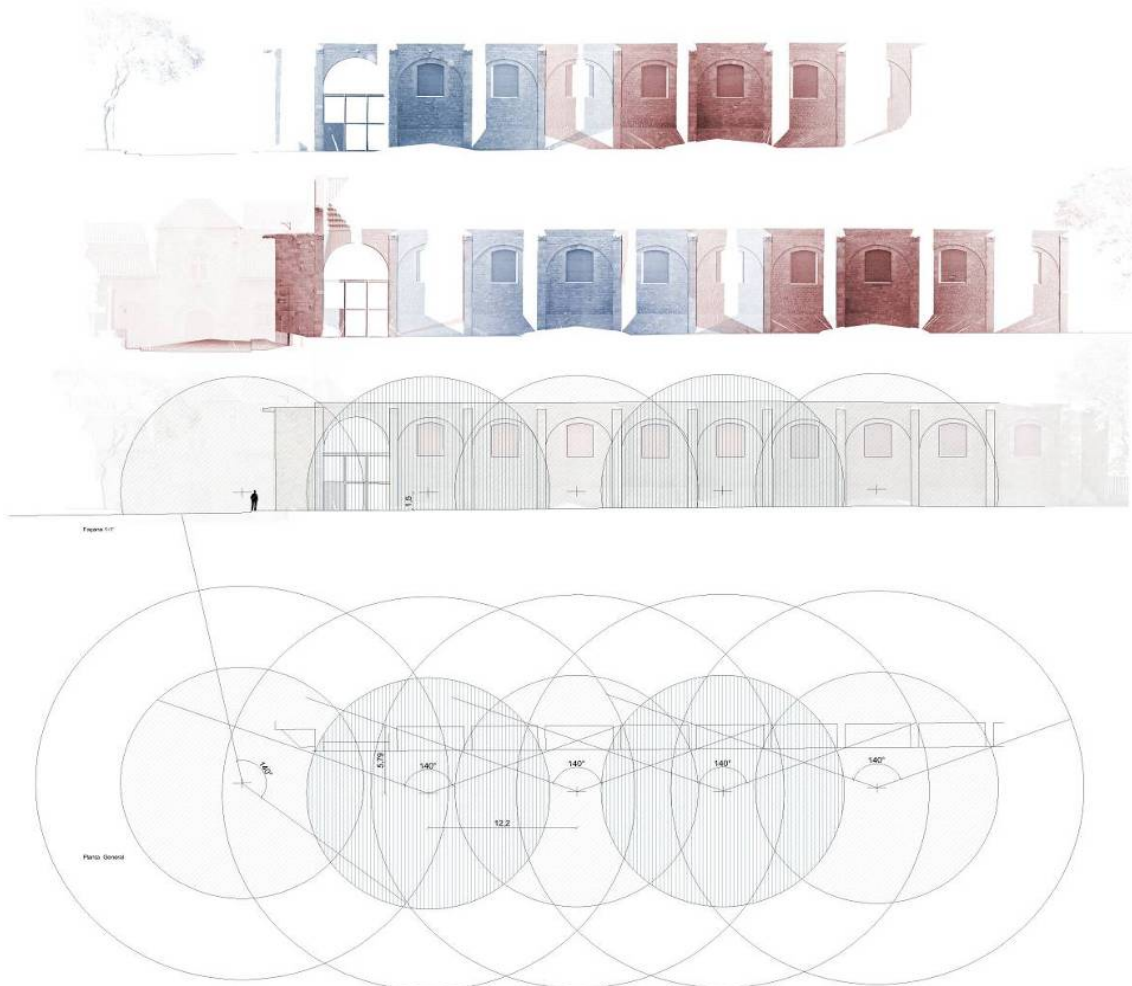


Figura 3.5: Proceso de escaneo de la av. Drassanes.

<sup>47</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/High\\_dynamic\\_range\\_rendering](http://en.wikipedia.org/wiki/High_dynamic_range_rendering)

## Batló

La resolución y la precisión de este modelo se limitó por las distancias a la que fue escaneado, con posiciones a 75m, 51m, 22m, 15m y 7m, por los problemas de oclusión y la altura del edificio, que impidieron una toma de datos más próxima. Generando una nube de puntos que no es homogénea y con un error de unión en la toma de datos lejanas, sumado al problema de la oclusión por la vegetación, que redujo los datos en ciertas tomas. Otro problema identificado fue que la información de color se recogió en diferentes días con condiciones de luz que no se tuvieron en cuenta, llegando a perder la información de color de los escáneres lejanos por sobresaturación de la foto, y en los cercanos por la sombra del edificio, la cual se recuperó parcialmente mediante programas de iluminación en fotografía.



Figura 3.6: Posiciones del levantamiento de la Batlló.

Por otra parte la complejidad de este edificio permite comparar los resultados de las metrologías propuestas, dada su complejidad orgánica, logrando identificar las ventajas de un modelo de múltiple resolución ya que al tener diferentes densidades de puntos es más lógico construir el modelo por partes y con diferentes resoluciones, las cuales se recuperan en un modelo único de múltiples niveles de resolución, en donde se recupere el detalle extraído del modelo y las zonas que no tienen detalle se puedan complementar con el tratamiento de las imágenes de desplazamiento.

Al igual que complementar información de zonas que no se lograron escanear correctamente mediante los mapas complementarios, mediante un re mapeado entre imágenes 2d, ya que la información de color de la nube de puntos se puede extraer y reemplazar por fotografías específicas para mejorar el modelo de mallas, permitiendo recuperar y complementar la información que se perdió en la toma de datos, teniendo en cuenta que se puede utilizar la información de intensidades que toma el escáner para este re mapeo.

### 3.1 Construcción de la malla base, identificando la máxima resolución

En la construcción de la malla base del escáner RIEGL z420i se encontraron dos tipos de errores, el del instrumento de 10 mm<sup>48</sup> y el de la unión de las mallas que gracias a la reducción del traslape entre mallas se redujo al mínimo con máximas entre 0.004007 y -0.0004001 al comparar las diferentes nubes de puntos entre posiciones.

Igualmente se compararon dos posiciones adyacentes mallándolas cada una por separado, obteniendo una media de 0,00367, una desviación estándar de 0,00917 entre la posiciones en mallas con 2354990 polígonos posición 13 y 2173781 polígonos posición 14 del día 27/08/2008.

El ruido, la precisión métrica, la precisión angular, la resolución, el efecto de los bordes, la influencia de las superficies reflectantes, las condiciones ambientales, del RIEGL z420i, se a analizado en diversos artículos, como con Wolfgang Boehler, al comparar diversos escáneres<sup>49</sup>, determinando las ventajas y desventajas de cada uno.

Para comparar que tanto afecta este error en los modelos escaneados, previamente anunciados, se confrontaron dos tipos de nubes de puntos base, la primera reduciendo el error de la nube<sup>50</sup> y el segundo sin alterarla para ser reducido en etapas posteriores del trabajo. Las mallas producidas por estas nubes se compararon y también se compararon las nubes utilizadas, teniendo en cuenta la superficie del objeto escaneado y la interpretación de su detalle.

**Nube de puntos filtrada:** se seleccionaron los puntos interpretados como error del instrumento, ya que estaban aislados y no correspondían con el promedio de la superficie del modelo, como un proceso de limpieza común en la manipulación de nubes de puntos<sup>51</sup>, aplicando el filtro de selección con una sensibilidad de 70, seleccionando 89423 puntos de 2754560 puntos (3,2%), los cuales se borraron.

La malla de la nube de puntos filtrada se construyo con una resolución de 1 vértice cada centímetro, después de probar con varias resoluciones y conociendo que el error del instrumento es de 10mm. No se generaron malla de menor

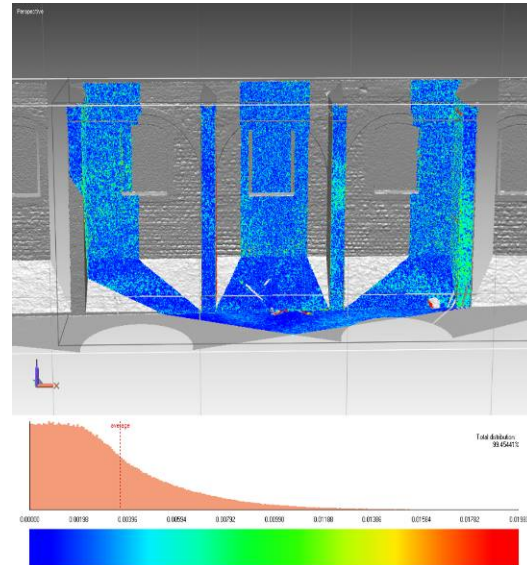
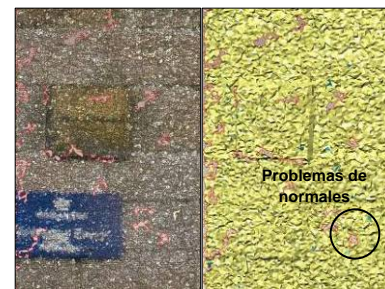


Figura 3.7: Error en la unión de posiciones de escaneo.



Malla generada sin ningún filtro de la nube filtrada resolución de 0,01m entre vértices.

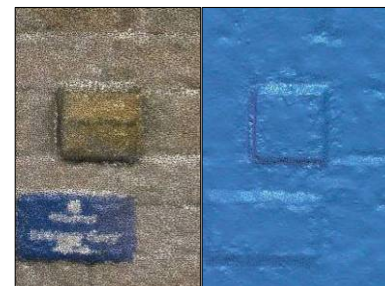


Figura 3.8: Malla con un suavizado mínimo de la nube filtrada y resolución de 0,01m entre vértices.

<sup>48</sup> <http://www.riegl.com/products/terrestrial-scanning/produktdetail/product/scanner/4/>

<sup>49</sup> BOEHLER, Wolfgang, Investigating Laser Scanner Accuracy, i3mainz, Institute for Spatial Information and Surveying Technology, FH Mainz, University of Applied Sciences, Mainz, Germany

<sup>50</sup> Ravi Kolluri, Spectral Surface Reconstruction from Noisy Point Clouds, Computer Science Division University of California, Berkeley, California

<sup>51</sup> KAMBEROV, George, Geometric Integrability and Consistency of 3D Point Clouds, Stevens Institute of Technology Hoboken, 2007,

resolución por la cantidad de huecos que producían y porque al tapparlos la malla pierde calidad y al ser tantos se considero imposible tapparlos correctamente deformando la superficie de la malla. Por otra parte se utilizo un filtro de la nube de puntos mínimo, que solo afecto los puntos aislados lejanos al promedio de la superficie, con ello se redujo aun más el numero de huecos de la superficie a unos 320, a un centímetro y con un filtro mínimo, mostrando una diferencia de solo 200 polígonos un ejemplo de malla de una resolución de 0.05m contra la malla de 0.1m.

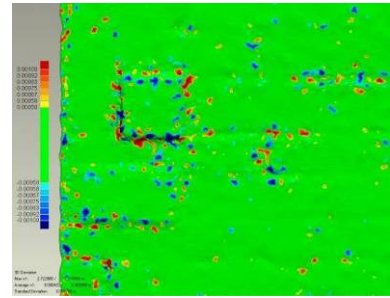


Figura 3.9: Comparación de mallas sin filtrar y filtrada en su construcción inicial.

Se genero una malla de 3'967.846 polígonos desde la nube de puntos filtrada.

Las mallas generadas necesitaron un proceso de corrección en polígonos deteriorados o construidos con errores, estas correcciones son:

- Intercepción de polígonos
- Polígonos con ángulos fuera del promedio que sobresalen en la superficie, dificultando la selección por curvatura.
- Normales invertidas
- Polígonos incorrectamente unidos "Non-Manifold", que impiden cerrar correctamente los huecos.
- Polígonos sueltos, no conectados a la superficie, los cuales si tienen importancia hay que unirlos a la malla para no perderlos al abrir la malla.
- Caras cóncavas
- Caras con huecos
- Nonmanifold Geometria y normales

Al aplicar un suavizado a la malla se logra la continuidad de esta, reduciendo los puntos con ruido excesivo, los cuales generan huecos en la malla, pero al ser un promedio de los puntos, las zonas con poca información se suavizan, como por ejemplo con los ladrillos, los cuales pierden las esquinas ya que no tienen información suficiente para determinar un ángulo tan pequeño y pronunciado, el cual se confunde con el ruido del instrumento figura 42. También podemos notar al comparar las dos mallas que las zonas con huecos alrededor de ellos se encuentra una diferencia considerable, pero muy puntual.

Las zonas con ruido en ambas direcciones producen problemas con las normales, sobre todo si hay huecos en la malla.

Nube de puntos filtrada vs malla (filtrada en el proceso de construcción):

Media: 0.000015

Desviación estándar 0,001919

Se testaron 1603464 puntos, de los cuales el 63% 1024589 están dentro de  $\pm(1 \cdot \text{desviación estándar})$  el 97% está dentro de  $\pm(2 \cdot \text{desviación estándar})$

Nube de puntos sin filtrar vs malla:

Media: 0.000011

Desviación estándar 0.001923

Se testaron 1641219 puntos, de los cuales el 64% 1047458 están dentro de  $\pm(1 \cdot \text{desviación estándar})$  el 98% está dentro de  $\pm(2 \cdot \text{desviación estándar})$

#### **Nube de puntos filtrada vs malla, reducido el ruido, malla homogénea:**

Al tener una lectura limitada la malla que resulto de la nube de puntos filtrada, se procedió a corregirla, limpiando las irregularidades de la superficie, con procesos de reducción de ruido, con y sin suavizado, obteniendo mallas con un detalle que corresponde a la realidad, pero suavizando todos los contornos y reduciendo el detalle de la mallas.

Posteriormente se homogenizó el tamaño de los polígonos, ya que por problemas de ocultaciones no tiene la misma resolución en cuanto al tamaño de los polígonos, por ello se seleccionaron los polígonos que tenían aristas menores de 2 mm, las cuales fueron decimadas mediante la tolerancia por tamaño, siendo el tamaño mínimo para polígonos de 2 mm.

Cada filtro y reducción aplicada altera la malla base y con ello el detalle, pero se han realizado para comparar la pérdida de detalle de la malla, en procesos comunes de corrección de mallas libres.

Nube de puntos sin filtrar vs malla filtrada, reducido el ruido (procesos de limpieza de la malla con suavizado):

Media 0.000037

Desviación estándar 0.002147

Se testaron 1418732 puntos, de los cuales el 60% 856789 están dentro de  $\pm(1*$ desviación estándar) el 100% está dentro de  $\pm(2*$ desviación estándar)

Nube de puntos sin filtrar vs malla filtrada, reducido el ruido, malla homogénea:

Media 0.000037

Desviación estándar 0.002147

Se testaron 1417423 puntos, de los cuales el 60% 856113 están dentro de  $\pm(1*$ desviación estándar) el 100% está dentro de  $\pm(2*$ desviación estándar)

Nube de puntos sin filtrar vs malla filtrada, reducido el ruido (procesos de limpieza de la malla sin suavizado):

Media 0.000011

Desviación estándar 0.001923

Se testaron 1646855 puntos, de los cuales el 64% 1051094 están dentro de  $\pm(1*$ desviación estándar) el 98% está dentro de  $\pm(2*$ desviación estándar)

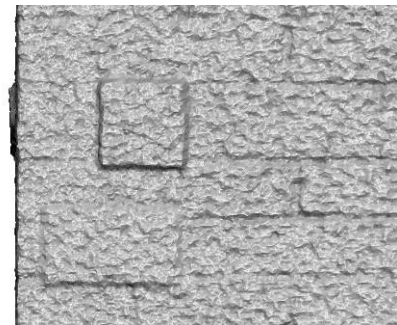


Figura 3.10: Malla de la nube de puntos sin filtros.

**Nube de puntos sin filtros:** La malla generada de esta nube permitió una mayor resolución poligonal, ya que la mallarla con una resolución de 0,005m solo genero 250 huecos, aumentando al doble la resolución del modelo de la nubes de puntos filtrada, obteniendo con ello mucho más detalle, utilizando igualmente un filtro mínimo, para eliminar el ruido. Igualmente esta malla fue el resultado de mallar la nube de puntos a diferentes resoluciones para determinar la máxima resolución en relación a las irregularidades y los huecos de la malla. Logrando conseguir una malla con un buen detalle de la superficie, en la que el ruido del instrumento no se puede aislar fácilmente de este detalle, generando una malla de 4'767.446 polígonos desde la nube de puntos sin filtrar.

Estas irregularidades (y huecos) tienen una lectura mucho más clara, ya que en su mayoría se ubicaron en las aristas de los volúmenes, en los bordes de los careles y en unas plantas adheridas en las fachadas, en otras palabras en lugares que había movimiento, también en lugares con problemas por superficies reflectantes y en las aristas de los contrafuertes.

Nube de puntos sin filtrar vs malla (filtrada proceso de construcción)

Media: 0.000027

Desviación estándar 0,002080

Se testaron 1525030 puntos, de los cuales el 61% 936576 están dentro de  $\pm(1*$ desviación estándar) el 100% está dentro de  $\pm(2*$ desviación estándar)



**Comparación entre mallas y nubes de puntos, identificando la pérdida de información en las distintas mallas base del Rigel:**

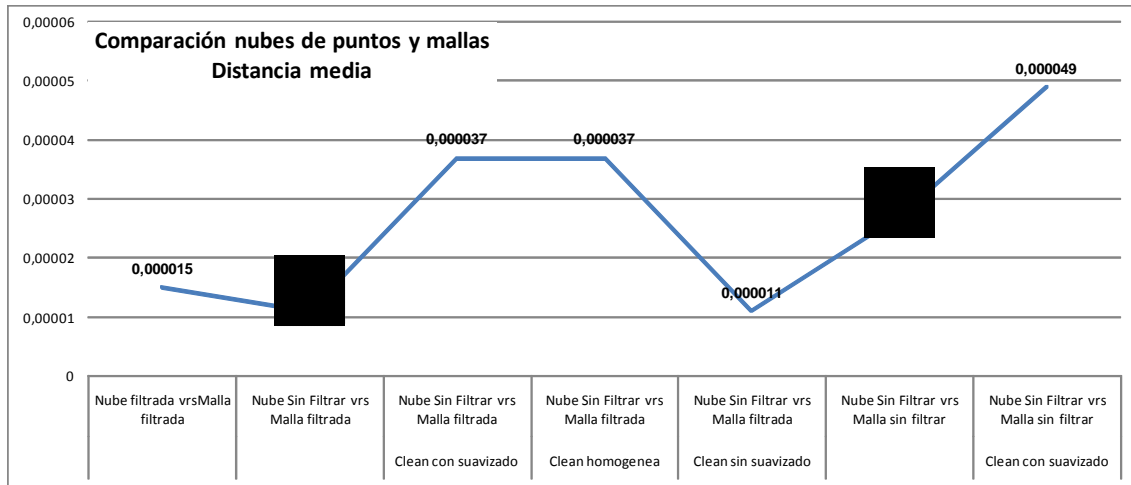


Figura 3.11: Media entre modelos y nubes de puntos

Con esta media podemos interpretar que la malla de la nube de puntos filtrada, esta más cerca al promedio de la nube de puntos sin filtro (0.00011) y la malla de la nube de puntos sin filtros se aleja de este promedio, al tener puntos que hacen que la malla se salga del promedio de la nube de puntos.

Malla de la nube de puntos filtrada vs malla de la nube de puntos sin filtros:

Media entre modelos 0,00153  
 Desviación estándar entre modelos 0,00299  
 Varianza tomando como base la malla sin filtros 0,00157  
 Desviación tomando como base la malla sin filtros 0,00351

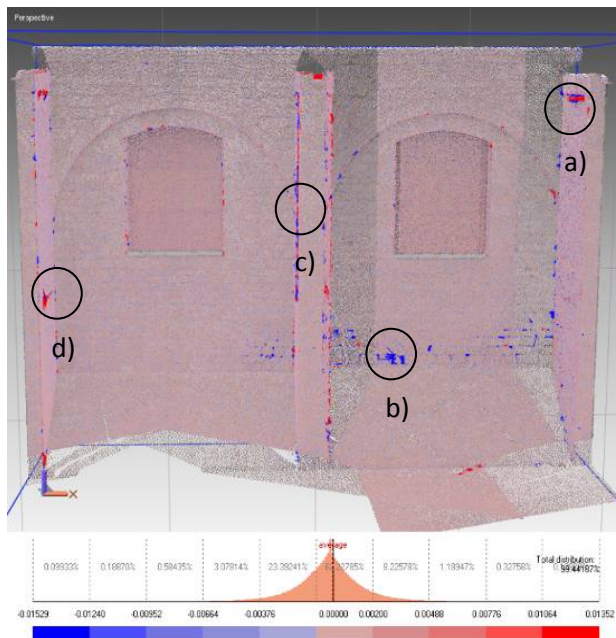


Figura 3.12: Comparación entre la malla de la nube de puntos sin filtrar y la malla de la nube de puntos filtrada. Mostrando errores en zonas con información deteriorada, como a) la influencia de las superficies reflectantes, b) perdida del detalle por la profundidad, al ser puntos aislados c) efecto de los bordes, d) objetos que se mueven.

Logrando ser mallados en la malla que parte de la nube de puntos sin filtrar porque en ella no se eliminan estos puntos aislados, en comparación de la malla de la nube filtrada que sufre una reducción del detalle por causa de este filtro, que elimina los puntos que se pueden considerar un error de la toma de datos.

Malla de la nube de puntos con filtro ■  
 Malla de la nube de puntos sin filtro ■

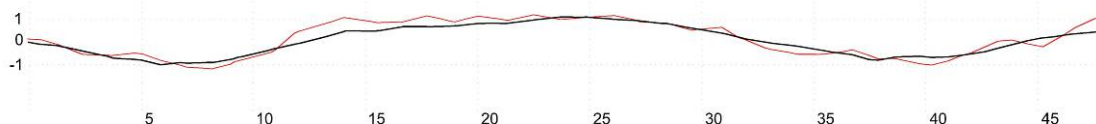


Figura 3.13: Sección del modelo de la malla de la nube de puntos con filtro y sin filtro en cm.

Como conclusión de este análisis se entiende que las mallas generadas a partir de la nube de puntos con o sin filtro tienen un error propio del límite de resolución y precisión del instrumento con el que se tomaron (Riegl z420i). Por lo cual son válidas desde el punto de vista métrico, por ello se realizó una comparación cualitativa y comparativa entre estas mallas (tabla 5), determinando que la malla de la nube de puntos sin filtros es la más adecuada para los análisis posteriores, ya que tiene mayor resolución y una mejor identificación de los detalles, los cuales serán analizados en etapas posteriores en cuanto a la corrección del ruido de la malla desde los mapas de desplazamiento.

	<b>Malla de la nube de puntos sin filtro</b>	<b>Malla de la nube de puntos con filtro</b>
<b>Cuantitativo</b>	<b>Mayor resolución Poligonal 4'767.446</b>	(3'967.846 polígonos)
	<b>Menor distancia entre vértices en la construcción de la malla 5mm</b>	(10mm distancia entre vértices)
	(Distancia media 0,027mm)	<b>Menor distancia media contra la nube de puntos 0,011mm</b>
	(Desviación estándar 2mm)	<b>Menor desviación estándar con la nube de puntos sin filtrares de 1,9mm</b>
	<b>Menos huecos a una mayor resolución. Se modifica menos la malla al corregirla</b>	
<b>Cualitativo</b>	<b>Mejor lectura del detalle</b>	
	<b>El ruido se integra con el detalle de la malla. No es visible.</b>	(tessellated mesh, precisa de limpieza)
	<b>No necesita una limpieza de toda la malla, solo en zonas específicas como las planas</b>	(Al limpiar la malla se reduce el detalle suavizando la malla)
	<b>Mayor detalle en las concavidades</b>	(Al reducir puntos aislados se reduce el detalle de las concavidades)
		<b>Se puede igualar el tamaño de los polígonos, al precisar limpieza (suavizado)</b>
	<b>Son menores los problemas de las normales</b>	

Tabla 5: Comparación entre las mallas de la nube con y sin filtro. Justificando el utilizar la malla de la nube sin filtro como punto de partida de la reducción de mallas.

## Konica Minolta Vivid 910

Al comenzar a trabajar con el detalle de la resolución del Riegl, se hizo muy notorio el error del instrumento y la limitante de la resolución en cuanto al número de puntos base, por ello se investigó sobre la resolución de un escáner de triangulación del cual podemos sacar más información como mapas de desplazamiento.

Al comenzar a trabajar a esta escala encantamos el error del instrumento al estar en los límites de escaneado, llegando a usar el lente Tele con un área de 16x21cm y trabajando sobre una parte de esta de unos 3x3cm. Este error se puede analizar desde los dos tipos de archivos que genera el instrumento, el primero el CDM que es la información sin filtrar, ya que al ser un instrumento con un zoom tan alto, un error de lectura puede producir cambios significativos en la malla y el otro archivos un VVD que tiene en promedio un poco menos de la mitad de información que el CDM, pero generando una malla de celdas más continuas.

El pazo de celdas a una malla regular es un proceso automático, en el cual no se aplica ningún filtro. Pero al analizar un segmento con una aproximación muy alta de una malla de apenas 3x3cm con 34.956 polígonos, vemos un ruido que nos impide ver la textura del material (figura 3.16 superior). Por ello aplicar filtros a la malla del minolta a esta resolución permite promediar los puntos que sobresalen de la malla, logrando recuperar un detalle que no es visible si estos filtros. Trabajar a esta escala nos permite afirmar que las superficies que en centímetros son planas pueden no serlo en milímetros, ya que tiene una textura que es medible e identificable a través de los instrumentos de medición utilizados. Esta visibilidad es dificultada por pocos puntos, en relación a la totalidad del modelo, como lo vemos en la imagen inferior de la figura 3.16, al comparar la malla sin ningún filtro y la malla con un filtro de forma, que corrige los puntos que están muy lejos del promedio de la superficie.

Comparación entre cells VVD vs CDM:

Media: -0.002625

Desviación estándar 0,141457

Se testaron 302094 puntos, de los cuales el 82% 250292 están dentro de  $\pm(1*\text{desviación estándar})$  el 95% esta dentro de  $\pm(2*\text{desviación estándar})$

En la figura 49 comparación entre VVD y CDM se muestra como en zonas con poca resolución por el ángulo, el instrumento las interpreta como ruido y las filtra e el VVD, con errores que van de los 1,67 mm a los -2.52mm.

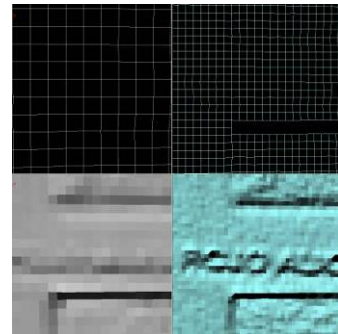


Figura 3.14: Izquierda VVD celda de 0,895mm y derecha celda de 0,448mm CDM

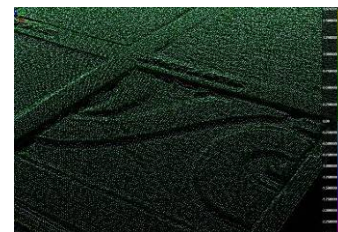


Figura 3.15: Comparación entre VVD vs CDM como puntos

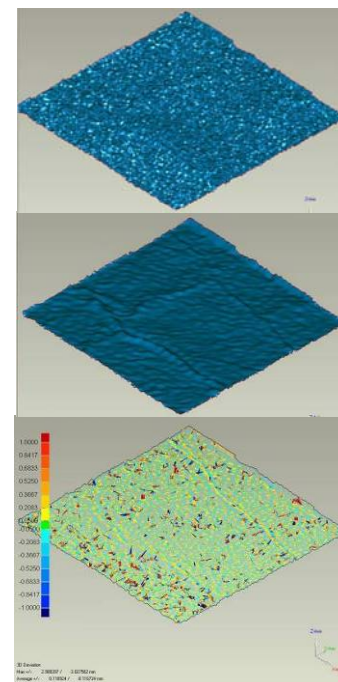


Figura 3.16: Comparación de la malla limpia y la malla original 34.956 polígonos

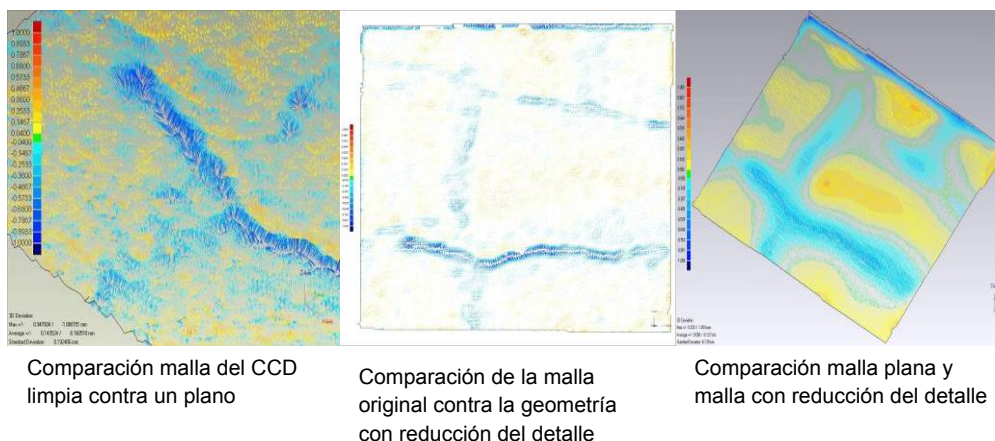


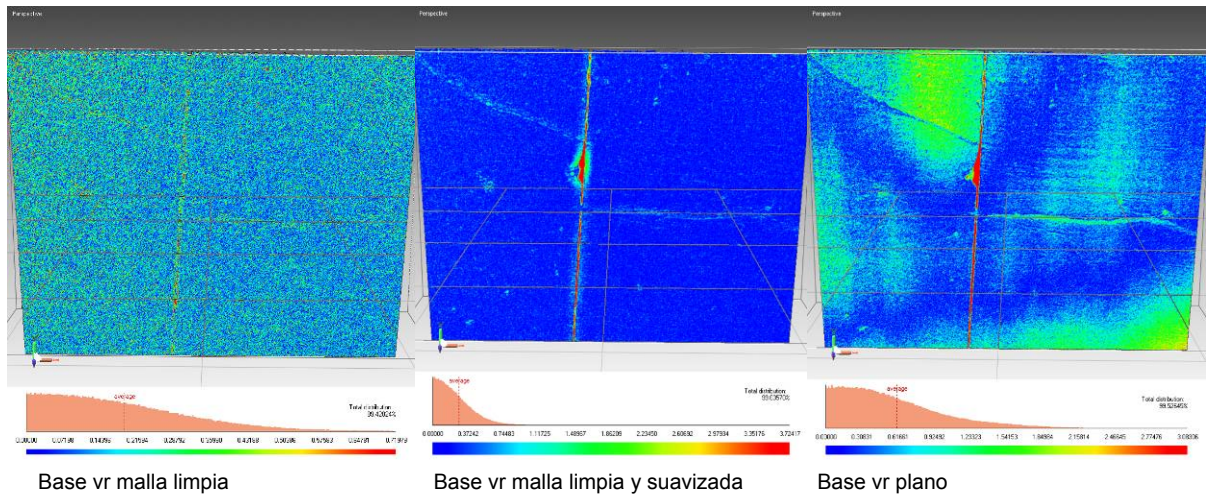
Figura 3.17: Comparación del CCD contra mallas sin detalle.

Comaparaciones CCD Material Perlato	Base vr Clean	Base vr Clear y Suavizado	Base vr Plana
<b>Desviación del modelo</b>			
Núm. Vértices efectivos	35625	35614	35588
Distancia mínima	0	0	0
Distancia máxima	0,74864	1,07809	1,02738
Distancia media	0,11161	0,11519	0,14438
Desviación estándar	0,08586	0,1245	0,1335
<b>Desviación malla/malla</b>			
Distancia mínima	-0,69075	-1,07809	-0,6044
Distancia máxima	0,74864	0,82361	1,02738
Distancia media	0,00083	-0,021	-0,00417
Desviación estándar	0,15137	0,17287	0,20026

Tabla 6: Comparación de la malla CCD materiales con la malla limpia, suavizada y plana.

En esta comparación se entiende el ruido del instrumento y como actúan los procesos de limpieza, que promedian los vértices, re alineando los que están fuera del promedio de la superficie, en relación a los vértices próximos, permitiendo una lectura del relieve más relevante de la superficie, entendiendo que este entra en un margen de error del instrumento al trabajar a escalas menores del milímetro y por el efecto que produce en la toma de datos el cambio de color, ya que al ser un escáner de luz el color afecta la métrica.

El mismo proceso se realizo para el escáner del parking, siendo importante su comparación al trabajar con otro lente y a otra escala de trabajo de milímetros, disminuyendo el error visible por el ruido del instrumento, trabajando con posiciones de 60 x 60 cm. Sobre este modelo es notorio el hecho de que las superficies raramente son totalmente planas y este termino de plano va relacionado a la escala en que se trabaje, ya que en centímetros una superficie puede ser plana, pero en milímetros puede tener tantas irregularidades que una malla reducida debería promediar la superficie, para identificar el detalle a esa escala.



Base vr malla limpia Base vr malla limpia y suavizada  
 Figura 3.18: Comparaciones Shell/Shell, representadas con mapa temático

Comparaciones CCD Parking	Base vr Clean	Base vr Clear y Suavizado	Base vr Plana
<b>Desviación del modelo</b>			
Núm. Vértices efectivos	585592	585582	585499
Distancia mínima	0	0	0
Distancia máxima	16,68612	17,09089	16,95829
Distancia media	0,19187	0,60646	0,275
Desviación estándar	0,16064	0,63094	0,44929
<b>Desviación malla/malla</b>			
Distancia mínima	-16,68612	-17,09089	-16,95829
Distancia máxima	1,63834	3,54627	2,83304
Distancia media	-0,00155	-0,01346	-0,02268
Desviación estándar	0,28148	0,93515	0,60767

Tabla 7: Comparación de la malla CCD parking con la malla limpia, suavizada y plana.

En esta malla entendemos que igual que con el material hay una limitante en la información base de la malla que parte de las celdas CDD y que la información VVD pierde resolución de la malla, por lo cual se limpia la malla base logrando rescatar el detalle de la grieta de la superficie de la malla, siendo más significativo que con la comparación del material porque en ella no influye el factor de color del objeto escaneado. También se comprueba que la superficie no es plana al nivel milimétrico, lo cual nos dificulta ver el detalle en un mapa temático, lo cual se realizó mediante la comparación de una superficie sin detalle y la de detalle, identificando solo las grietas.

### 3.2 Reducción del detalle de la malla como punto de comparación

Uno de los principales enfoques de la tesis es lograr generar una malla que recoja la información volumétrica de la superficie y separe el detalle mediante mapas de desplazamiento. Por lo cual se estudio una metodología que permitiera identificar la diferencia de estas dos informaciones, al comienzo con mallas del mismo nivel poligonal y a continuación mallas simplificadas.

Entendiendo las diferentes escalas que intervienen en un estudio de un edificio patrimonial. Uno a nivel arquitectónico de edificio con los elementos que lo constituyen y otro a nivel arqueológico, donde el detalle de la superficie adquiere mayor interés. Por ello se realizaron diferentes operaciones de filtrado de la malla, teniendo en cuenta de no mover los vértices de esta en mas de dos centímetros, aplicando las operaciones que promediaran el detalle de la superficie.

Para analizar este detalle se utilizo una malla de 23m<sup>2</sup>, la cual al no tener esquinas permitió estudiar el desplazamiento de los vértices deforma controlada.

Por cuestión de espacio, solo se muestran en el lateral las comparaciones más significativas, siendo analizadas cuantitativamente a continuación en la explicación de las operaciones utilizadas. La primera imagen es la base comparada con un plano, posteriormente la malla que mejor promedio la superficie, siendo resultado de operaciones de corrección de la malla y de suavizado de la misma, por ultimo la comparación de estas dos mallas mostrando la deformación de la fachada sin el detalle de la superficie. En la siguientes dos hojas se aplico el mismo análisis, sobre mallas del escáner Konica Minolta y se colocaron las imágenes más representativas, identificando un detalle más preciso.

El primer paso fue comparar cualitativamente las mallas con igual resolución poligonal, buscando cuales de ellas permitían ver el detalle de la textura al compararlas con las mallas originales. Posteriormente se compararon cuantitativamente, tanto en la distribución de la desviación entre modelos, al igual que la distribución estándar y varianza como promedio de los dos modelos y como promedio usando la malla base como la referencia para el cálculo de las desviaciones.

Las operaciones que se compararon son:

- Operaciones de corrección de la malla según su forma vs malla base: Estos proceso de corrección de la malla se basa en la identificación de la geometría del objeto y con ello la reducción del ruido de vértices que están alejados del promedio de la superficie. Con ello se logra en la escala del Riegel el mantener mallas más homogéneas eliminando picos que no encajen en el promedio de la superficie, causados por el ruido o por esquinas con poca información como la de los ladrillos, las cuales serán redondeadas. En la escala del Konica minolta permite limpiar los errores de la superficie, haciendo visibles los rasgos más importantes de la porosidad del elemento.

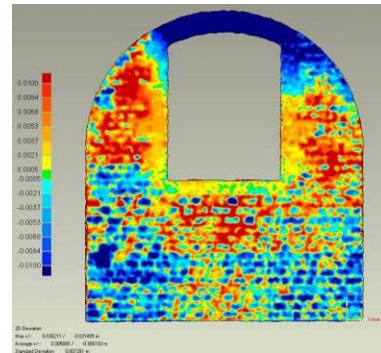


Figura 3.19: Malla base comparada con un plano.

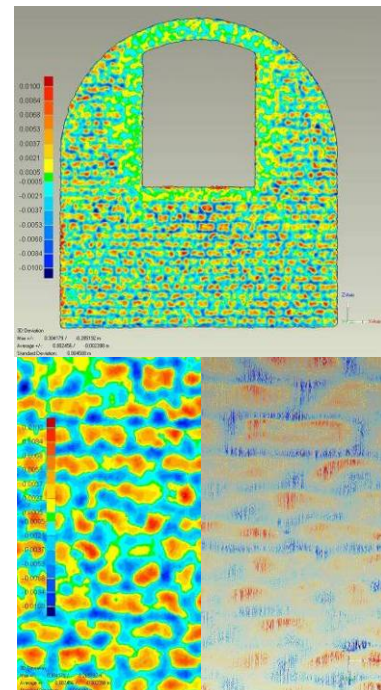


Figura 3.20: Suavizado de la superficie para reducir el detalle

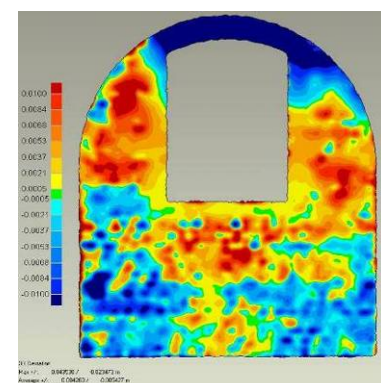


Figura 3.21: Comparación de la malla plana y la malla suavizada.

Estas operaciones no permiten promediar la superficie para reducir el detalle, pero se puede considerar un primer paso para hacer más efectivas las operaciones de suavizado al eliminar el ruido y picos de la malla.

- Operaciones de suavizado de la malla vs malla base: Las diversas operaciones de suavizado se basan en algoritmos que promedian los vértices de las superficies, lo cual nos permite homogenizar las diferencias de altura de los vértices según la normal.

En esta reducción se tiene en cuenta tanto el nivel de suavizado, como la prioridad de este sobre el promedio de la superficie, permitiendo medir el impacto sobre la malla con los mapas espectrales, que mapifican la modificación de la malla, permitiendo controlar la reducción del detalle inicial, que permite distinguir el detalle en el mapa, llegando en esta etapa inicial a obtener un máximo y mínimo crítico de 0,0424 y -0,0424 y un mínimo y máximo nominal de -0.00311 y 0,00311 respectivamente.

Se realizó este proceso para diferentes niveles de suavizado, llegando al máximo de reducción del detalle mediante análisis de curvatura del modelo, eliminando cualquier rastro de los elementos de la superficie de la malla.

- Reducción poligonal homogénea vs malla base: La reducción de la malla puede enfatizarse en conservar la distribución de los polígonos o mantener los rasgos de la superficie, siendo la posición de los vértices el promedio de la superficie.
- Reducción sobre zonas seleccionadas por curvatura vs malla base: Al reducir directamente zonas preseleccionadas por ángulos y tamaños específicos, permite eliminar polígonos de zonas detalladas como las grietas, facilitando el promedio posterior de la superficie, en la búsqueda de eliminar el detalle de la superficie.
- operación de corrección (según su forma) y suavizado de la malla vs malla base: se identifico cuanto afectaba y de qué forma lo hacían los diferentes procesos de limpieza de las mallas, que permiten una reducción del detalle de la malla en su proceso de limpieza, no solo borrando los vértices que estaban fuera del promedio de la superficie, sino que moviendo estos vértices para que correspondieran a la homogeneidad de la malla. Posterior a ello se aplico un filtro de suavizado teniendo en cuenta la reducción del detalle anteriormente aplicada.

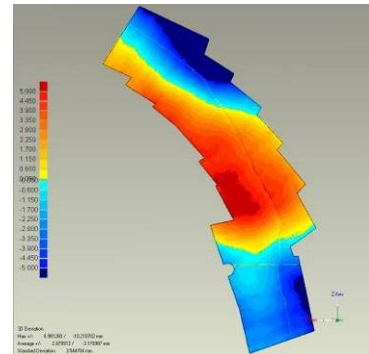


Figura 3.22: Comparación malla original limpia contra un plano

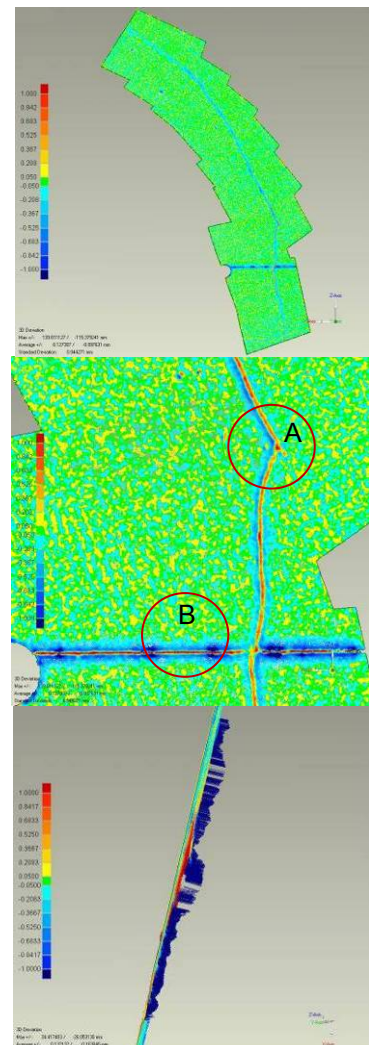


Figura 3.23: Comparación de la malla original contra la malla suavizada

- Superficies planas vs malla base: Desde el punto de vista teórico se ha planteado en diversas publicaciones<sup>52</sup> la simplificación de mallas de escáner laser mediante superficies planas, siendo una constante el problema de la intersección de los planos<sup>53</sup>, ya que las superficies en la realidad nunca son planas. Lo cual se comprobó al comparar tanto secciones de fachada como de suelos, siendo el detalle proporcional a la escala trabajada, ya que con el escáner minolta se llegó a escáner superficies de 3x3cm y el detalle llega al punto de la porosidad, logrando identificar que hasta esta superficie tiene pandeos en una escala de menos del milímetro.

Para generar estas mallas se proyectaron los vértices sobre un plano que estuviera en el centro promedio de la malla base.

Esta comparación llevo a la conclusión de que al proyectar sobre superficies planas, no se puede identificar de forma clara el detalle al compararla con la malla base, la textura de la superficie se confunde con la deformación esta. Pero si permite comprobar la deformación de la superficie en una escala mayor a nivel arquitectónico.

La malla que mejor aisló el detalle de la superficie en la comparación con la malla base es la operación de corrección (según su forma) y suavizado de la superficie, la cual se tomara como referencia, para determinar en los procesos de reducción de la malla cual es la que se acerca mas al promedio de la superficie, permitiendo la extracción de los mapas de desplazamiento y de mapas de normales de forma legible, permitiendo la lectura en dos dimensiones del detalle de la superficie.

Operaciones	Clean	Suavizado	Clean suavizado 1	Clean suavizado 2	Clean suav. maximo	Superficie plana	reducción decimación	Reducción Retopología
Número de caras	257341	292957	257341	255585	256301	292957	2929	1273
<b>Desviación del modelo</b>								
Núm. Vértices efectivos	272643	290390	272583	271572	271929	290324	146381	143518
Distancia máxima	0,12879	0,111	0,11153	0,11232	0,11152	0,11968	0,12069	0,11411
Distancia media	0,00119	0,0038	0,00389	0,00435	0,00449	0,00626	0,00403	0,0052
Desviación estándar	0,00106	0,00304	0,00313	0,00354	0,00364	0,0051	0,00332	0,00438
<b>Desviación malla/malla</b>								
Distancia mínima	-0,12879	-0,111	-0,11153	-0,10997	-0,11152	-0,11727	-0,12069	-0,11411
Distancia máxima	0,08451	0,10003	0,10026	0,10665	0,10862	0,11223	0,04618	0,12131
Distancia media	0	0,0001	0,00012	0,0003	0,00023	-0,00004	0,00016	-0,00038
Desviación estándar	0,0018	0,00508	0,00523	0,00584	0,00602	0,00821	0,00524	0,00683
<b>Curvatura Análisis</b>								
Máxima	1,85082	1,60801	1,46733	2,67323	2,73647	3,14159	1,74404	0,29631
Mínima	-1,59991	-1,7521	-1,55963	-3,13891	-3,13612	-3,14159	-2,60867	-0,09866
Desviación estándar	0,08373	0,03362	0,03668	0,04475	0,04451	0,05119	0,23943	0,02443

Tabla 9: Tabla comparativa entre la malla de la nube de puntos sin filtros y mallas suavizadas, superficie plana, malla decimada al 1% y retopología.

<sup>52</sup> David Belton, Curtin University of Technology Perth WA, Australia, 2006 George Vosselman Department of Geodesy, Delft University of Technology, The Netherlands, 2001  
Christian Briese, Christian Doppler Laboratory "Spatial Data from Laser Scanning and Remote Sensing", Vienna, Austria, 2008.

Tahir Rabbani, Section of Optical and Laser Remote Sensing, Netherlands , 2008

<sup>53</sup> Ioannis Stamos, Dept. of Computer Science, New York, 2002



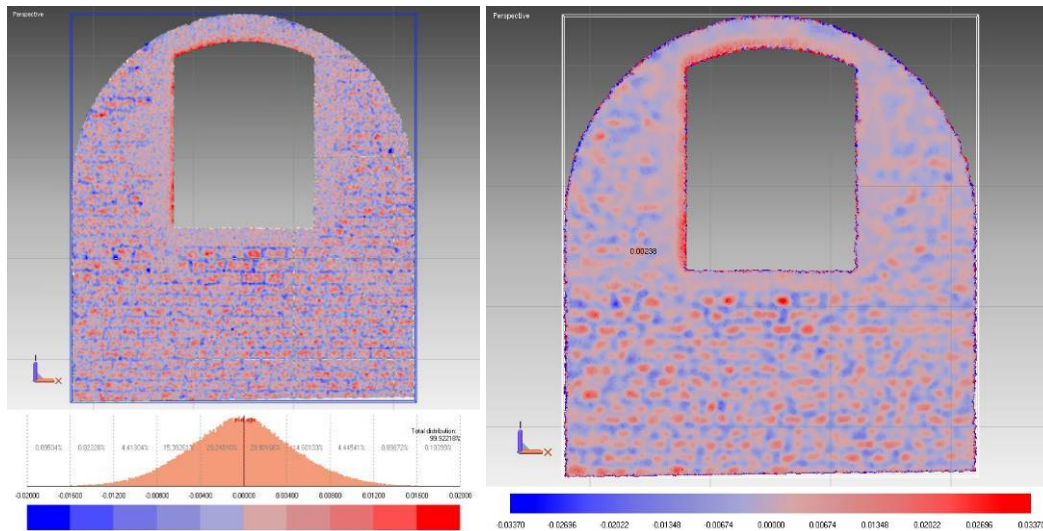


Figura 3.24: Malla Suavizada comparada con la malla base y análisis de curvatura.

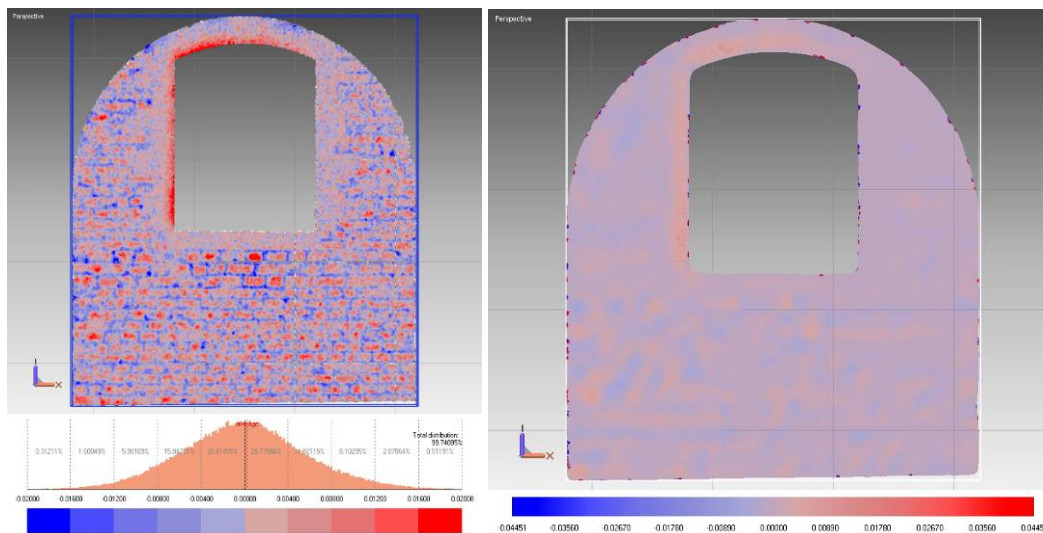


Figura 3.25: Malla Suavizada hasta eliminar los indicios de los ladrillos comparada con la malla base y análisis de curvatura.

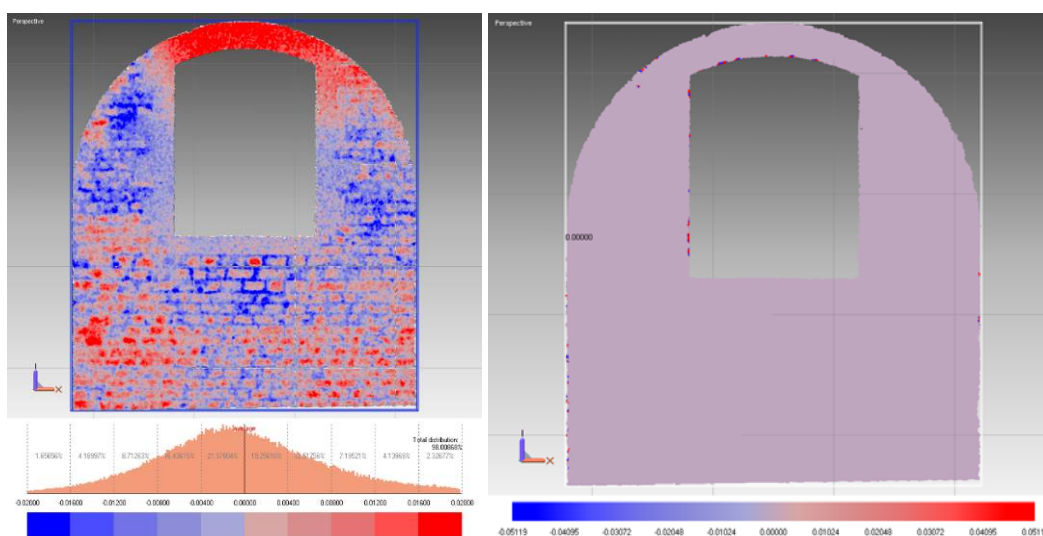


Figura 3.26: Malla plana con la malla base y análisis de curvatura.

Para continuar esta comparación pensando en la reducción de las mallas, se realizó una comparación entre este promedio de la superficie con los realizados por la reducción y reconstrucción de mallas, en este modelo ya que permite un mayor control al excluir del análisis las aristas del modelo, al ser las zonas donde se concentra la mayor pérdida de información, tanto de la reconstrucción de la malla porque se curvan y de reducción de la malla al promediarse las aristas.

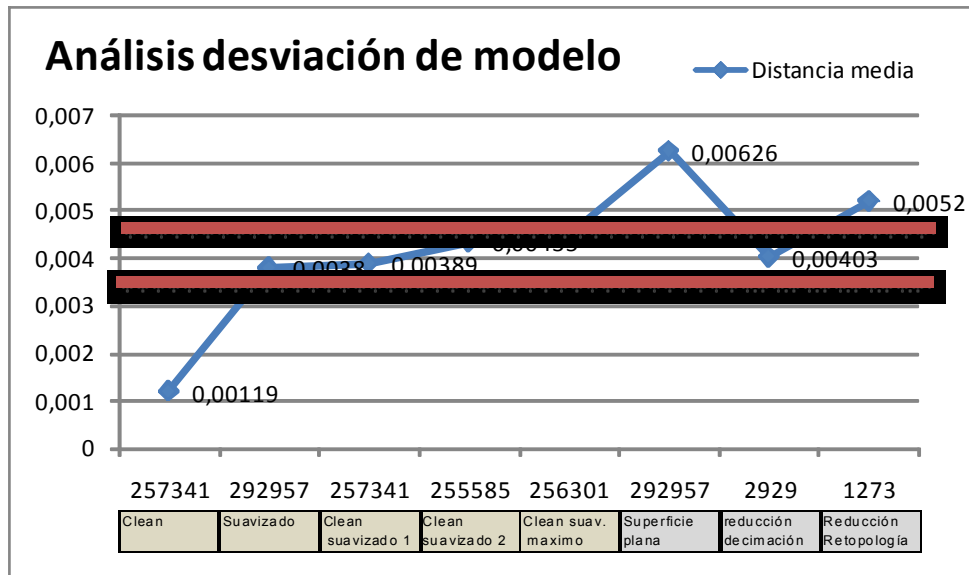


Figura 3.27: Media entre malla de la nube de puntos sin filtro contra mallas suavizadas, malla proyectada a un plano, malla decimada 1% y retopología.

Esta comparación entre las mallas nos permite ver la relación entre la aproximación del detalle de las mallas a la malla inicial, determinando el grado de pérdida de esta y manteniendo una relación que nos es útil en las comparaciones posteriores, ya que al detectar el máximo desplazamiento de los vértices para que la superficie pierda su detalle, encontramos el límite en que las mallas reducidas pueden moverse en relación a la pérdida de detalle, ya que si sobrepasa este límite la malla no solo está perdiendo un nivel de detalle, sino que está deformando el modelo, al salirse del promedio que determinaría la morfología del modelo. De igual forma si el modelo reducido está muy próximo a la malla base, significa que el detalle de la malla se ha preservado hasta cierto límite, lo cual plantea la limitante de la lectura de los mapas de desplazamiento, ya que al compararse estos modelos los detalles de cada uno se contrarrestan y el detalle del mapa de desplazamiento se ve alterado o reducido.

Por ello de la importancia de la homogeneidad de la malla, siendo considerada esta homogeneidad cuando los vértices de la malla siguen una dirección continua excluyendo las aristas del modelo, por ello de incluir el análisis por curvatura, que permite de forma visual el controlar en las zonas más o menos planas la continuidad de los planos, los cuales deben estar dentro de un rango de color, hasta el punto en que el detalle de la superficie se pierde. Se utiliza este tipo de representación porque visualmente esta inclinación o se puede ver directamente en el modelo y porque nos permite identificar las zonas con mayores o menores alteraciones en la dirección de la malla y la relación del tamaño de los polígonos en una misma representación.

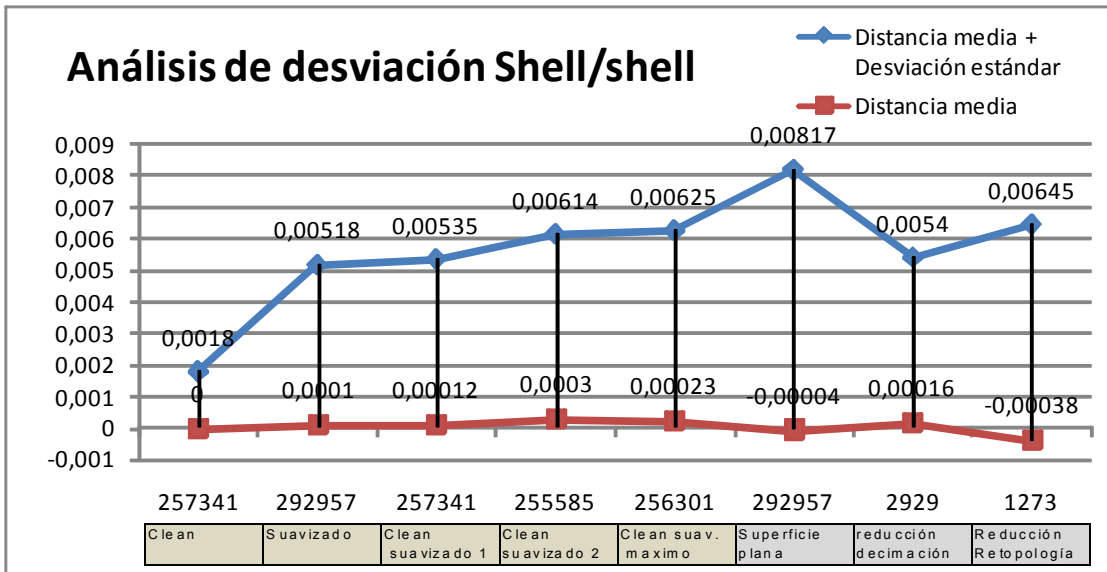


Figura 3.28: Análisis de desviación estándar malla contra malla (Shell/Shell) de los segmentos del modelo de Drassanes.

La desviación estándar al comparar los vertices de una malla con respecto a los vertices de otra nos permiten confirmar los rangos en los que se desplaza el error de las mallas, siendo menor en la limpia al tener una reducción mínima y por lo contrario la plana resulta excesiva, aunque este en el promedio exacto de los vertices de la malla.

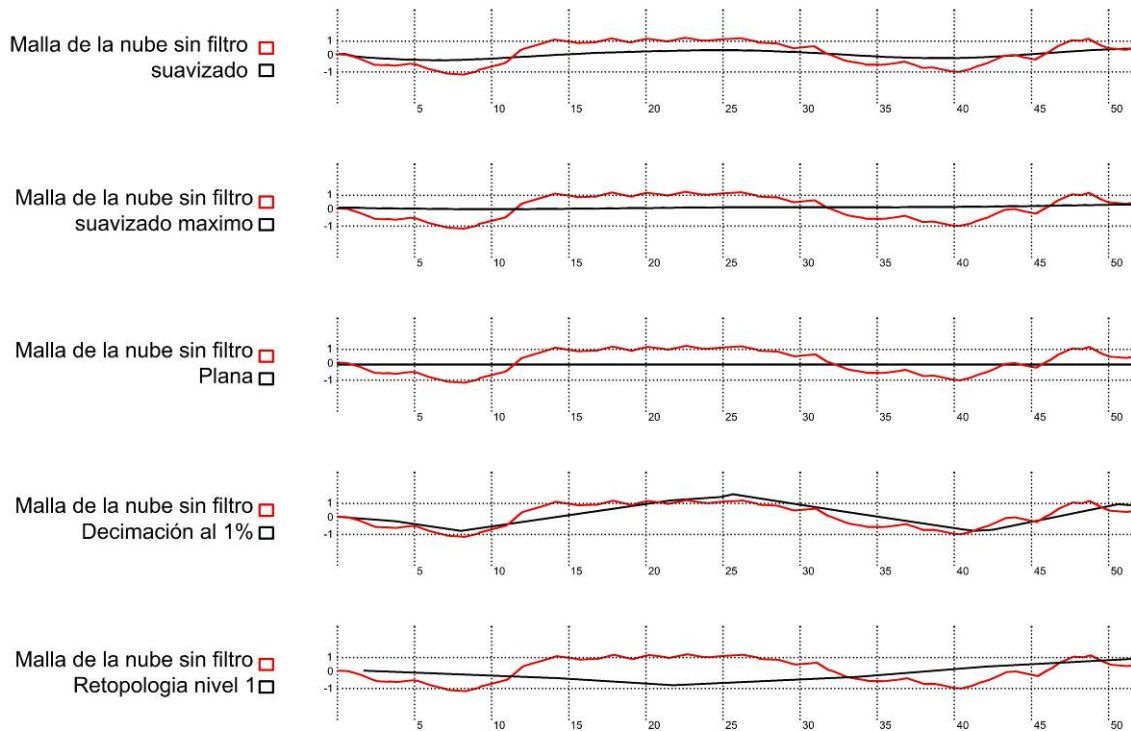


Figura 3.29: Secciones comparativas entre mallas de 0 a 50 cm.

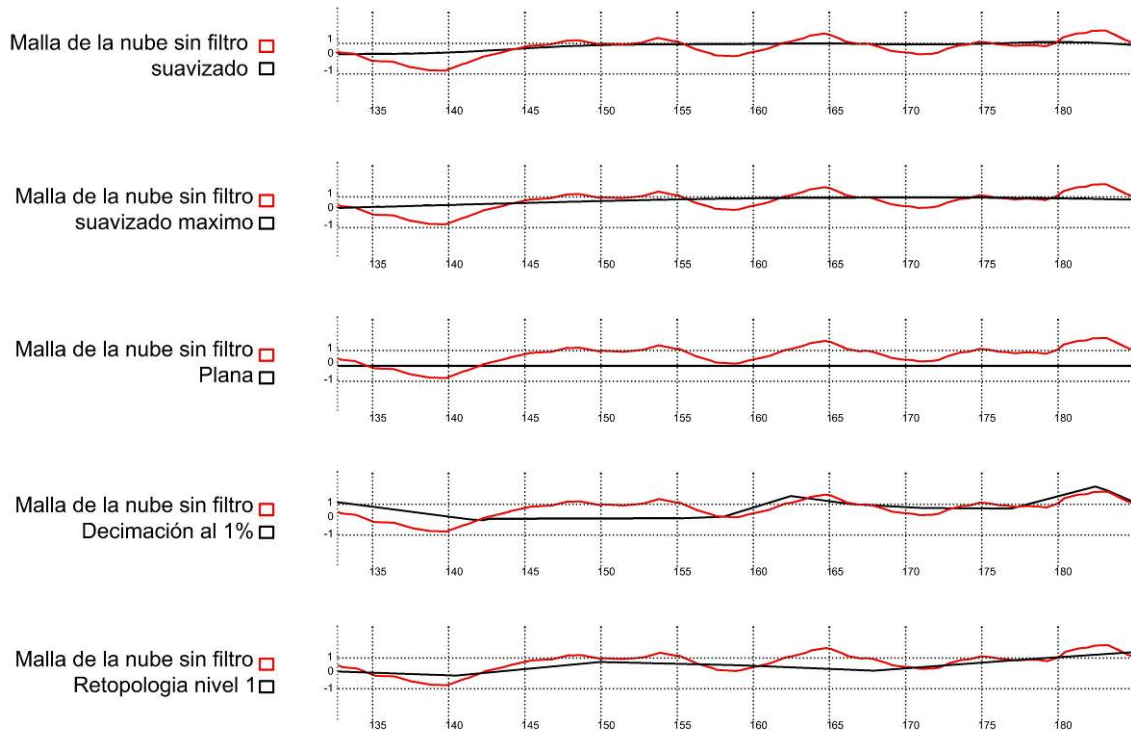


Figura 3.30: Secciones comparativas entre mallas de de 135 a 180 cm..

Estas secciones nos permiten comprobar varias cosas, la primera comprobar que la malla con el detalle reducido se encuentra en el promedio del detalle realizando un desplazamiento mínimo y al compararla con la plana esta esta en algunos segmentos tanto por encima como por debajo de los vertices, lo cual facilita un mayor desplazamiento, que se traduce en un mapa de desplazamiento con mayor resolución. También se destaca el suavizado base y el máximo suavizado es difícil determinar el grado de desplazamiento de forma visible, por ello de la importancia del análisis cuantitativo del promedio de las mallas y de su desplazamiento, al igual que el análisis de curvatura que nos permite determinar las direcciones de los polígonos en mallas complejas.

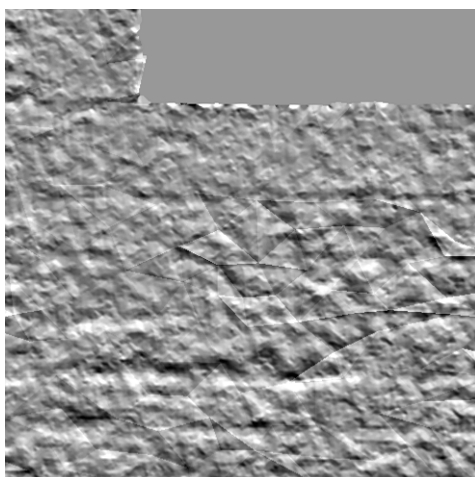


Figura 3.31: Mapa de normales en escala de grises entre un modelo decimado 1% y la malla sin filtros

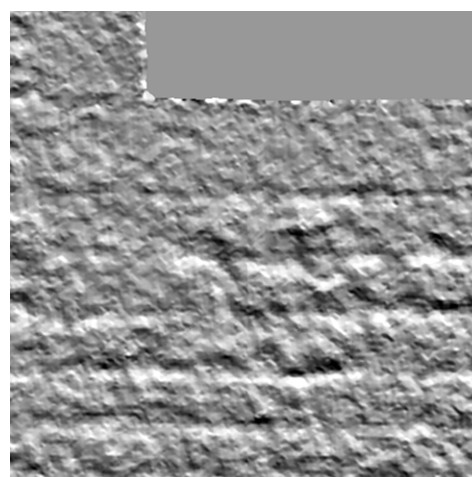


Figura 3.32: Mapa de normales en escala de grises entre un modelo de Retopología y la malla sin filtros

Por último pero no trascendental esta comparación de mapas de normales en escalas de grises contrastadas, nos demuestra que no en todas las zonas la retopología se puede considerar el

promedio de la superficie, ya que al estar relacionada con los niveles superiores de su múltiple resolución, depende de ellos para establecer la posición de sus vértices, ya que al generarse primero se subdivide la malla y después se proyecta sobre la malla de escaner láser y al restaurar los niveles de subdivisión de la malla estos se ubican en relación de los vértices que se eliminan para pasar de un nivel a otro y por ello de la importancia de asegurar las aristas del modelo subdividiéndola más que el resto de las zonas del modelo, ya que necesita más polígonos para tener mayor precisión.

Como conclusión de esta comparación de mallas se comparan los mapas de normales, siendo los más significativos en términos de comparación visual el que se compara la malla base con el modelo decimado 1% y la malla base contra el modelo de retopología nivel 1 de subdivisión. En ellos podemos distinguir cómo se deteriora la información del desplazamiento cuando las dos mallas tienen un cierto nivel de detalle en la de Decimación y como el de retopología al no estar sujeto a los vértices de la malla como la comparación permite identificar todos los detalles de la malla base. Teniendo en cuenta lo explicado con las secciones, el mapa de desplazamiento de la retopología es medible pero solo entre puntos cercanos, ya que al no ser el promedio de la malla algunas zonas pueden estar más arriba o más debajo de el lugar que le corresponderían en comparación con un mapa construido a partir de una mallas promedio perfectamente el detalle de la malla base, siendo esta diferencia en milímetros dentro del rango del error de precisión del instrumento.

#### 4 ESTRUCTURA DE LAS MALLAS REDUCIDAS Y SU RELACIÓN CON EL DESPLAZAMIENTO

Como paso posterior al proceso de mallado e identificación del detalle y reducción de este como punto de comparación, se procedió a confrontar diferentes modelos y metodologías de simplificación de mallas, enfocados en la extracción de los mapas de desplazamiento.

Las mallas trabajadas se tomaron en relación a la posibilidad de promediar el detalle de la superficie, las técnicas de reducción poligonal y las necesidades de uso de la tecnología de laser escáner terrestre. Dividiéndolas en dos grupos, uno de reducción de mallas y otro de reconstrucción de la malla a partiendo de una malla de alta resolución poligonal. Las de reducción son: reducción teniendo en cuenta la curvatura, selección y reducción poligonal por zonas y la clasificación de la nube de puntos, para posteriormente ser mallada y unidos los planos clasificados. Las mallas de reconstrucción son dos también las de procesos semiautomáticos Surface Phase compuesto por Shape Phase y Fasion Phase y la retopología como técnica de modelado.

**Reducción poligonal por curvatura** se base en la selección y decimación selectiva. La decimación poligonal surge de la necesidad de reducir la resolución de los modelos de laser escáner sin afectar su precisión, siendo un campo específico de estudio de la ingeniería inversa, en el que se han llegando a avances importantes. Este proceso es principalmente utilizado en la reproducción de piezas escultóricas o arqueológicas<sup>54</sup>, las cuales por su naturaleza orgánica precisan de la tecnología de escáner laser para el modelado con precisión, siendo para ello imprescindible la reducción poligonal para hacerlos manipulables. Por ello de la importancia de estudiar este proceso de reducción en la extracción de mapas de desplazamiento logrando promediar el detalle de la superficie, con una resolución poligonal que no se aleje del modelo de alta resolución.

**La clasificación** de la nube de puntos se utiliza para la identificación de objetos, en busca de la identificación automática de objetos complejos<sup>55</sup>, siendo hasta ahora posible con precisión obtener formas primarias, útiles en la identificación de tuberías en instalaciones industriales. Por otra parte esta clasificación permite manipular la nube de puntos por elementos aislados<sup>56</sup>, permitiendo manipularlos independientemente del resto de información de la toma de datos, dándonos una herramienta para promediar el detalle según la orientación del segmento analizado.

**La reconstrucción semiautomática** actualmente esta relacionada a procesos industriales, dada la necesidad que estos tiene de digitalizar objetos para mejorarlos técnicamente, por lo cual es imprescindible el reconocimiento geométrico<sup>57</sup> (formas primarias, extruidas, rotacionales y libres) y la precisión, generando modelos fácilmente editables, en cuanto a parámetros de diseño y fabricación (parametrización del modelado). Por ejemplo una pieza escaneada con partes repetitivas y a una distancia homogénea una de otra, se manipula mejor con controles paramétricos, para poder realinear estas partes de forma milimétrica, permitiendo la corrección o mejora de los modelos originales. Por otra parte el reconocimiento de formas geométricas como estrategia para promediar el detalle de la superficie, es fundamental en esta investigación, en relación a los mapas de desplazamiento, en busca de la lectura de los mapas.

---

<sup>54</sup> Paolo Cignoni, Visual Computing Lab, Pisa, Italy

<sup>55</sup> PU, Shi, International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation (ITC), Netherlands 2006

<sup>56</sup> David Belton, Curtin University of Technology Perth WA, Australia, 2006

<sup>57</sup> Tahir Rabbani, Section of Optical and Laser Remote Sensing, Netherlands , 2008

**La retopología** es una herramienta de modelado, que permite la reorganización de los vértices de una modelo previamente modelado (en nuestro caso un modelo de alta resolución de escáner laser), al situar puntos en cierto orden sobre la malla, construyendo una nueva malla. Actualmente se ha utilizado esta técnica con la información de escáner laser para crear mallas sobre mallas de escáner laser con huecos o errores de normales de piezas escultóricas. Ha esta técnica le agregamos la técnica de el “adaptive Skin”, la subdivide la malla y la proyecta sobre la malla de escáner laser, permitiendo adaptar la malla de retopología al modelo de alta resolución igualando su nivel de detalle, manteniendo los niveles inferiores como malla de múltiples niveles de resolución poligonal.

Para este análisis de comparación entre mallas es fundamental para este análisis determinar los alcances de estas mallas en cuanto a la relación con los mapas de desplazamiento, entendiéndola como la posibilidad de cada malla para desdoblar correctamente el mapa de UV, cambiando ente mallas dependiendo su tipología. Identificando los límites de la extracción del detalle del modelo base y del simplificado en cuanto a resolución, tamaño y la lectura de los mapas, buscando un despiece que permita la lectura de fachadas, secciones y planta, llegando a la interpretación arquitectónica de la información extraída y al mismo tiempo comprimiendo esta información mediante una correcta distribución para no generar un sobredimensionamiento de los mapas.

Complementaria a la identificación de la estructura o configuración de las mallas y de los mapas de desplazamiento y las UV, se procede a analizar cuantitativamente las mallas entre si, mediante dos tipos de análisis el primero la desviación del modelo, comparando cada malla con la malla base como si fueran una solo, permitiéndonos encontrar una distancia media significativa en cuanto a la distancia promedio entre los vértices de las dos mallas. Posteriormente se realizo un análisis Shell/Shell<sup>58</sup>, que consiste en comparar una malla con respecto a la otra, este análisis parte de tomar la malla generada con la nube de puntos sin filtro como base de comparación. El área de las mallas trabajadas es de 563 m2, pero por limitantes en la etapa de comparación, por el número de polígonos utilizado, se tomo un área de 220 para los análisis de todas las mallas, las cuales fueron recortadas en la parte frontal de los contrafuertes.

Posteriormente a esta comparación cuantitativa y cualitativa por tipología de malla, se establece una metodología como conclusión de cada proceso de mallado, en busca de un modelo que promedie el detalle y que tenga una resolución poligonal determinada. Complementario a ello se identifican las ventajas y desventajas de cada modelo y de su proceso, como base para la comparación de los modelos finales entre los cuatro procesos de mallado planteados, en cuanto al tiempo que se tarda el procesamiento de la información, la manipulación del modelo, los tamaños de los archivos, la calidad o detalle de la información, los errores que se generan tanto en los mapas como en las mallas, desviaciones entre los modelos y la comparación con el modelo de detalle suavizado.

El formato que se manejo para el intercambio de archivos de mallas es el OBJ, ya que es el más común en la mayoría de aplicaciones, siendo un formato que tiene la posición de cada vértice, la posición de la textura asociada a este, las normales de los vértices y las caras que generan los polígonos. Diferentes programas leen la información de los OBJ de formas diferentes, al punto de tener cuidado de importarlas con el plugin indicado y exportarlas relacionando la aplicación de entrada.

---

<sup>58</sup> SALEMI, G., High Resolution Morphometric Reconstruction Of Multimaterial Tiles Of An Ancient Mosaic, Laboratory of Surveying and Geomatics (LRG) Department of Architecture, Urban planning and Surveying (DAUR) Engineering Faculty, University of Padova, 2008

La extracción del color de los polígonos de la malla densa permite generar texturas que igualan la resolución de la nube de puntos con una pérdida de información del color proveniente de la nube de puntos hasta de un 5% ya que los puntos irregulares de la superficie no se pueden mellar. El proceso de extracción del color de la malla de alta resolución tiene en cuenta el tamaño de los mapas, y el télex extraído, por lo cual los modelos se realizan mediante mapas múltiples, los cuales dividen el modelo de mallas en la malla simplificada en grupos según el mapa, y mediante procesos me UV automáticos, que desperdician mucho espacio del mapa, por lo cual tienen que ser reestructurados, mediante la correcta distribución y estructura de los mapas de UV, los cuales permiten reunir hasta cuatro mapas generados de forma automática de un tamaño de 4096K en un único mapa de 2048, sin perder la resolución del modelo extraído.

#### 4.1 Reducción de mallas libres

##### 4.1.1 Reducción por curvatura y zonificación

La reducción poligonal se basa en los estudiados procesos de reducción de mallas mediante la: distribución, eliminación, fusión o agregación de vértices, explicados en el estado del arte (2.4 ingeniería inversa)

La reducción de esta malla partió de los procesos de corrección de mallas, los cuales reducen el detalle de vértices que se apartan del promedio de la superficie y de los que tiene errores de normales, sin llegar a eliminarlos por completo.

Teniendo una malla “limpia” se realizaron procesos de selección de polígonos, permitiendo reducir la malla selectivamente, en primer lugar de los polígonos menores de 0,03m de longitud, igualando la malla a las zonas de menor resolución poligonal, esta homogenización de la malla reduce a la mitad la malla inicial, por lo cual hay que controlar los detalles de los vértices, para no alterar la geometría, siendo necesaria la comparación con el modelo base. Este proceso se realiza por que al tener zonas con mayor densidad que otras el proceso de reducción de la malla no es homogéneo, las zonas de la malla de menor resolución poligonal pierden más detalle al compararla con las zonas más densas.

La superficie del modelo se promedia, mediante procesos de suavizado, para realizar mejorar los procesos de selección por curvatura, resaltando las aristas.

Con esta selección por curvatura se realizan mayores reducciones a las zonas planas que a los esquinas del modelo, ya que estas necesitan más polígonos para no perder el detalle de la arista, y hacer más rectas las superficies planas. Esta reducción tiene dos restricciones, la primera es la curvatura de la malla, la segunda es fijar los bordes, ya que estos deben permanecer inalterables para que la malla corresponda con siguiente sección del modelo. Teniendo en cuenta la sensibilidad con la que se quiere realizar la selección de zonas que no se modifican, según el grado de detalle que se quiere para el modelo, el cual depende a su vez del detalle del elemento escaneado. Esta reducción puede ser progresiva, ya que se puede expandir o contraer esta selección, lo cual permite una degradación de la malla de mayor a menor complejidad.

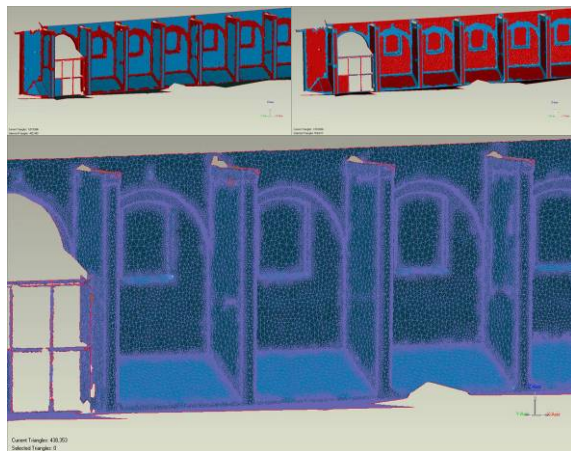


Figura 4.1: Selección por curvatura y decimación de la malla.



Comparación entre mallas de los contrafuertes de las Drassanes:

- La primera comparación que se realizó fue de la malla base contra la malla limpia (reducción del ruido) y otra limpia y con los polígonos de un tamaño homogéneo, ya que a partir de una malla con estas características la reducción permite obtener un mayor grado de detalle, que sin ella para el mismo número de polígonos, de igual forma se realizó la misma reducción sin esta corrección.

La malla limpia redujo el modelo inicial de 3'967.846 a 3'111.594 polígonos, del cual se seleccionaron 1'173.305 polígonos para la comparación por limitantes de los programas.

Sobre esta malla se realizó una selección de 2'604.142 polígonos, por tener distancias entre vértices menores de 3 mm. La malla limpia y homogénea, reduciéndose a una tolerancia de 3 mm generando una malla de 1'502.534 como base para las reducciones (para la comparación se tomaron 540.904 polígonos).

	Base vrs Limpia	Base vrs Limpia y homogénea
Número de caras	1173305	540904
<b>Desviación del modelo</b>		
Núm. Vértices efectivos	1489105	1179448
Distancia mínima	0	0
Distancia máxima	0,29891	0,29713
Distancia media	0,0017	0,00184
Desviación estándar	0,00301	0,00324
<b>Desviación malla/malla</b>		
Distancia mínima	-0,30785	-0,30725
Distancia máxima	0,31212	0,31232
Distancia media	0,00005	0
Desviación estándar	0,00594	0,00468

Tabla 10.1: Comparación entre malla de la nube de puntos sin filtro contra la malla limpia y contra la malla de polígonos homogéneos en tamaño

- **Reducción progresiva:** utilizando la selección por curvatura para excluir los bordes del modelo de las primeras reducciones, buscando reducir lo menos posible el detalle de las esquinas y al mismo tiempo homogenizar las superficies planas, al quitarles más detalle en la reducción final.

Primero con una reducción a un 40% sobre una selección de 1'104.720 polígonos (con una sensibilidad del 0.5), reduciendo el modelo a 839.702 polígonos (se tomaron 304.056 para la comparación).

Sobre el anterior modelo se realizó la misma selección por curvatura y se contrajo dos polígono en todo el perímetro, dejando una selección de 574.923 polígonos, los cuales se decimaron a un 20% reduciendo el modelo a 379.000 polígonos (se tomaron 129545 para la comparación).

Posteriormente se realizó una selección por curvatura (sensibilidad 0,8) de 195.733 polígonos, los cuales se redujeron un 35% obteniendo una malla de 243.000 (se tomaron 84507 para la comparación).

No se continuó la reducción al quedar un mínimo de polígonos en las zonas planas del modelo, dejando las zonas curvas con el 85% de los polígonos de la malla.

	Decimación a 40% excluyendo esquinas	Decimación a 20% excluyendo esquinas	Decimación a 35% excluyendo esquinas
Número de caras	304056	129545	84507
<b>Desviación del modelo</b>			
Núm. Vértices efectivos	1061925	972938	950682
Distancia mínima	0	0	0
Distancia máxima	0,29686	0,29825	0,30496
Distancia media	0,00191	0,00221	0,00243
Desviación estándar	0,00338	0,00354	0,00359
<b>Desviación malla/malla</b>			
Distancia mínima	-0,30725	-0,30725	-0,30775
Distancia máxima	0,31234	0,31229	0,31231
Distancia media	0	0,00002	0,00002
Desviación estándar	0,00464	0,00504	0,00499
<b>Curvatura Análisis</b>			
Máxima	1,29906	1,2928	1,27851
Mínima	-2,49475	-2,49475	-2,49475
Desviación estándar	0,12775	0,18163	0,19862

Tabla 10.2: Reducción progresiva. Comparación entre malla de la nube de puntos sin filtro contra malla decimada 40% de la selección, decimada 20% de la selección expandida y 35% de la malla sin los contornos.

- **Decimación directa y decimación porcentual sobre la selección por curvatura:** Se realizó una reducción a números específicos de polígonos partiendo de la malla limpia y homogénea, los cuales posteriormente se decimaron mediante la selección de contornos, para tener mayor resolución en los bordes del modelo.

La primera reducción fue de 240.000 polígonos, sobre la que se seleccionaron 158.664 polígonos, los cuales se redujeron un 20%, generando un modelo de 106.314 polígonos (se tomaron 37196 para la comparación).

El mismo proceso se realizó con una decimación de 100.000 polígonos con una selección de 64.158 polígonos, generando un modelo de 51.932 polígonos (se tomaron 18.282 para la comparación).

Posteriormente con un modelo de 50.000 polígonos, selección de 31.675, reduciendo esta selección a 70% con una malla de 39.763 polígonos (se tomaron 14.429 para la comparación).

	Decimación a 240000	Decimación curvatura 20%	Decimación a 100000	Decimación curvatura 30%	Decimación a 50000	Decimación curvatura 70%
Número de caras	88153	37196	36107	18282	17909	14429
<b>Desviación del modelo</b>						
Núm. Vértices efectivos	952227	919384	918430	914049	909793	907317
Distancia mínima	0	0	0	0	0	0
Distancia máxima	0,30922	0,29326	0,30226	0,30584	0,29075	0,29842
Distancia media	0,00205	0,00265	0,00241	0,0031	0,00284	0,0029
Desviación estándar	0,00352	0,00371	0,00374	0,00427	0,0039	0,00392
<b>Desviación malla/malla</b>						
Distancia mínima	-0,30725	-0,2797	-0,29524	-0,30011	-0,27866	-0,27866
Distancia máxima	0,31218	0,3118	0,31267	0,31269	0,31254	0,3127
Distancia media	0,00004	0,00014	0,00013	0,00021	0,00017	0,00019
Desviación estándar	0,00541	0,00653	0,00686	0,00674	0,00702	0,00712
<b>Curvatura Análisis</b>						
Máxima	1,5136	1,5136	1,22512	1,22512	1,56684	1,56684
Mínima	-2,37123	-2,37123	-2,36268	-2,36268	-2,38262	-2,38262
Desviación estándar	0,16138	0,23049	0,18852	0,25441	0,21587	0,23531

Tabla 10.3: Decimación directa y decimación porcentual sobre la selección por curvatura. Se compara la malla de la nube de puntos sin filtro contra: la decimación del modelo a 240.000 y decimación 20% excluyendo las aristas; la decimación a 100.000 y decimación 30% excluyendo las aristas; la decimación a 50.000 y decimación 70% excluyendo las aristas;

- **Reducción directa:** Al realizar la reducción por curvatura se llegó a un máximo de 40.000 polígonos en promedio, ya que más del 50% los polígonos quedan en los bordes del modelo por este tipo de reducción y dada la necesidad de reducir más el modelo se decimaron a cierto número de polígonos para la comparación. La primera a 40.000 (se tomaron 14.282 para la comparación), otra de 30.000 (se tomaron 10606 para la comparación). Por último se compararon mallas decimadas a 24.000 polígonos una partiendo de la malla homogénea y otra de la malla sin filtros (se tomaron 8.466 y 7.908 polígonos respectivamente).

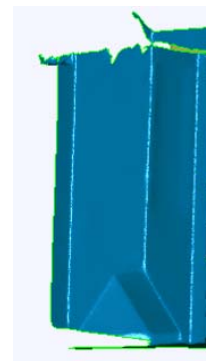


Figura 4.2: Suavizado por curvatura y decimación

	Decimación a 40000	Decimación a 30000	Decimación a 24000 base malla homogénea	Decimación a 24000 Base malla sin filtros
Número de caras	14282	10606	8466	7908
<b>Desviación del modelo</b>				
Núm. Vértices efectivos	907113	903979	902969	903090
Distancia mínima	0	0	0	0
Distancia máxima	0,30173	0,30023	0,30026	0,29882
Distancia media	0,00299	0,00324	0,00346	0,00387
Desviación estándar	0,004	0,00418	0,00437	0,00425
<b>Desviación malla/malla</b>				
Distancia mínima	-0,27866	-0,27141	-0,28304	-0,29332
Distancia máxima	0,31267	0,31175	0,31249	0,31245
Distancia media	0,0002	0,00025	0,00021	0,0004
Desviación estándar	0,00743	0,00784	0,00804	0,00821
<b>Curvatura Análisis</b>				
Máxima	1,52965	1,19827	1,98418	2,06982
Mínima	-2,38825	-2,30748	-1,58412	-1,60656
Desviación estándar	0,22454	0,23415	0,25045	0,27737

Tabla 10.4: Reducción directa.

- **Suavizado por curvatura y decimación:** Al identificar que la reducción por decimación necesita una reducción muy drástica para eliminar el detalle menor de los cm, en cuanto a su identificación de la superficie, se procedió a realizar una reducción del detalle en la malla base, excluyendo los contornos, decimando posteriormente la malla.

Se realizaron dos mallas de 80.000 polígonos, con diferente nivel de suavizado, primero aplicando un suavizado sobre toda la malla para que sea menos notoria la reducción que se realizara mediante selección, excluyendo los planos, sobre la cual para la primera malla se suavizo una vez y la segunda malla dos veces, reduciendo el detalle de la superficie hasta que desaparecieran los rasgos de cualquier detalle de la superficie (se tomaron 28.049 y 28.437 para la comparación respectivamente).

El proceso anterior modifico los bordes de la malla en el suavizado inicial, por lo cual se aplico el suavizado solo a las zonas planas y posteriormente se aplico un filtro que reduce los picos de la superficie, modificando solo la unión entre los bordes y las zonas planas, posteriormente se redujo la malla a 50.000 (se tomaron 18223 para la comparación).



Figura 4.3: Problemática del ruido en los bordes.

	Suavizado por curvatura decimación 80000	Suavizado por curvatura máximo decimación 80000	Suavizado por curvatura máximo decimación 50000
Número de caras	28049	28437	18223
<b>Desviación del modelo</b>			
Núm. Vértices efectivos	965267	965261	961132
Distancia mínima	0	0	0
Distancia máxima	0,31182	0,30446	0,30418
Distancia media	0,00593	0,00675	0,00347
Desviación estándar	0,00839	0,00936	0,00463
<b>Desviación malla/malla</b>			
Distancia mínima	-0,31182	-0,312	-0,30418
Distancia máxima	0,29602	0,31118	0,29828
Distancia media	0,00017	0,00032	-0,00003
Desviación estándar	0,01038	0,01163	0,006
<b>Curvatura Análisis</b>			
Máxima	1,65245	1,64934	1,78031
Mínima	-1,55183	-1,9704	-2,35917
Desviación estándar	0,17241	0,16322	0,24037

Tabla 10.5: Comparación de los análisis de curvatura

### Comparaciones representativas de los procesos de reducción poligonal:

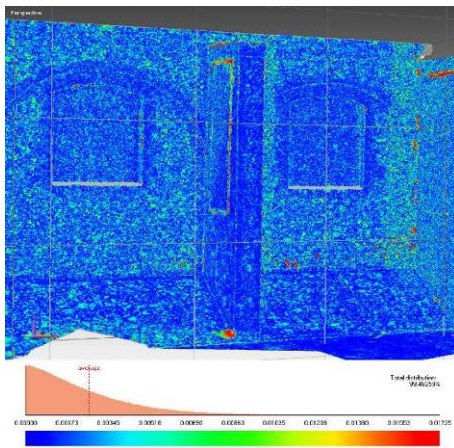


Figura 4.4: Desviación del modelo:  
Decimación directa y decimación  
porcentual sobre la selección por curvatura  
106 314 ^

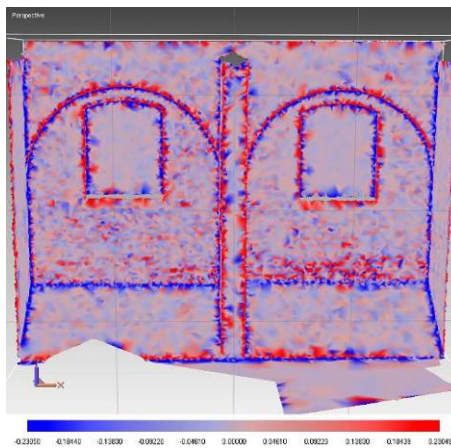


Figura 4.5: Análisis de curvatura:  
Decimación directa y decimación  
porcentual sobre la selección por curvatura  
106 314 ^

El detalle de la malla es muy alto al solo reducirse la malla a un 2,22%, manteniendo zonas con más detalle que otras, debido las diferencias del nivel de detalle entre zonas de la malla base.

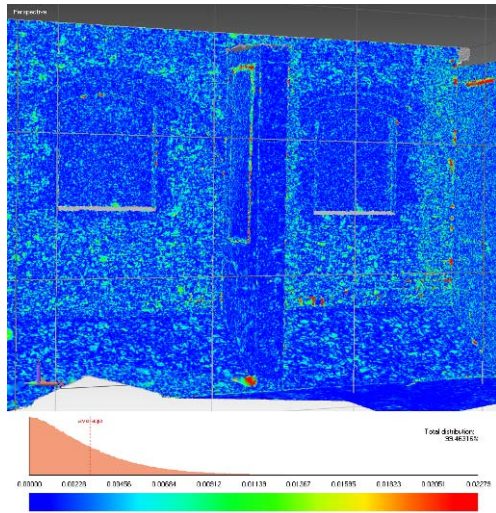


Figura 4.6: Desviación del modelo:  
Decimación directa y decimación porcentual  
sobre la selección por curvatura 51.932  $\Delta$

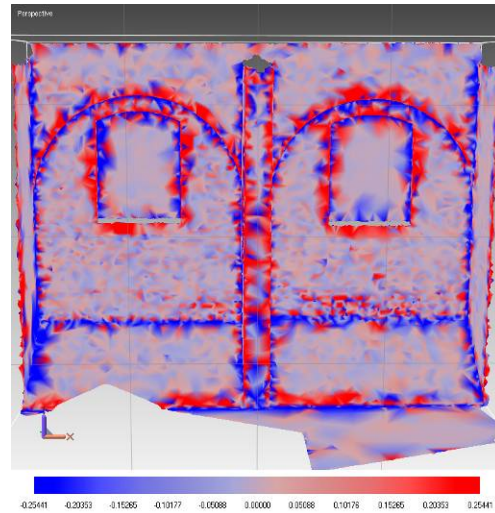


Figura 4.7: Análisis de curvatura: Decimación  
directa y decimación porcentual sobre la  
selección por curvatura 51.932  $\Delta$

A este nivel de resolución se comienza a ser visible las diferencias de tamaños de los polígonos en las partes frontales de los contrafuertes, en los arcos y ventanas, siendo una malla con una distribución de vértices homogénea en el modelo siendo mas densa en zonas de mayor detalle, estas zonas estrechas llegan al punto de tener polígonos con los vértices en los extremos de estas zonas, por lo cual para mantener las esquinas tiene ángulos que no permiten la continuidad de la superficie.

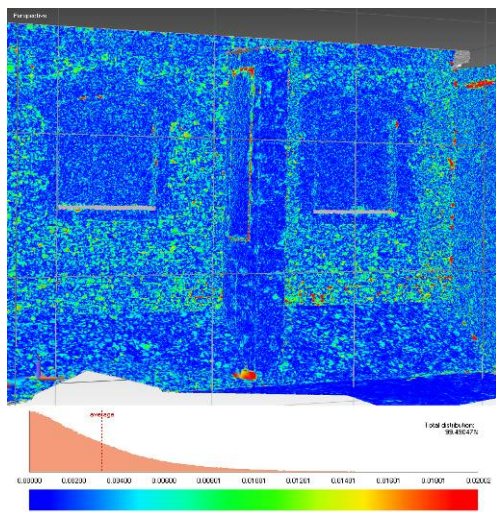


Figura 4.8: Desviación del modelo:  
Decimación a 30.000  $\Delta$

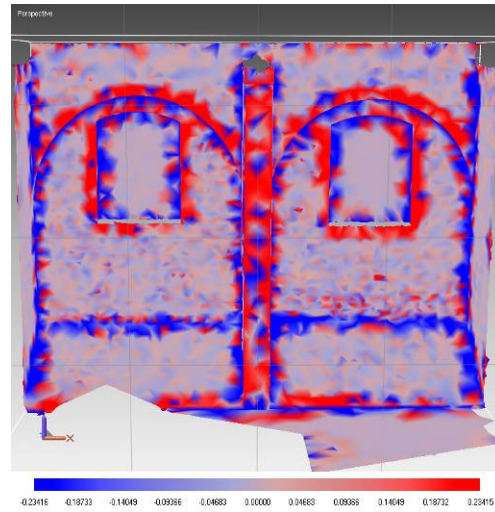


Figura 4.9: Análisis de curvatura: Decimación  
a 30.000  $\Delta$

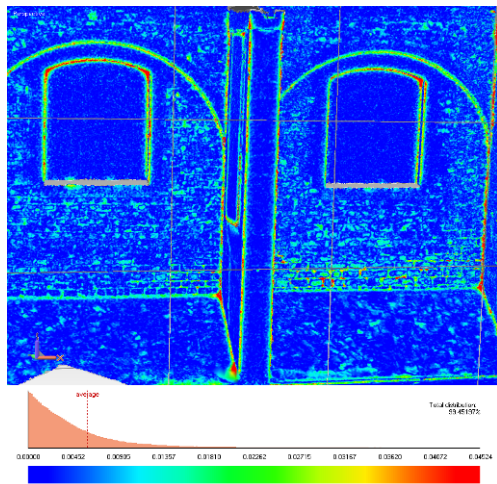


Figura 4.10: Desviación del modelo: Suavizado por curvatura y decimación a 80.000  $\Delta$

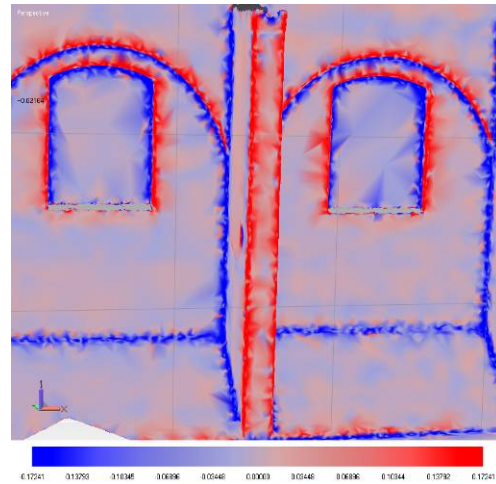


Figura 4.11: Análisis de curvatura: Suavizado por curvatura y decimación a 80.000  $\Delta$

En esta comparación se contrasta la problemática de las aristas del modelo, como con un filtro de suavizado aplicado con sobre todo el modelo deforma las esquinas, aunque este se aplique de forma mínima, para eliminar las irregularidades que quedaron al reducir detalle excluyendo las aristas del modelo, en donde las superficies planas se convirtieron en superficies homogéneas y las aristas se intensificaron los problemas de ruido del modelo.

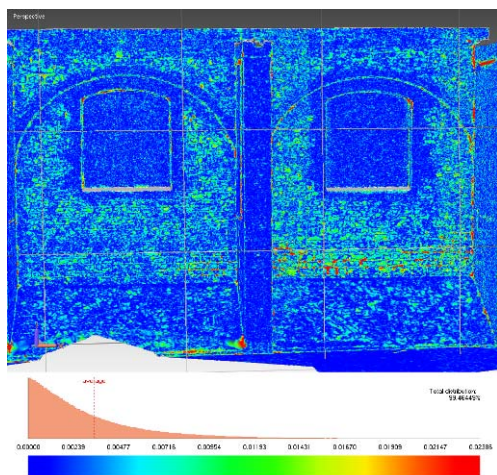


Figura 4.12: Desviación del modelo: Suavizado por curvatura y decimación a 50.000  $\Delta$

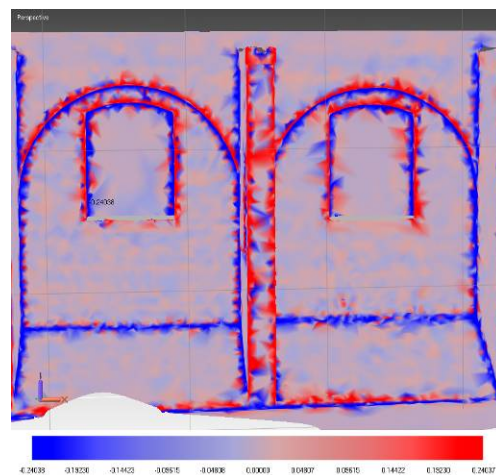


Figura 4.13: Análisis de curvatura: Suavizado por curvatura y decimación a 50.000  $\Delta$

Partiendo de la experiencia del proceso anterior se redujeron las mallas, pero se aplicó un proceso de limpieza que solo afectó a los picos irregulares de la malla, con lo cual la diferencia entre las zonas planas y las aristas en cuanto a ruido mejoró considerablemente, mediante una malla homogénea, disminuyendo el error de las aristas.

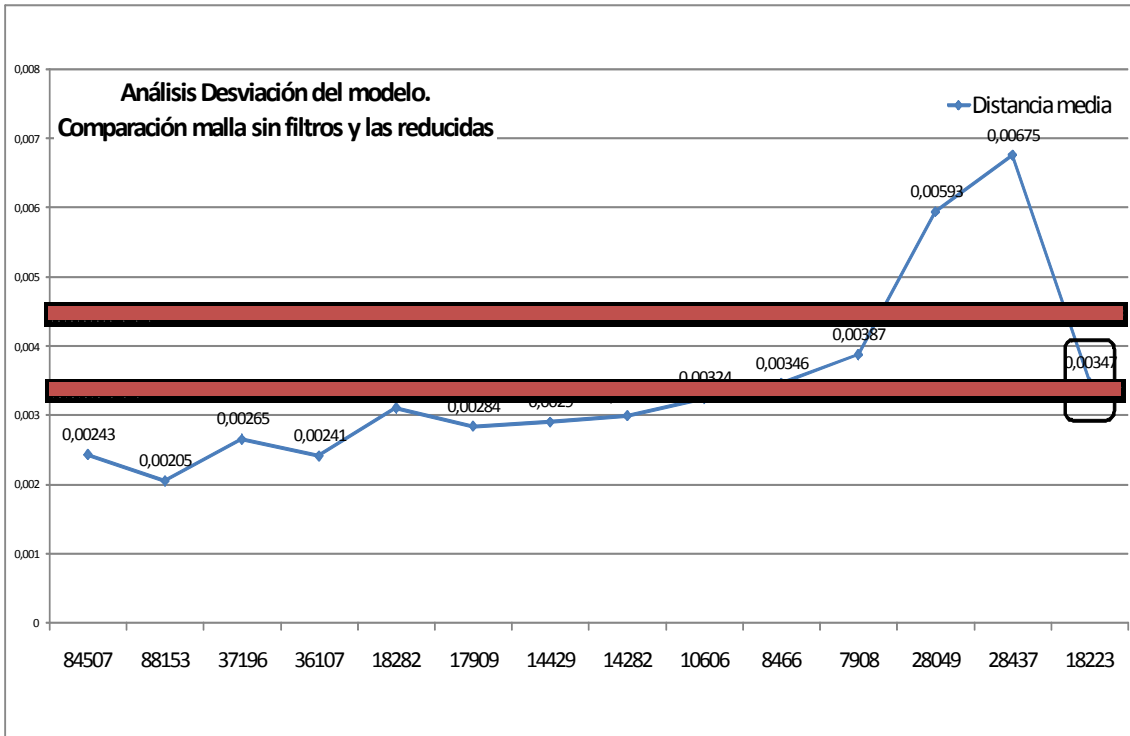


Figura 4.13: Análisis desviación del modelo, comparación malla sin filtros y malla reducidas.

En este grafico podemos ver la influencia del suavizado en las ultimas tres mallas, siendo la ultima la única que no se vio afectada por la corrección de los errores de las aristas del modelo entre las superficies filtradas y los bordes.

### Metodología propuesta:

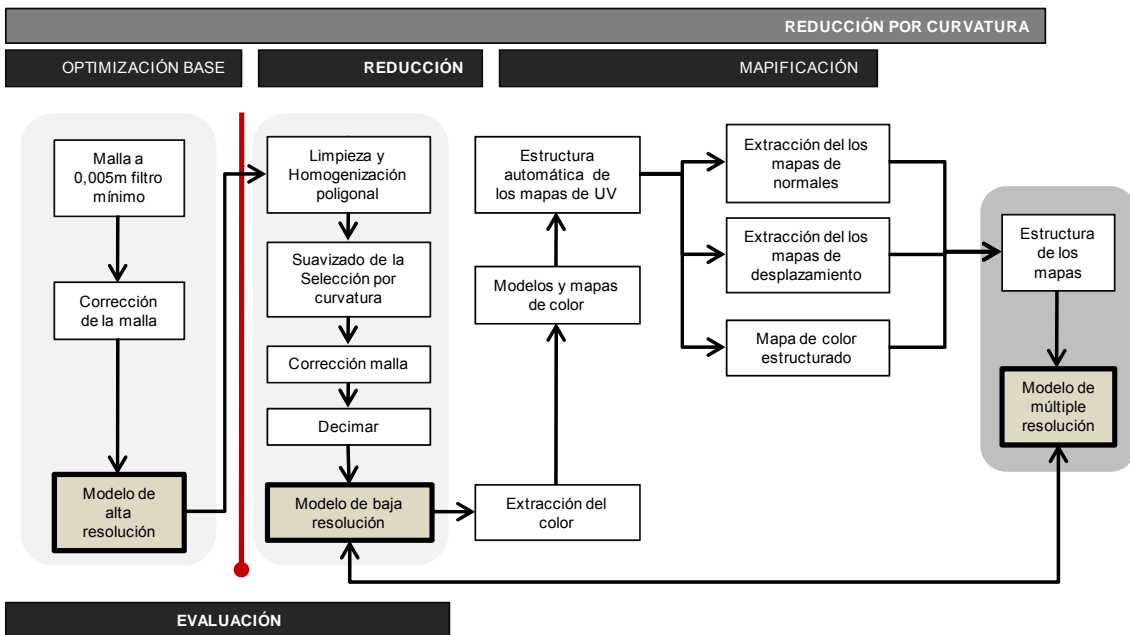


Figura 4.14: Metodología propuesta para la reducción por curvatura.

Se comprobó que la reducción por decimación sola limita la correcta lectura de los mapas de desplazamiento, por lo cual se realiza un filtrado de la malla, suavizando la superficie del modelo, promediando la altura de los vértices con respecto a la normal. Este suavizado se realiza excluyendo las aristas del modelo, ya que estas se redondearían, generando un error considerable, visible en la media del modelo comparado con la malla base. Al suavizar las formas libres que componen el modelo el ruido de las aristas aumenta, por ello de utilizar un filtro que elimine los vértices irregulares al promedio de la superficie eliminando el ruido en esta unión.

La extracción del mapa de desplazamiento partió de la construcción automática de las UV, dada la incapacidad de asegurar la escala de los elementos en el proceso de proyección desdoblamiento del modelo en el espacio de las UV, siendo una limitante de este tipo de modelos, al igual que las uniones entre segmentos de UV, ya que al ser un modelo libre (sopa de polígonos) los segmentos tienen bordes de cierra, lo cual limita su unión afectando directamente a los mapas complementarios, al limitar la unión entre caras del modelo en procesos de texturizado.

### **Ventajas de la reducción por curvatura**

- Rápido post proceso: Aunque es un proceso de prueba y error para encontrar la reducción con la que se pierde menos detalle, es eficiente gracias a los algoritmos que se utilizan en los programas de ingeniería inversa.
- Promedio de la superficie: Gracias a que es un proceso selectivo y al existir herramientas que permiten promediar los vértices de las superficies, se consigue reducir el detalle de las superficies selectivamente, separando el relieve de la superficie con los detalles que en ella se encuentran, como grietas, porosidad, entre otras.
- Restringir zonas de modificaciones: en este tipo de mallas es importante la unión con otras de su mismo tipo, dado que los bordes son en forma de cierra, por ello al restringir los contornos para que no se modifiquen se logra unir eficientemente estos tipos de mallas.
- Algoritmos: Los estudios sobre formulas de reducción de mallas es muy extenso y se a logrado grandes desarrollos, siendo procesos rápidos y precisos.

### **Problemas de la reducción por curvatura**

- Bordes de cierra: Al ser una malla irregular no se puede ni seccionar ni dividir en el espacio de las UV sin que exista el problema de que al juntarlas no encajen bien las aristas. En la malla no es tan visible como en los mapas, los cuales son difíciles de unir y de borrar aristas en la textura, siendo en el 3D un borde dentado.
- Limite de reducción: El limite para el modelo esta relacionado con el nivel de detalle que se pierde de este, o en reducciones excesivas a modificar la volumetría del modelo.
- Dificultad en realizar mapas de UV: La alta densidad poligonal de estas mallas imposibilitan realizar mapas de UV correctamente, ya que retrasan los tiempos de procesamiento, obligando a realizar un proceso automático y dada la dificultad de su manipulación se considera una gran debilidad de este tipo de mallas. Cuando estas mallas se reducen en exceso para ser manejables surge el problema de los bordes de cierra, los cuales son más visibles en el proceso de generar mapas de desplazamiento.
- Problemas de las normales: Al ser una simple reducción del modelo denso se conservan los mismos problemas de estas mallas como lo son las normales invertidas



en zonas con poca resolución en la información base, las cuales tienen que borrarse y ser reparadas posteriormente, perdiendo detalle en estas zonas.

- **Perdida del detalle:** Al ser un proceso semiautomático la pérdida de detalle en ciertas zonas puede ser considerable, ya que esta reducción de los polígonos no se puede estandarizar porque depende del modelo y su detalle, algunos permiten más o menos reducción, llegando a perder detalle dependiendo del límite que permite el modelo.
- **Modelos densos:** La curvatura y el nivel de detalle del modelo escaneado es una limitante en la reducción por curvatura, ya que su complejidad determina el grado de reducción de la malla.

#### 4.1.2 Reducción por clasificación

La clasificación se basa en la identificación de los planos, curvas y formas irregulares, segmentando la nube de puntos según la orientación de los planos determinada por la normal, usando un parámetro de grosor, y de “thershold” en la selección.

Con ello se puede hacer una selección múltiple o seleccionar el plano más grande que tengan la normal hacia la misma dirección y con un diámetro específico, en los cuales ponemos llegar a seleccionar un plano que contenga por ejemplo: las huellas de una escalera, al seleccionar un rango de grosor muy alto y encontrar los planos que se orientan hacia arriba.

Del mismo modo identificado las partes que tienen curvatura, se puede realizar una detección semiautomática al limitar el rango de búsqueda de una zona curva, en la cual se busca un cilindro que encaje con la curvatura mayor, logrando separar los planos a las curvas identificables. Como resultante de esta clasificación podemos encontrar las superficies irregulares las cuales tienen que ser trabajadas independientemente, ya que no tienen radio y no son planas.

Una vez identificadas las superficies se procedió a mallarlas agrupándolas por tipología y por la clasificación, llegando a obtener mallas con la misma resolución que con otros procedimientos, pero con los contornos de los planos alejados de los planos vecinos, considerando la distancia entre punto y punto de la malla, siendo más notorio en zonas con poca resolución de puntos, en los cuales las caras más perpendiculares al escáner recogen mayor información que ayuda a completar la superficie.

Al generar un modelo tan segmentado como el mallar sobre nubes de puntos clasificadas, es recurrente encontrar elementos con las normales invertidas, ya que las normales se calculan mejor sobre superficies continuas que con planos sueltos.

Comparación entre mallas de los contrafuertes de las Drassanes:

- **Comparación de malla sin filtros vs malla construida desde la clasificación:** Partiendo de la clasificación se generaron mallas según la dirección del elemento y la tipología, en arcos, laterales de contrafuertes, el frente de los contrafuertes, ventanas, superficies irregulares y los planos de los

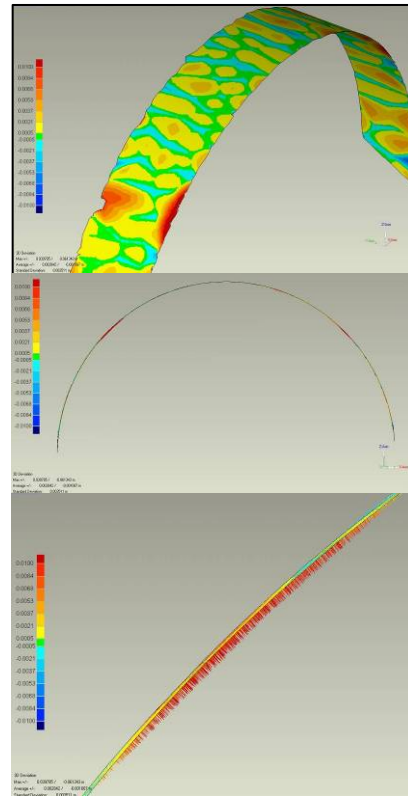


Figura 4.15: Comparación de un arco proyectado a un cilindro, por la detección del radio contra la malla base.

	Malla sin filtros vrs malla de la clasificación
Número de caras	1491640
<b>Desviación del modelo</b>	
Núm. Vértices efectivos	1658106
Distancia mínima	0
Distancia máxima	0,30846
Distancia media	0,00191
Desviación estándar	0,00315
<b>Desviación malla/malla</b>	
Distancia mínima	-0,30761
Distancia máxima	0,30212
Distancia media	-0,00008
Desviación estándar	0,00349
<b>Curvatura Análisis</b>	
Máxima	2,23349
Mínima	-2,66054
Desviación estándar	0,07151

Tabla 11.1: Comparación de la malla de clasificación ase, con la malla de la nube de

muros.

- Proyección de mallas sobre planos y cilindros:** La proyección sobre planos se realiza con la detección del centro de la superficie, buscando promediar la superficie plano por plano, sobre la cual se mueven todos los vértices de la malla, llegando a superponer polígonos unos sobre otros, por lo cual el limpiar la malla de intersecciones y en las zonas que se taparon huecos con anterioridad en la corrección de la malla de alta densidad se generan incoherencias en las normales, las cuales son visibles sobretodo en el momento de reducir las mallas, por lo cual un proceso de borrar y re tapas los huecos es necesario.

	Proyección clasificación en planos y cilindros
Número de caras	19736
<b>Desviación del modelo</b>	
Núm. Vértices efectivos	953052
Distancia mínima	0
Distancia máxima	0,31026
Distancia media	0,00992
Desviación estándar	0,01029
<b>Desviación malla/malla</b>	
Distancia mínima	-0,31191
Distancia máxima	0,307
Distancia media	0,00191
Desviación estándar	0,01431
<b>Curvatura Análisis</b>	
Máxima	1,88208
Mínima	-3,14159
Desviación estándar	0,12515

La malla se reducirse manteniendo los contornos fijos, para no alterar la forma de los planos, pero un proceso de simplificación posterior puede ayudar a definir los contornos, ya que al dejarlos libres estos se promedian, llegando definir mejor las formas de los planos reduciendo los bordes de cierra.

Tabla 11.2: Comparación de la mala de la nube de puntos sin filtro y la clasificación proyectada a planos y cilindros.

- Decimación porcentual:** La decimación de la clasificación se diferencia de la decimación por curvatura porque los bordes de las mallas clasificadas no pierden el detalle que pierde la superficie al reducirse, llegando al punto que con reducciones muy altas los bordes tienden a promediar sus vértices, arreglando las irregularidades de las aristas.

	Decimación 5%	Decimación 3%	Decimación 2%	Decimación 1%
Número de caras	69551	41941	28122	14313
<b>Desviación del modelo</b>				
Núm. Vértices efectivos	975957	962949	956623	951021
Distancia mínima	0	0	0	0
Distancia máxima	0,30348	0,30237	0,30692	0,30803
Distancia media	0,00207	0,00223	0,00246	0,003
Desviación estándar	0,00282	0,00288	0,00302	0,00342
<b>Desviación malla/malla</b>				
Distancia mínima	-0,30348	-0,30237	-0,30561	-0,30143
Distancia máxima	0,30746	0,30667	0,30722	0,30803
Distancia media	-0,00008	-0,00006	-0,00005	-0,00003
Desviación estándar	0,00364	0,0038	0,00406	0,00469
<b>Curvatura Análisis</b>				
Máxima	2,54403	1,78741	1,5992	1,51807
Mínima	-2,2278	-2,32919	-2,30571	-2,09788
Desviación estándar	0,13334	0,14829	0,16063	0,20325

Tabla 11.3: Comparación de la malla de la nube de puntos sin filtros con las mallas decimadas.

- Reducción poligonal fijando los bordes:**  
 Para este proceso se realizó una selección por área, homogenizando la distancia entre los polígonos, posteriormente se realizaron las mismas operaciones de decimación de la reducción por curvatura, buscando tener más densidad poligonal en los contornos por lo cual se dejaron fijos, ya que mediante herramientas de modelado y al tener desdobladas las UV se procede a seleccionar los contornos de las UV y realizar una fusión de estos vértices seleccionados entre planos, obteniendo una malla reducida al máximo según el número de planos y al mismo tiempo con aristas definidas.

	Decimación 1% con bordes fijos
Número de caras	14965
<b>Desviación del modelo</b>	
Núm. Vértices efectivos	947522
Distancia mínima	0
Distancia máxima	0,31011
Distancia media	0,00388
Desviación estándar	0,00435
<b>Desviación malla/malla</b>	
Distancia mínima	-0,30496
Distancia máxima	0,31011
Distancia media	0,00003
Desviación estándar	0,00595
<b>Curvatura Análisis</b>	
Máxima	2,10379
Mínima	-2,69233
Desviación estándar	0,31977

Tabla 11.4: Malla de la nube de puntos sin filtrar comparada con la malla decimada a un 1%, con los vértices de los bordes de las mallas fijas en el proceso de decimación.

- Unión de los bordes del modelo:** Se inició el proceso de mallado de nubes de puntos clasificadas comprendiendo la necesidad de unir las mallas una vez reducido poligonalmente el modelo, basándose en los planteamientos de Ioannis Stamos<sup>59</sup> en cuanto a la selección de los bordes y la unión de ellos. Este proceso se planteó como un proceso de forma automática mediante operaciones booleanas, segmentando los planos en cada posición de escaneo, en la representación 2,5d de la nube 3d, (llama a este proceso "segmented plana rareas SPAs"), después superpone las posiciones y aplica clúster para realizar las operaciones booleanas, en las que detecta los bordes mediante procesos automáticos de detección de líneas de intersección entre planos vecinos. Dado que este proceso no es factible porque se planteó como proceso desde la nube de puntos en la construcción de la malla, para malla de alta resolución poligonal, por este mismo motivo la unión entre los planos no se realiza desde programas de ingeniería inversa, porque ellos están planteados para mallas de alta resolución poligonal y carecen de herramientas de modelado.

	Decimación 2% Bordes unidos
Número de caras	29103
<b>Desviación del modelo</b>	
Núm. Vértices efectivos	966756
Distancia mínima	0
Distancia máxima	0,30895
Distancia media	0,00267
Desviación estándar	0,00359
<b>Desviación malla/malla</b>	
Distancia mínima	-0,30561
Distancia máxima	0,30895
Distancia media	-0,00008
Desviación estándar	0,00447
<b>Curvatura Análisis</b>	
Máxima	2,41038
Mínima	-2,51654
Desviación estándar	0,2657

Tabla 11.5: Comparación malla de la nube de puntos sin filtrar vs malla de la clasificación decimada un 2% con los bordes unidos.

<sup>59</sup> STAMOS, Ioannis, 3D modeling using planar.....

Por ello se utilizaron herramientas de selección de bordes y de unión de vértices con un radio de 10cm en la unión de vértices, realizando este proceso para cada plano, teniendo en cuenta el orden de la selección ya que las mallas con secciones de meno de 10cm podrían unirse mal, por lo cual estos planos son los primeros en unir evitando unir erróneamente estos vértices,

- **Planos suavizados y decimados:** Dado que con las superficies malladas a partir de una clasificación no tienen puntos de inflexión de la superficie, como lo son las aristas, no hay necesidad de limitar la reducción del detalle por medio de operaciones de suavizado de la superficie, ya que se promedian en una única dirección y no rotan sobre un punto el cual tienda a redondearse.

	Suavizado Decimación a 50000	Suavizado máximo Decimación a 50000
Número de caras	18684	18615
<b>Desviación del modelo</b>		
Núm. Vértices efectivos	949156	950245
Distancia mínima	0	0
Distancia máxima	0,31027	0,30568
Distancia media	0,00403	0,00437
Desviación estándar	0,00509	0,00539
<b>Desviación malla/malla</b>		
Distancia mínima	-0,31105	-0,31227
Distancia máxima	0,31027	0,30598
Distancia media	-0,00027	-0,00028
Desviación estándar	0,0069	0,0072
<b>Curvatura Análisis</b>		
Máxima	2,56546	2,52183
Mínima	-2,51231	-1,69474
Desviación estándar	0,1239	0,12552

Tabla 11.6: Comparación malla de la nube de puntos sin filtro y mallas suavizadas y posteriormente decimadas.

### Comparaciones representativas de los procesos de reducción poligonal:

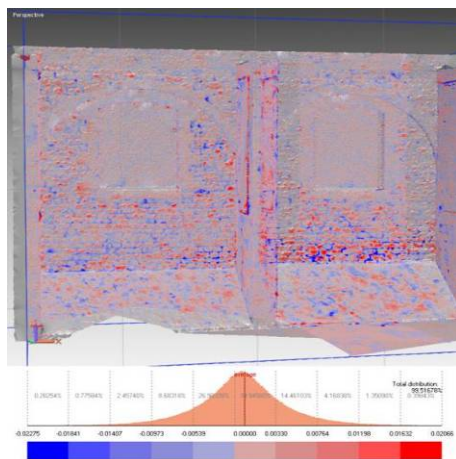


Figura 4.16: Desviación del modelo representado con vectores: Decimación 1%

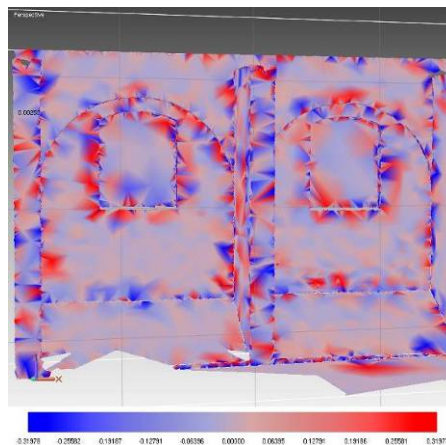


Figura 4.17: Análisis de curvatura: Decimación 1%

La decimación al 1% permite homogenizar la malla en los planos de mayor tamaño, al reducirse demasiado los planos de menor ancho o alto tienden a inclinar los polígonos a direcciones diferentes, sobretodo cuando los vértices de un polígono alcanzan ambos lados del plano.

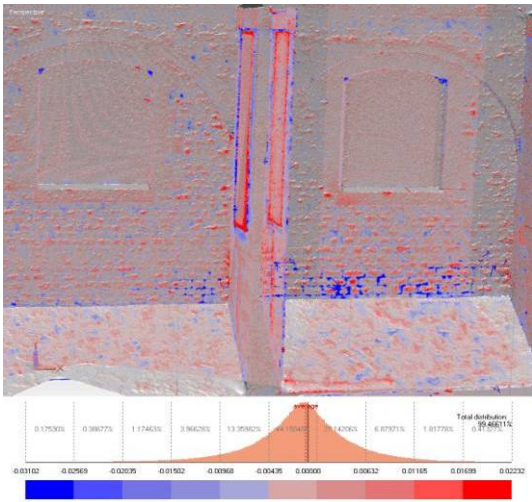


Figura 4.18: Desviación del modelo representado con vectores: Planos suavizados y decimados 50.000Δ

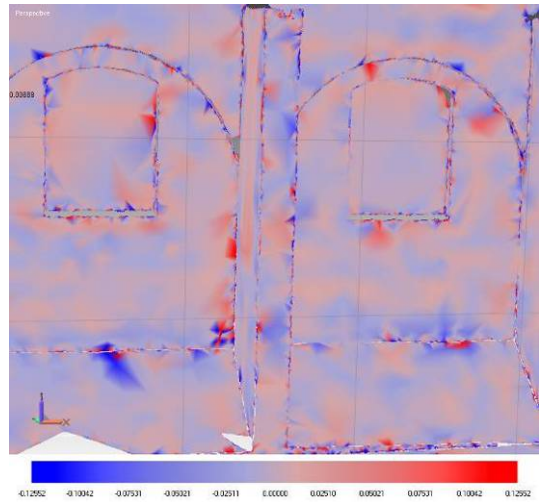


Figura 4.19: Análisis de curvatura: Planos suavizados y decimados 50.000Δ

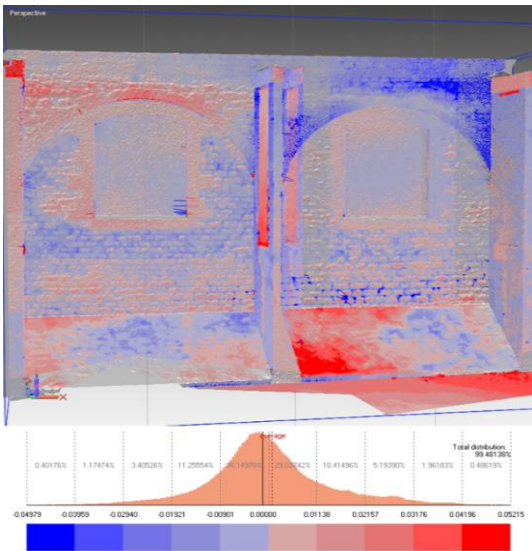


Figura 4.20: Desviación del modelo representado con vectores: Proyección en planos y cilindros

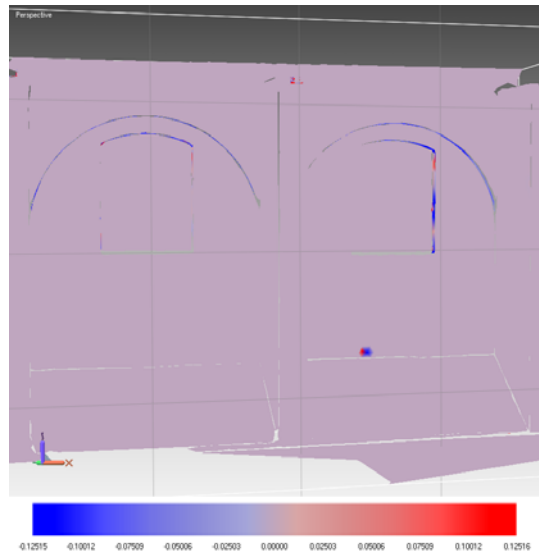


Figura 4.21: Análisis de curvatura: Proyección en planos y cilindros

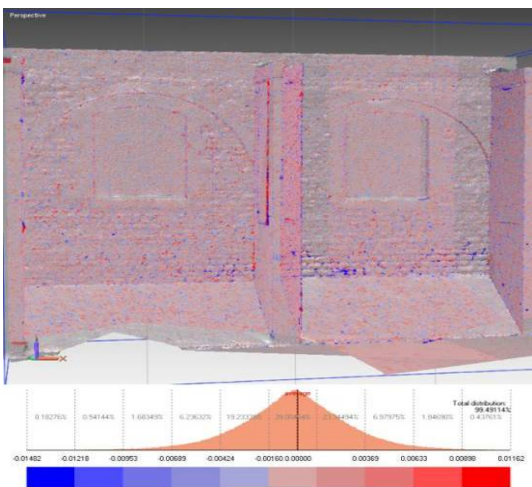


Figura 4.22: Desviación del modelo, representado con vectores: Decimación 2%

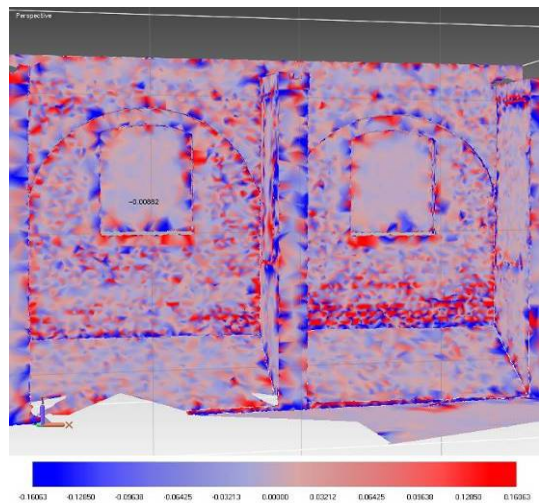


Figura 4.23: Análisis por curvatura: Decimación 2%

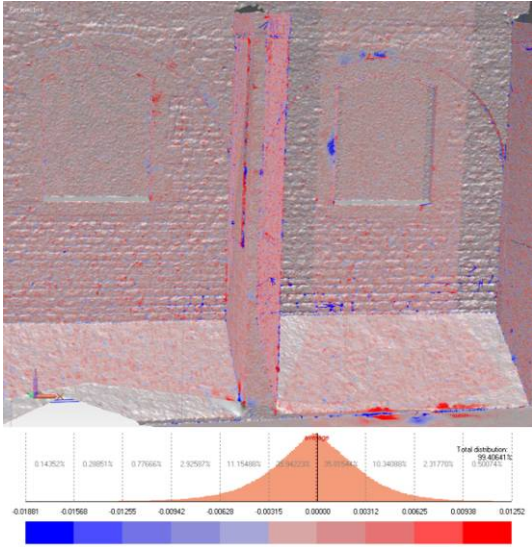


Figura 4.24: Desviación del modelo representado con vectores: Bordes unidos malla decimada 2% con 24.000Δ

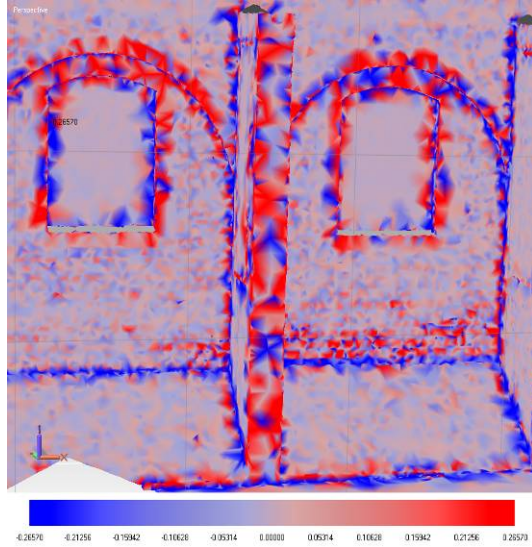


Figura 4.25: Análisis de curvatura: Bordes unidos malla decimada 2% con 24.000Δ

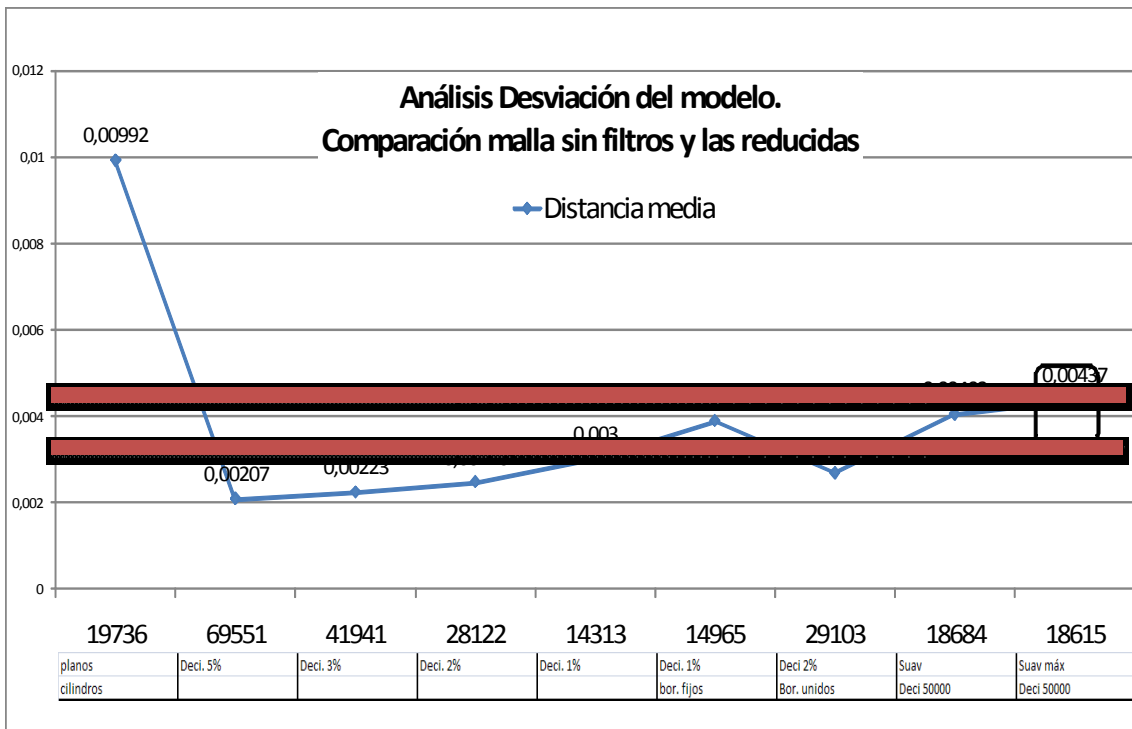


Figura 4.26: Análisis desviación del modelo, comparación malla sin filtros y mallas reducidas, distancia media.

En esta gráfica destaca el error producido con una malla donde se clasifican las superficies como planos, siendo estas formas libres. También vemos que la malla al igual que la reducción por curvatura esta demasiado cerca al modelo base en las siguientes cuatro mallas, siendo las que se suavizaron las que mejor entran en el promedio, siendo mallas que promedian mejor el detalle de la superficie, sin alejarse considerablemente del promedio de la superficie de la malla base.

## Metodología propuesta:

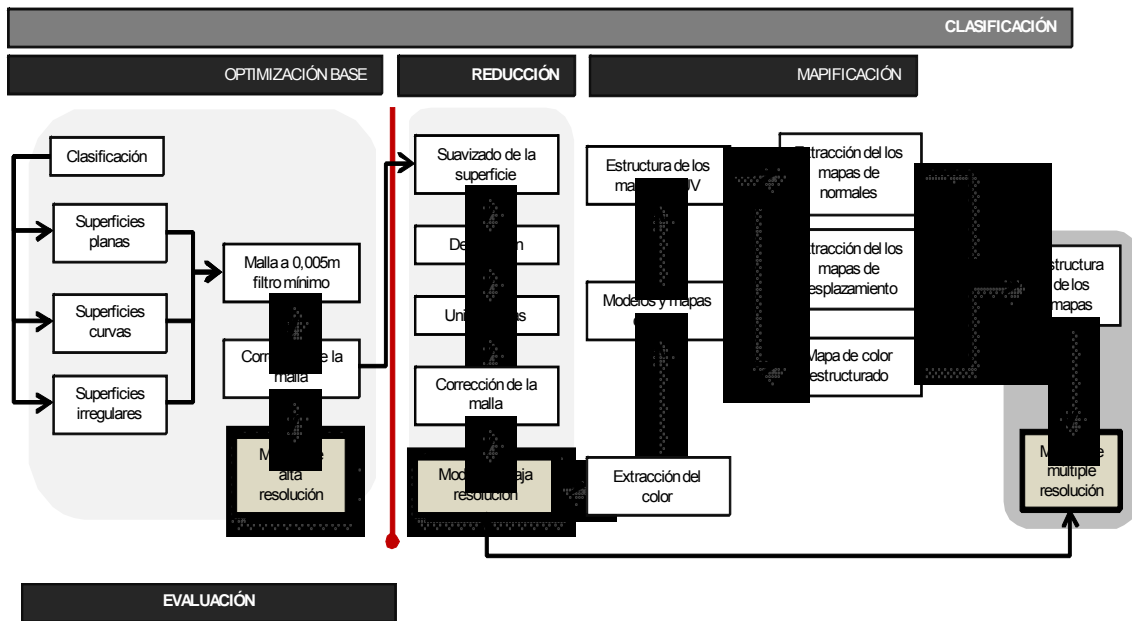


Figura4.27: Metodología propuesta para malas nubes de puntos clasificadas.

Igual que con la reducción por curvatura la decimación no fue suficiente para promediar el detalle de la superficie, pero al ser superficies independientes por la clasificación el proceso de suavizado fue mas eficiente, ya que las aristas no influyeron, permitiendo un suavizado homogéneo, controlado, por grupos de planos, llegando al limite del suavizado. Posteriormente se decimo el modelo, reduciendo las irregularidades de los bordes de los planos, lo cual permitió su unión en programas de modelado.

Al realiza la decimación los bordes de los planos pasaron de ser en forma de cierra a ser regulares, lo cual permitió desdoblarse el modelo proyectando cada plano clasificado en su respectiva orientación en el espacio de las UV, mediante la proyección a una cámara ubicada perpendicularmente al plano y ya que los bordes son rectos, se logro la unión entre planos en el espacio UV sin modificar el factor de escala de estos. El problema que se genero en las UV se debe a que al ser una malla irregular las zonas irregulares no se pueden expandir en el espacio de las UV con relación al tamaño de los polígonos (para corregir errores de escala), por la irregularidad de la distribución de los polígonos al ser una malla libre (sopa de polígonos).

### Ventajas de la clasificación:

- Se identifican mejor los contornos en la selección de bordes, permitiendo simplificar todo el modelo sin tocar los contornos generales.
- Se facilita la unión con otras mallas, al permanecer intactos sus contornos.
- Se reduce el ruido de los contornos al reducir el modelo, promediando la geometría del elemento.
- Permite trabajar con mallas con mayor resolución por medio de la segmentación, permitiendo comparar el modelo simplificado contra fragmentos de alta resolución.
- Facilita descomponer y geometrizar el modelo de estudio.
- Existe una independencia de trabajo en zonas conflictivas como las ventanas, facilitando el flujo de trabajo (el vidrio y superficies reflectantes generan problemas de ruido y disminuyen la resolución de estos elementos).



- Se manejan aisladamente diferente tipos de geometría, logrando simplificar más las superficies planas y dando prioridad en cuanto a resolución a superficies curvas o complejas.
- La limpieza de la nube de puntos es más selectiva y al reducir el modelo se identifican mejor las zonas que no pertenecen al modelo.
- La normal de los puntos se puede corregir manualmente y automáticamente identificando zonas y orientación
- Al dividir el modelo en piezas menores se puede exportar datos 2d como el color a mayor resolución y al clasificar el modelo por orientación se logra UV automáticas ordenadas evitando la sobre segmentación.
- Se facilita la construcción de mapas de UV.
- Se reduce la carga de procesamiento del ordenador al trabajar con múltiples archivos de tamaño menor.
- Se puede trabajar a diferentes niveles de resolución en zonas con mayor o menor densidad de puntos.
- Al separar elementos geométricos se puede generar dos modelos uno detallado y uno simplificado plano, permitiendo extraer un mapa de desplazamiento generado desde una superficie plana.

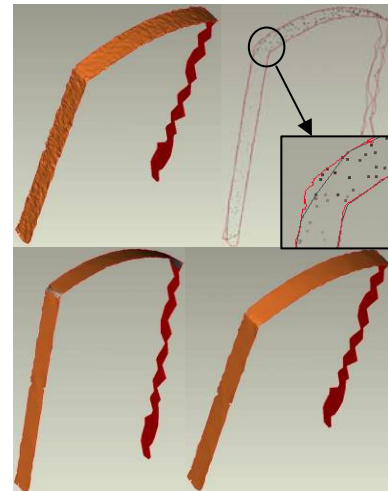


Figura 4.28: Proyección de superficies irregulares a planos y curvas.

#### Problemas de la clasificación:

- Al dividir el modelo se necesita un paso posterior para unirlo y tapan los huecos que se generan entre planos, siendo un proceso de modelado que consume tiempo.
- El proceso de clasificación consume mucho tiempo en relación al aporte que genera, ya que al volver a unir las piezas clasificadas el trabajo de dividir la nube pierde valor, si este se mantuviera como una parametría tendría una mayor utilidad en la malla terminada.
- Al trabajar con parte de datos que tienen poca resolución se distorsiona la malla, a lo contrario que al tener el modelo completo, siendo los puntos de los planos adyacentes una guía para generar la malla.
- Al ser una malla libre los mapas de UV no se pueden manipular fácilmente sin distorsionar la escala en las aristas o en zonas irregulares.

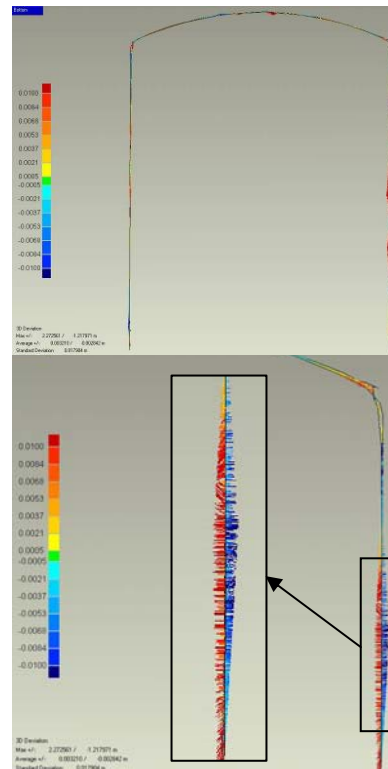


Figura 4.29: Comparación con la malla base.

## 4.2 Reconstrucción de la malla

### 4.2.1 Procesos semiautomático (Surface Phase)

Las Surface Phase se utilizan para reestructurar la malla, mediante procesos semiautomáticos, usando “quadilateral patches” se dividen en dos Shape Phase y Fashion Phase.

**Shape Phase:** Se basa en la detección de contornos permitiendo distribuir una red de patches teniendo en cuenta la geometría del objeto, construyendo una malla de nurbs<sup>60</sup> sobre la malla poligonal de alta resolución. Los procesos que permiten esta construcción son:

- 1) Detección de contornos
- 2) Edición de contornos
- 3) Subdivisión y extensión de contornos
- 4) Edición de extensiones
- 5) Construcción de patches
- 6) Redistribución de los patches
- 7) Edición de patches
- 8) Identificación y corrección de los errores de los patches
- 9) Construcción de la malla
- 10) Resaltar contornos
- 11) Proyección a la superficie
- 12) Comparación con la base

Este proceso no es lineal, por ejemplo la identificación de errores se realiza en la mayoría de procesos a forma de control, para no llegar al final con una malla que no se puede corregir. Encontrando errores en los patches como un ángulo muy estrecho, intersección de los patches, esquinas con un ángulo muy alto o con una distancia muy grande con respecto a sus vecinos.

Estos procesos dependen en gran medida de la detección de la superficie inicial, lo cual es una limitante, ya que en modelos con una geometría homogénea, la detección de los contornos es factible, pero en modelos con diferencias métricas muy grandes como un edificio se dificulta esa detección, ya que se detectan solo las grandes superficies, por lo cual los detalles como ventanas hay que encontrarlos manualmente, siendo una constante en la construcción de los contornos y la construcción de los patches, convirtiendo un proceso semiautomático, en uno manual.

Por ello para este tipo de malla se realizó tanto el modelo del capitel como el de Drassanes, para comparar la precisión en un tipo de malla con diferencia en la detección en los contornos

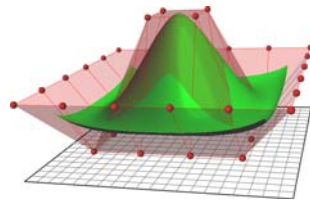
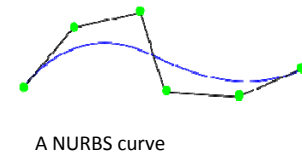


Figura 4.30: Superficies NURBS

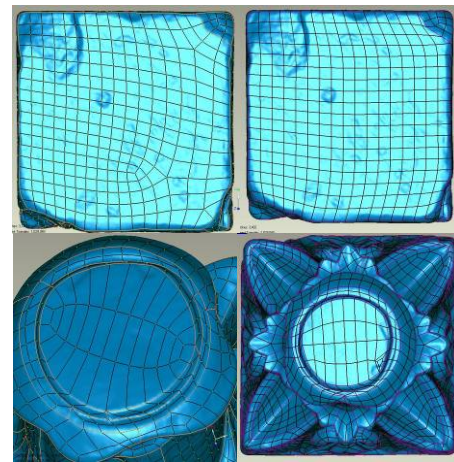


Figura 4.31: Errores en los paths antes y después



Figura 4.32: Fases del Shape Phase con la información del Laser escáner Minolta

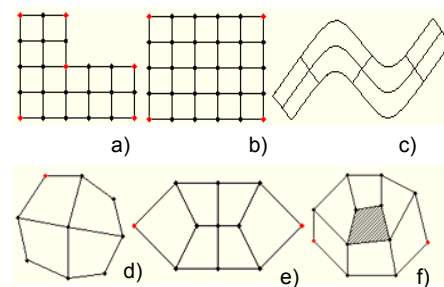


Figura 4.33: Corrección de los patches. a) Detección automática, b)Malla, c)Strip, d)Circular, e)Elíptica, f)collar

<sup>60</sup> Las Nurbs (Non-uniform rational B-spline) se define por puntos de control en cierto orden y por vectores, generada por dos B-splines, curva Bézier y superficies, la principal diferencia comienza en el peso de los puntos de control, que racionalizan la curva. Donde las curvas de nurbs se generan en una dirección paramétrica, usualmente llamada “S” o “U”, las superficies de nurbs se generan en dos direcciones paramétricas llamadas “S” y “T” o “U” y “V”

## Fashion Phase y modelos de construcción paramétrica:

El proceso de reconstrucción de la malla desde el Fashion Phase se diferencia del Shape Face, en que el fashion shape no busca solo la identificación de la superficie para remallarla, sino que busca identificar la geometría de la superficie, reteniendo este dato paramétrico en la malla, permitiendo que esta se pueda modificar desde la información asociada de cada superficie del modelo.

El proceso de Fashion shape comienza con la detección de los contornos de la geometría y los expande, a partir de estas expansiones se procede a detectar la tipología de la superficie de cada zona entre aristas del modelo, entre superficies planas, cilíndrica, cónica, esférica, formas libres, extrusiones, drafted extrusions y rotacionales.

Ello ayuda en la construcción de primero de las mallas de las zonas clasificadas, al relacionar los vértices creados en las expansiones de la selección de las aristas, siendo una limitante como veremos a continuación ya que al no tener más puntos de control en puntos intermedios de las zonas a mallar se aleja del promedio de la superficie del modelo.

Posteriormente al mallado de las zonas intermedias entre aristas se procede a crear las uniones entre estas caras por medio de las aristas, que se recalculan teniendo en cuenta las mallas de las zonas clasificadas, lo cual también es una limitante para la precisión exigida en esta tesis por modificar el detalle de las aristas.

Por otra parte se considera fundamental la identificación de la geometría de la superficie, en el proceso de promediar el detalle de la malla de alta resolución poligonal de la tecnología de escáner laser, por lo cual se estudio sus límites y restricciones actuales, llegando al punto de plantear que aspectos deben ser reforzados para generar modelos que representen con mayor precisión la geometría de las mallas.

Comparación entre mallas de los contrafuertes de las Drassanes:

- **Decimación de un Fashion Phase vs malla sin filtros:** La resolución de la malla se tomo en relación a la resolución de los bordes del modelo, ya que al tener mayor detalle necesita una mayor resolución y para mantener la continuidad de la malla se procedió a generar una malla de nurbs de 531 caras en las zonas clasificadas, con 1280 caras en los bordes, siendo estas subdivididas en 200.000 polígonos. Esta malla de nurbs se convirtió únicamente en polígonos, realizando esta conversión de la malla por problemas de compatibilidad con aplicaciones de modelado y de CAD.

La construcción de la malla mantiene una continuidad que se ve afectada por la resolución y la distribución de los polígonos de los contornos, manteniendo una continuidad limitada.

Esta malla de 200.000 polígonos se redujo a 24.000 polígonos (12%), lo cual desordeno los vértices, modificando la continuidad de la malla, planteado la imposibilidad de modificar las mallas de Fashion Phase por decimación, o procesos de filtrado.

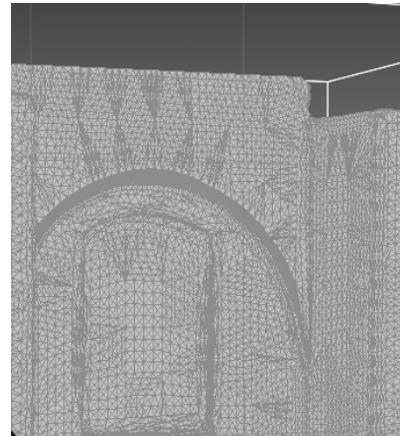


Figura 4.35: Clasificación automática, 200001 polígonos

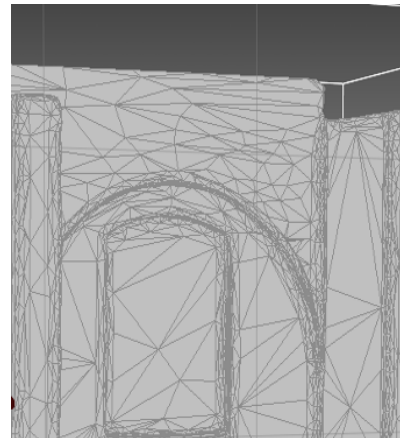


Figura 4.36: Decimación de 200001 a 24000

	Clasificación automática 200001 polígonos	Decimación de 200001 a 24000
Número de caras	76305	9265
<b>Desviación del modelo</b>		
Núm. Vértices efectivos	987498	955396
Distancia mínima	0	0
Distancia máxima	0,30962	0,30761
Distancia media	0,00644	0,00645
Desviación estándar	0,00778	0,00768
<b>Desviación malla/malla</b>		
Distancia mínima	-0,3075	-0,30761
Distancia máxima	0,30611	0,30725
Distancia media	0,00016	0,00015
Desviación estándar	0,01009	0,01012
<b>Curvatura Análisis</b>		
Máxima	2,1188	2,02917
Mínima	-2,5284	-2,5267
Desviación estándar	0,1649	0,31518

Tabla 12.1: Comparación de la malla de la nube de puntos sin filtrar y la malla de Fashion antes y después de filtrar (se filtro por el tener un número alto de polígonos desorganizando la estructura de la malla)

- Fashion Phase clasificación automática:** Debido a que no se debe realizar reducciones poligonales a esta tipología de malla, se procedió a buscar la mínima resolución en el proceso de construcción de la malla delimitada por los vértices identificación de los bordes del modelo, la cual fue de 42.204 polígonos, con 531 caras y 1280 bordes igual que la malla anterior, ya que depende de la detección y expansión de los contornos. Se realizó una malla de 80.000 polígonos, para comparar los problemas de resolución con las mallas anteriores. Los bordes de estos dos modelos se generaron tangencialmente, con el mayor número de puntos de control para generar el ángulo necesario para las esquinas.

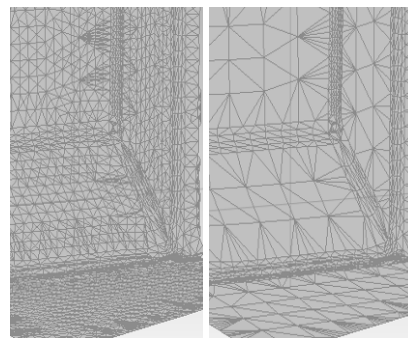


Figura 4.37: Fashion Phase: Clasificación automática 80.000 y 42.204 polígonos respectivamente

	Clasificación automática 80000 polígonos	Clasificación automática 42204 polígonos
Número de caras	32259	17897
<b>Desviación del modelo</b>		
Núm. Vértices efectivos	966227	959245
Distancia mínima	0	0
Distancia máxima	0,30749	0,31212
Distancia media	0,00657	0,00665
Desviación estándar	0,00788	0,00795
<b>Desviación malla/malla</b>		
Distancia mínima	-0,30749	-0,31212
Distancia máxima	0,30695	0,30887
Distancia media	0,00017	0,0001
Desviación estándar	0,01032	0,01044
<b>Curvatura Análisis</b>		
Máxima	2,1188	2,1188
Mínima	-2,52802	-2,53099
Desviación estándar	0,21288	0,27216

Tabla 12.2: Comparación de la malla de la nube de puntos sin filtros y la malla reconstruida por FAsion Phase a una resolución de 80.000 v 42.204 polígonos.

- Fashion Phase clasificación automática construcción de borde por curvatura:**

Posterior a la construcción de las superficies clasificadas, se procede a reconstruir los bordes que las unen, teniendo en cuenta tanto los límites de las superficies previamente malladas, como la detección de las aristas y su expansión previa a la clasificación. Para esta reconstrucción intervienen ciertos parámetros definidos por el usuario, en las mallas anteriores se utilizó el máximo número de puntos de control, una proyección tangencial y el mínimo de suavizado, por lo contrario a modo de comprobación se procedió a generar estas esquinas con una proyección de curvatura en lugar de una tangencial y se malló a la mínima resolución de 42.204 polígonos.

	bordes por curvatura malla de 42204 pol.
Número de caras	8223
<b>Desviación del modelo</b>	
Núm. Vértices efectivos	950915
Distancia mínima	0
Distancia máxima	0,31252
Distancia media	0,01363
Desviación estándar	0,02335
<b>Desviación malla/malla</b>	
Distancia mínima	-0,31195
Distancia máxima	0,31252
Distancia media	0,00116
Desviación estándar	0,02745
<b>Curvatura Análisis</b>	
Máxima	2,7062
Mínima	-1,72306
Desviación estándar	0,23857

Tabla 12.3: Comparación malla de la nube de puntos sin filtros y malla Fashion Phase con bordes por curvatura.

- Fashion Phase clasificación manual como planos:**

A modo de comparación se reclasificó la superficie de las mallas, identificándolas como superficies planas y cilíndricas, para ser comparadas con las generadas por la clasificación de la nube de puntos del proceso anterior de reducción de mallas.

	Clasificación planos 200000 polígonos
Número de caras	78199
<b>Desviación del modelo</b>	
Núm. Vértices efectivos	979163
Distancia mínima	0
Distancia máxima	0,3099
Distancia media	0,00755
Desviación estándar	0,00891
<b>Desviación malla/malla</b>	
Distancia mínima	-0,30577
Distancia máxima	0,31167
Distancia media	0,00065
Desviación estándar	0,01166
<b>Curvatura Análisis</b>	
Máxima	3,1215
Mínima	-2,35009
Desviación estándar	0,16805

Tabla 12.4: Comparación entre la malla de la nube de puntos sin filtro y la malla clasificada proyectada a planos y cilindros.

**Comparaciones representativas de los procesos de reducción poligonal:**

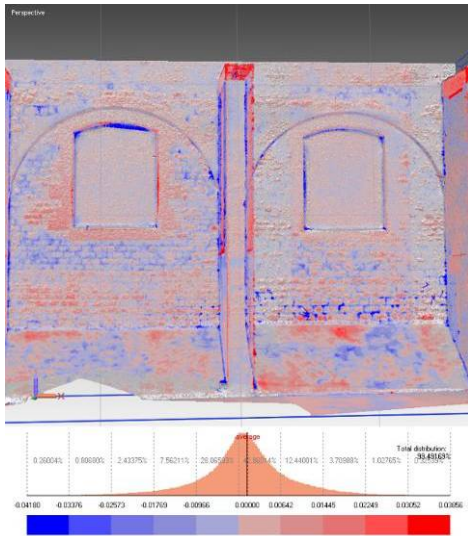


Figura 4.38: Desviación del modelo vectores: Fashion Phase clasificación automática 42.204 Δ

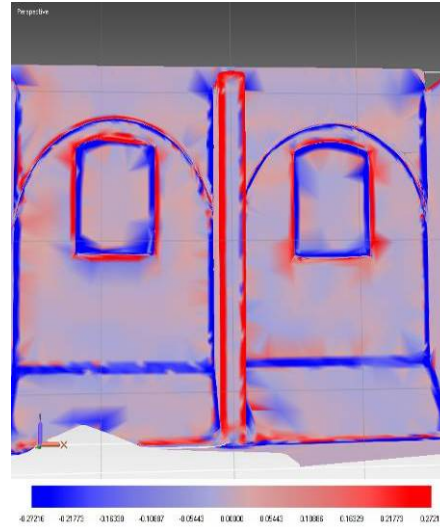


Figura 4.39: Análisis de curvatura: Fashion Phase clasificación automática 42.204 Δ

Con este modelo podemos comprobar los problemas de promedio de la malla, por una parte negativos al generar zonas en las que se aleja del promedio de la superficie, marcando un relieve identificable que no fue asumido en la detección de puntos de control para generar la malla, pero por otra parte la superficie de la malla es homogénea, exceptuando zonas de borde de la malla o las aristas más pronunciadas.

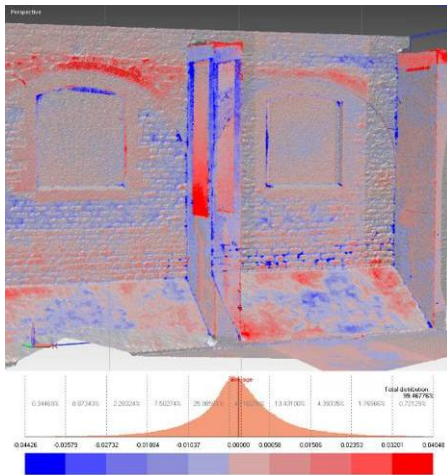


Figura 4.40: Desviación del modelo vectores: Fashion Phase clasificación como planos 42.204 Δ

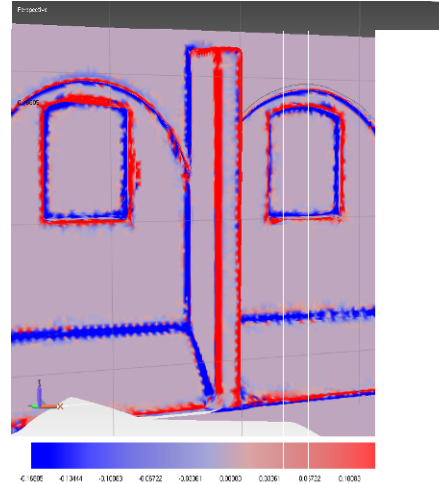


Figura 4.41: Análisis de curvatura: Fashion Phase clasificación como planos 42.204 Δ

Este modelo tiene más similitudes con el clasificado de forma automática de lo que se esperaba, ya que algunas zonas mantienen el mismo error en cuanto al promedio de los planos, pero en otras zonas este error aumento como en las partes superiores de los arcos.

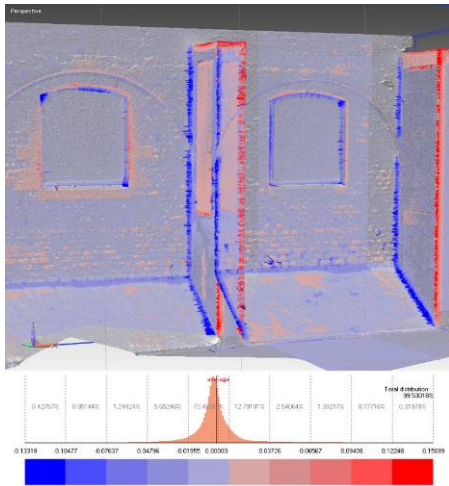


Figura 4.42: Desviación del modelo vectores: Fashion Phase clasificación automática bordes por curvatura 42.204

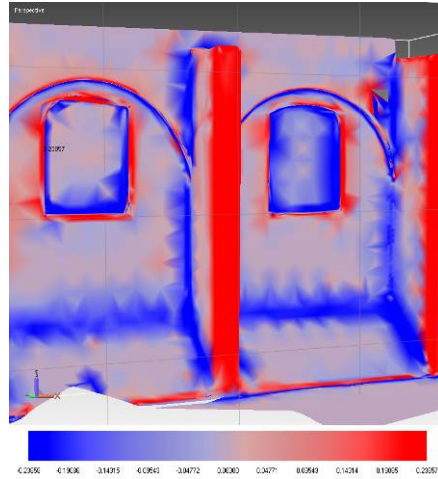


Figura 4.43: Análisis de curvatura: Fashion Phase clasificación automática bordes por curvatura 42.204 Δ

Con esta comparación logramos identificar la importancia de las aristas en el promedio del error entre mallas, ya que al tener mayor resolución poligonal el error es más marcado. También nos permite ver como se degrada la curvatura de una malla a otra, lo cual no sucede en el modelo base, afectando sobretodo a la parte frontal de los contrafuertes.

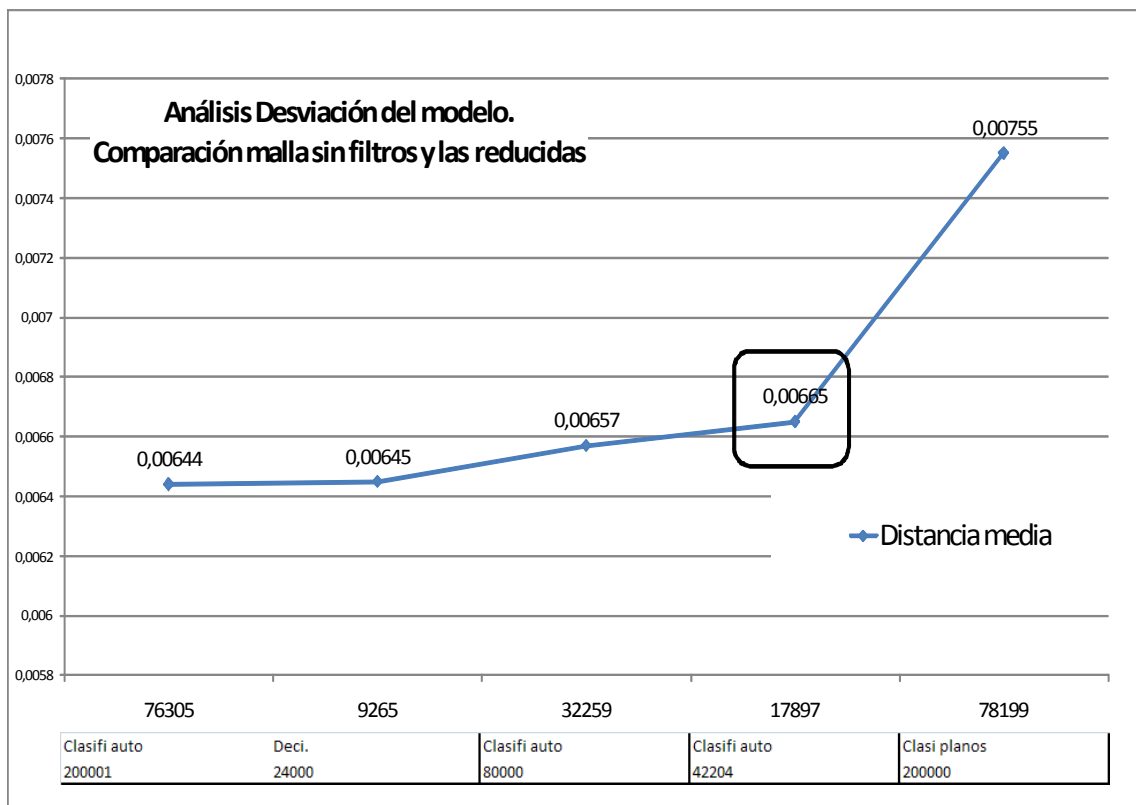


Figura 4.44: Análisis desviación del modelo. Comparación sin filtros y las reducidas.

En esta figura vemos que la distancia media es muy alta para los modelos de reconstrucción de mallas semiautomáticos, destacando por ello sobre todos los modelos analizados, sobretodo el clasificado como planos.

## Metodología de Surface Phase:

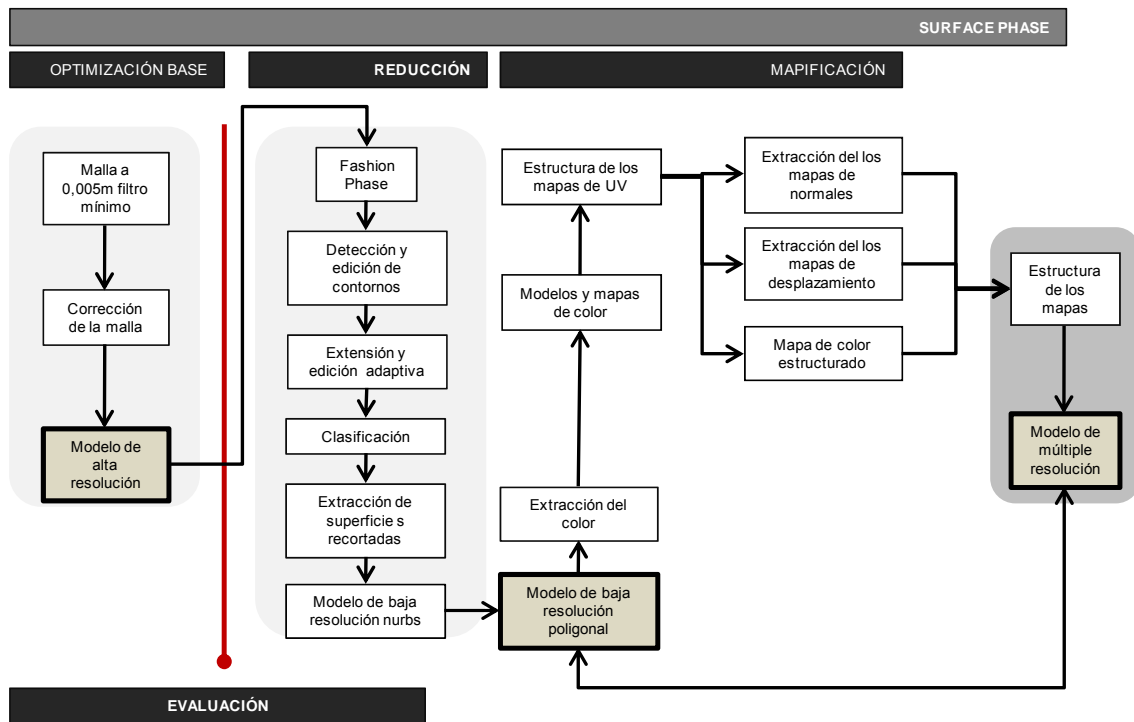


Figura4.45: Metodología propuesta para reconstruir una malla desde Surface Phase

La metodología del Surface Phase se orienta hacia el fashion Phase, por ser un proceso de reconocimiento y clasificación geométrica. El cual parte de la detección de los contornos y su expansión, precisando de una corrección manual de las irregularidades, como intercepciones, zonas que no se detectaron bien, regiones mal configuradas y puntos sueltos. El paso posterior es la clasificación de las superficies siguiendo las aristas y la geometría del modelo base, posteriormente estas superficies se cortan según la malla base y las aristas. Al tener las superficies se procede a detectar las aristas, las cuales se malla de forma tangencial, con el mayor número de puntos de control permitido, generando la estructura que permite la extracción de la malla, la cual puede ser creada en diferentes resoluciones poligonales y en diferentes formatos, en este caso como polígonos y en la menor resolución poligonal permitido por la configuración inicial de las aristas.

Al ser un modelo que parte de nurbs se mantienen los ordes rectos aunque estos estén subdivididos en polígonos, lo cual permite desdoblar las UV, pero al ser una malla libre se limita el control de la escala del modelo en el espacio UV, ya que las superficies complejas no se pueden expandir con el tamaño de los polígonos, de igual forma la sobre-segmentación de las aristas es una limitante para encontrar el limite entre planos.

### Ventajas de los procesos semiautomáticos

- Bordes homogéneos entre segmentos: Soluciona el problema de contornos irregulares, entre mallas tanto en el espacio UV como en el modelo, permitiendo unir mallas o desdoblar planos.
- Pequeño formato en modelos homogéneos: Los modelos de geometría curva y homogénea pueden generarse con nurbs reduciendo el tamaño de los archivos, en



comparación a los modelos poligonales, tanto con el Shape Phase como con el Fashion Phase.

- Mallas uniformes: Los modelos de Nurbs correctamente generados tienen mayor densidad poligonal entre planos y están regularmente distribuidos.
- Identificación de errores: En cada etapa de convertir el modelo poligonal a nurbs se puede comprobar los errores que se generan para no agravarlos en las etapas siguientes.
- Corrección de la normal: Se corrige la dirección de la normal en zonas con problemas.
- Desplazamiento en el renderizado: Las nurbs permiten un mayor desplazamiento evitando subdividir el modelo en el proceso de renderizado para alcanzar todo el detalle.
- UV automáticas: se parametrizan las UV automáticas con una conectividad global y la continuidad de G1 esta garantizada a través de los patches.
- Parametrización: La identificación y clasificación geométrica, permite parametrizar el modelo y exportar estas entidades modificables en programas de prototipado, ingeniería industrial y mecánica, como solidworks, los cuales permiten rediseñar un modelo industrial escaneado.

### **Problemas de los procesos semiautomáticos**

- Pérdida de detalle: Se pierde detalle al generar las superficies nurbs, ya que estas se calculan a partir de la detección de contornos en el proceso de identificación de la forma, perdiendo precisión en el reconocimiento de la geometría si se comparan con el promedio de la superficie.
- Problema de escala en la detección automática: La selección por curvatura no logra identificar correctamente los bordes cuando hay saltos de tamaño en la superficie muy grandes, uniendo vértices cercanos como en las paredes perpendiculares a la superficie o los detalles de la superficie, si se realiza la selección por curvatura. En el proceso de Shape Phase si se corrige esta identificación manualmente, sigue con problemas en las etapas posteriores de generación de los patch, pasando de un proceso semiautomático a uno manual. Contrario a ello en el proceso de Fashion Phase se pueden corregir o generar manualmente las detecciones de los contornos y las etapas posteriores de clasificación construcción de mallas son automáticas.
- Interacción entre programas: Las nurbs generadas desde programas de ingeniería inversa no se pueden importar en la mayoría de programas de modelado convencionales, aunque estos trabajen con nurbs. Lo cual se pasa las superficies nurbs a poligonales, las cuales para igualar la geometría de las nurbs necesitan una subdivisión excesiva, obligando a reducir el número de polígonos de este, perdiendo precisión en el modelo, comparado con mallas con la misma resolución poligonal simplificadas con algoritmos para lograr una reducción más lógica de la superficie.
- Pérdida de los Quads: Al pasar el modelo a polígonos se pierde su propiedad de Quads, ya que los polígonos se dividen en triángulos, aumentando el número de polígonos y dificultando la modificación del modelo en programas de modelado, en los cuales la continuidad de las líneas es indispensable.
- Limitantes de las nurbs en programas de modelado: Las nurbs no son fácilmente modificables ya que se generan como superficies continuas y al mover sus vértices se desplaza información no deseada, siendo un proceso de modificación complejo.

## 4.2.2 Retopología

La retopología consiste en reconstruir una malla utilizando otra como base, por lo general es una técnica utilizada en programas de modelado pero sobre todo en programas de "Image base sculpting"<sup>61</sup> 3D, ya que la escultura se realiza presionando, extrayendo, aumentando resolución, o adicionando mallas de forma intuitiva, por lo cual se generan mallas desorganizadas, que tienen que ser reconstruidas si van a ser utilizadas posteriormente en campos como la animación, texturizado, entre otros.

Se ha planteado la dificultad de utilizar programas de image sculpting para extraer mapas de desplazamiento de modelos de escáner laser, afirmando: "Unfortunately, it is impossible to unambiguously figure out any correspondences between vertices of pairs of arbitrary polygonal models, which renders this approach virtually unusable for models obtained from laser 3dscanners or any other geometry reconstruction devices, models represented by non-quadrant polygons or models created by means of any other modeling software"<sup>62</sup>. Siendo una verdad a medias, ya que no se puede extraer los mapas con mallas que no sean quads o entre modelos alta y baja resolución creados en otras aplicaciones, pero la retopología permite reconstruir la malla y proyectarla sobre el modelo de escáner laser aumentando la resolución.

La retopología a partir de la información de modelos de escáner laser tiene diferencias significativas a los procesos tradicionales desde el campo del modelado:

- Malla abierta: Al ser superficies que no se cierran, existen problemas en las terminaciones del modelo, las cuales hay que reforzar para disminuir que se curven en la subdivisión del adaptive skinning.
- Modelos orgánicos: El adaptive skinning está diseñado para proyectarse sobre modelos orgánicos, por lo cual en modelos rectangulares como los edificios hay que tener mayor cuidado en la intercepción de los planos, para que no se curven, aumentando la precisión y la resolución de estas zonas.
- Proximidad de superficies relacionado con que la malla sea abierta: Al no ser mallas continuas por estar interrumpida en los extremos al ser una malla abierta, estos puntos tienden a proyectarse en sentido contrario si no están colocados con cierto nivel de precisión
- Irregularidad de los contornos: Complementando la anterior, al dividirse el adaptive skinning pueden quedar puntos en el aire, ya que la malla de laser escáner tiene los bordes en cierra, por ello hay que convertir los bordes de la malla base en bordes lineales.
- Escala de los modelos importados: Existe una dificultad técnica en unir la malla base con una malla usada para la Retopología, por problemas de escalas solucionables, pero que varían entre modelos.
- Huecos en la adaptive skin:

Esta reconstrucción se realiza mediante puntos de control que se adhieren a la malla base, siguiendo un orden pre planificado, esta planificación se logra al dibujar sobre el modelo 3D líneas guías que siguen la geometría, buscando principalmente:

- Seguir la geometría de las superficies



Figura 4.46: Planificación de la retopología

<sup>61</sup> Son programas que se basan en el modelado de alta resolución poligonal como zbrush y mudbox, el primero fue presentado por Ofer Alon y Jack Rimokh de la compañía Pixologic Inc en el SIGGRAPH de 1999 y el segundo fue introducido por Autodesk en el 2008.

<sup>62</sup> TISEVICH, Ilya, Displacement and Normal Map Creation For Pairs of Arbitrary Polygonal Models Using GPU and Subsequent Model Restoration, Department of Computational Mathematics and Cybernetics Moscow State University, Moscow, Russia, 2007. [http://www.graphicon.ru/2007/proceedings/Papers/Paper\\_43.pdf](http://www.graphicon.ru/2007/proceedings/Papers/Paper_43.pdf)

- Generar una retícula de cuadrados (quads) evitando las triangulaciones, ya que rompen la continuidad de los bordes impidiendo la manipulación en el modelado.
- Marcar las aristas buscando la continuidad de los quads, ya que zonas muy densas necesitan mayores subdivisiones y estas tienen que continuar a lo largo del modelo.
- La malla base no debe tener bordes de cierre y en el caso de tenerlos hay que evitarlos puesto que al subdividir la malla no tendrían referencia para proyectarse.

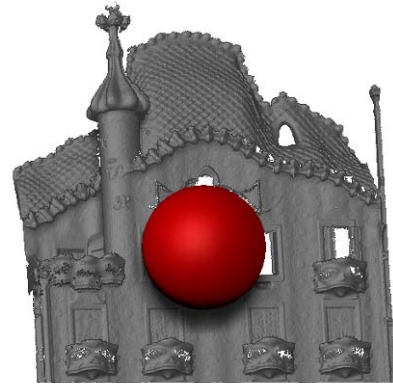


Figura 4.47: Malla de alta resolución adjunta a la sphere

Pixel<sup>63</sup>: En un espacio 2.5D el pixel es la unidad mínima que almacena la información, lo que en imágenes 2D sería el pixel y almacena la posición x,y,z el color y hasta la textura de un modelo 3D dentro de un espacio 2.5D. Dando la posibilidad de generar modelos de alta resolución de millones de polígonos, que dependiendo de la plataforma utilizada puede llegar a ser ilimitado.

The Pixel (2D)	The Pixel (2.5D)
Color	Color
Posición en X Y	Posición en X Y
Sin información de profundidad	Con información de profundidad (Z)
Sin información del material	Con información del material

Tabla 13.1: Comparación entre Pixel y pixel.

Zphere: Es una aplicación que permite generar la base de modelos orgánicos complejos, mediante una estructura de esferas, que se usa para la retopología porque permite relacionar una malla de alta resolución a una malla de retopología, siendo la esfera la entidad que convierte los puntos de retopología en una malla.

Resolución dinámica "ADAPTIVE SKIN": Este tipo de piel se refiere a la capacidad de mover los vértices de una superficie en torno a una malla, primero subdividiendo esta malla según se requiera y después proyectando los vértices en un radio preestablecido. Esto nos permite hacer que la retopología llegue a tener la misma o mayor resolución poligonal que la malla base, adquiriendo el detalle de la superficie en una malla ordenada.

Niveles dinámicos de resolución: Al proyectar la malla con el "adaptive skin", se logra tener un modelo con los polígonos de la base de la retopología y cada uno de los niveles a los cuales fue subdividida. Permite trabajar sobre cada uno de los niveles alterando los que están por encima o por debajo, lo cual nos permite pasar al nivel de menor resolución y alterar la base de la malla, como sería el reemplazar el mapa de UV o modificar proyecciones erróneas.



Figura 4.48: Malla de alta resolución y trama de la retopología

+

<sup>63</sup> [http://www.pixologic.com/docs/index.php/How\\_Pixels\\_Work](http://www.pixologic.com/docs/index.php/How_Pixels_Work)

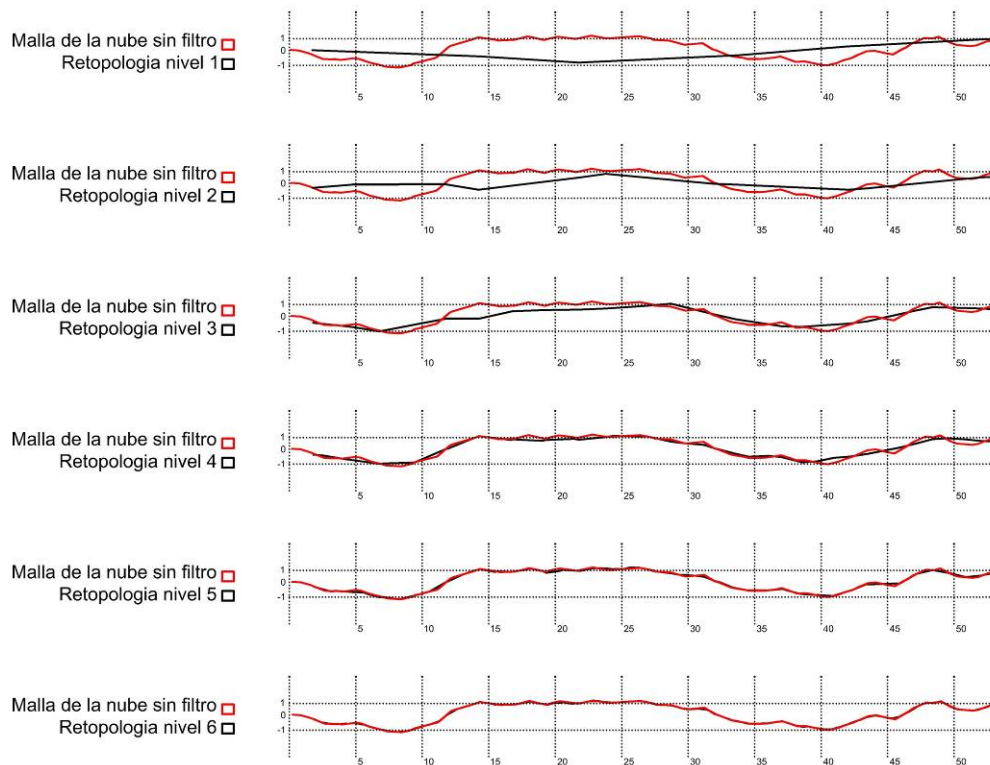


Figura 4.49: Secciones por niveles de la malla de retopología.

Estas subdivisiones se pueden prever de la siguiente forma:

$$\text{Total máxima resolución} = \text{Base} \times 4^{(\text{numero de divisiones}-1)}$$

$$\text{Base} = \text{Total máxima resolución} / 4^{(\text{numero de divisiones}-1)}$$

núm. divisiones	6
base	7000
Total máx. res.	7168000

tengo actualmente modelo 4	
núm. Divisiones	6
base	3574
Total máx. res	3659776

núm. Divisiones	6
base	6000
Total máx. res	6144000

tengo actualmente modelo 5	
núm. Divisiones	6
base	6773
Total máx. res	6935552

núm. Divisiones	6
base	5000
Total máx. res	5120000

tengo actualmente modelo 6	
núm. Divisiones	5
base	15795
Total máx. res	4043520

núm. divisiones	6
base	4000
Total máx. res	4096000

núm. Divisiones	5
base	15000
Total máx. res	3840000

núm. Divisiones	5
base	20000
Total máx. res	5120000



Figura: Retopología sin proyección con la textura de la nube de puntos,

Tabla 13.2: Número de quads según los niveles de resolución definidos.

**Comparación entre mallas de los contrafuertes de las Drassanes:**

- Retopología sin proyección vs malla base:**  
 La retopología consiste en reconstruir una malla a partir de puntos aplicados manualmente sobre una malla de mayor resolución o sobre una malla desorganizada, pero ello no implica que se tenga un grado alto de precisión, ya que al ser un proceso visual de colocar los puntos, el desplazarse un poco implica poner el punto no en la arista sino en uno de los planos, generando errores de precisión importantes. Se incluyó esta malla en la comparación para constatar hasta que punto se pierde precisión en este proceso, reconociendo que la malla que se puede generar es la inferior en términos de número de polígonos, que con la información de color permite la interpretación del modelo.

	Sin proyección
Nivel de subdivisión	
<b>Número de caras</b>	1350
<b>Desviación del modelo</b>	544
Núm. Vértices efectivos	918201
Distancia mínima	0
Distancia máxima	0,29556
Distancia media	0,04137
Desviación estándar	0,03504
<b>Desviación malla/malla</b>	
Distancia mínima	-0,31257
Distancia máxima	0,31269
Distancia media	-0,02281
Desviación estándar	0,04969
<b>Curvatura Análisis</b>	
Máxima	1,15219
Mínima	-0,8343
Desviación estándar	0,39125

Tabla: Comparación entre malla de la nube de puntos sin filtrar con la malla de retopología sin adaptive Skin.

- Retopología sin tener en cuenta la dirección de los Quards entre planos vs malla base:**  
 La retopología permite generar mallas rectangulares, el problema surge al subdividir las en varios millones y la dirección de los vértices a una alta resolución es difícil de determinar, sumado con la dificultad de plantear una malla solo con quards para que tenga una continuidad en todas las direcciones, permitiendo seleccionar líneas completas del modelo, lo cual es muy favorable desde el punto de vista del modelado. Ello nos permitió determinar la forma en que se deben interceptar estos planos, siendo directa y no escalonada, ya que al escalonar los puntos de retopología en el momento de unir los planos hacen que al subdividirse sobre este escalonamiento gire la dirección de los vértices, impidiendo que a una alta resolución los vértices cercanos a las aristas estén a posiciones irregulares.

	Curva de vértices
Nivel de subdivisión	3
<b>Número de caras</b>	120928
<b>Desviación del modelo</b>	48793
Núm. Vértices efectivos	966401
Distancia mínima	0
Distancia máxima	0,3071
Distancia media	0,00378
Desviación estándar	0,00604
<b>Desviación malla/malla</b>	
Distancia mínima	-0,30794
Distancia máxima	0,30857
Distancia media	0,00002
Desviación estándar	0,00738
<b>Curvatura Análisis</b>	
Máxima	0,66666
Mínima	-0,78726
Desviación estándar	0,14259

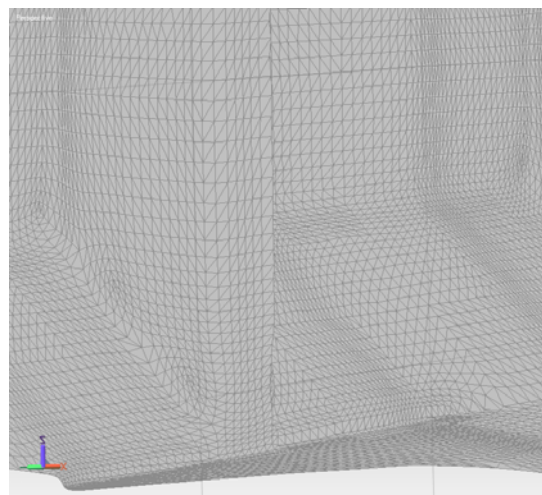


Figura 4.51: Comportamiento de las mallas de retopología en superficies ortogonales.

Tabla 13.3: Comparación entre malla de la nube de puntos sin filtrar con la malla de retopología en superficies rectangulares con adaptive skin. Problemática de lo la

- Retopología intercepción de plano, control sobre las aristas vs modelo base:** La malla de retopología al subdividirse en el adaptive skinning tiende a suavizar la malla, redistribuyendo los vértices para proyectarlos sobre la malla de alta resolución, generando un problema en el modelo de menor resolución poligonal, ya que hay que predecir este desplazamiento para reducirlo y que el modelo de retopología en su nivel más bajo no se aleje del modelo de malla de base. Para ello se refuerzan las esquinas del modelo, mediante la subdivisión de la malla en todas las esquinas, permitiendo tener una mayor resolución en estas zonas, e impidiendo que las desplace el proceso de proyección sobre la malla base.

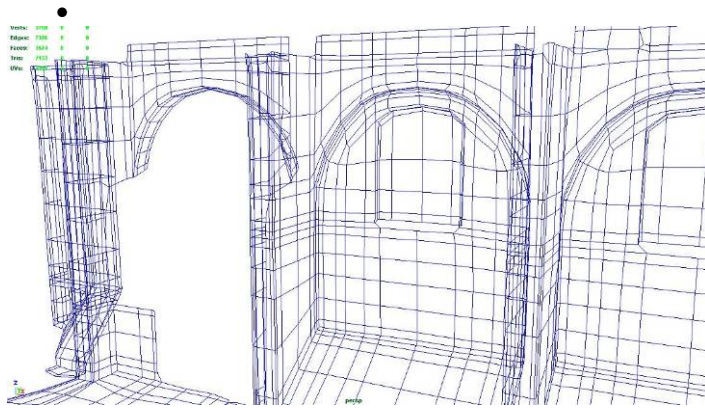


Figura 4.52: Estructura de la retopología reforzando las aristas.

	Retopología intercepción de planos					
Nivel de subdivisión	1	2	3	4	5	6
Poligonos de la muestra						
<b>Desviación del modelo</b>	2803	11332	45696	180674	716080	2875105
Núm. Vértices efectivos	941980	946150	962448	1027963	1289997	2338895
Distancia mínima	0	0	0	0	0	0
Distancia máxima	0,3068	0,3026	0,3007	0,29593	0,31037	0,31112
Distancia media	0,00691	0,0048	0,0038	0,00295	0,00254	0,00252
Desviación estándar	0,01004	0,00642	0,00515	0,00439	0,00425	0,00453
<b>Desviación malla/malla</b>						
Distancia mínima	-0,30124	-0,3026	-0,29426	-0,29593	-0,29682	-0,30001
Distancia máxima	0,31091	0,29151	0,3007	0,28376	0,31037	0,30989
Distancia media	0,00007	0,00009	0,00036	0,00026	0,00028	0,00028
Desviación estándar	0,01232	0,00817	0,00654	0,00544	0,00499	0,00491
<b>Curvatura Análisis</b>						
Máxima	1,2272	1,06813	1,91291	2,19652	2,62727	2,88257
Mínima	-1,65634	-2,08179	-2,65252	-2,27936	-2,44839	-3,00514
Desviación estándar	0,25043	0,18971	0,13881	0,10393	0,09012	0,08274

Tabla 13.4: Comparación de la malla y la nube de puntos sin filtro y la retopología con las aristas reforzadas.

- Retopología corrección manual de vértices y mayor resolución vs malla base:** En el proceso de proyección de la malla en zonas estrechas algunos puntos de la retopología se proyectaron a caras diferentes a las que les correspondía, para solucionar este problema hay dos caminos uno disminuir la distancia entre los refuerzos de las aristas y las aristas, generando un problema ya que toda la malla de retopología tendría que aumentar de resolución, la otra solución es acercar tanto reducir el error moviendo los vértices manualmente, por una parte alejándolos de los puntos conflictivos o acercándolos más al vértice al que se quiere que se proyecten.

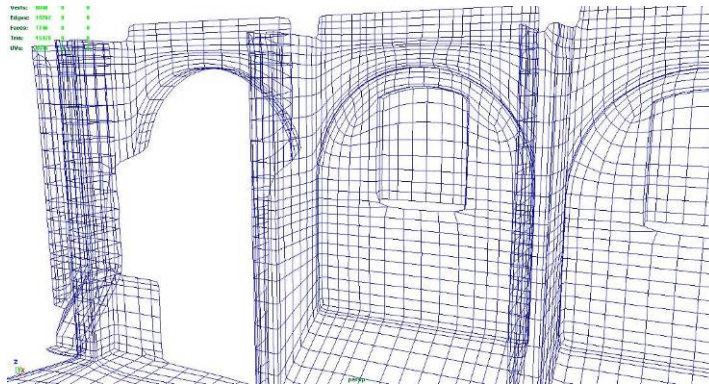


Figura 4.53: Retopología con vértices más precisos, corregidos manualmente y mayor resolución de la malla.

	Corrección manual de vertices, mayor resolución				
Nivel de subdivisión	1	2	3	4	5
Poligonos de la muestra	5513	22066	88236	353288	1413945
<b>Desviación del modelo</b>					
Núm. Vértices efectivos	941185	949644	981609	1115006	1643338
Distancia mínima	0	0	0	0	0
Distancia máxima	0,30906	0,29796	0,30869	0,30678	0,308
Distancia media	0,00625	0,00418	0,00274	0,00158	0,00077
Desviación estándar	0,0092	0,00589	0,004	0,00284	0,00244
<b>Desviación malla/malla</b>					
Distancia mínima	-0,30906	-0,30557	-0,2996	-0,30558	-0,30163
Distancia máxima	0,31224	0,31261	0,30869	0,30678	0,31171
Distancia media	0,00013	0,0001	0	-0,00001	0
Desviación estándar	0,01127	0,0074	0,00514	0,00366	0,00297
<b>Curvatura Análisis</b>					
Máxima	0,65197	1,71593	1,74768	1,94389	1,99024
Mínima	-0,76916	-2,23987	-1,68275	-1,90582	-1,83371
Desviación estándar	0,21912	0,18358	0,14232	0,11863	0,11008

Tabla 13.5: Comparación de la malla de la nube de puntos sin filtros y la malla de retopología con mayor precisión en los vértices de las aristas y mayor resolución.

- Retopología modelo homogéneo (modelado): La malla de retopología de un nivel a otro crece exponencialmente, por lo cual hay que determinar el número de quads necesarios para llegar a cierto nivel de resolución de la malla, por lo cual se realizó un análisis para determinar el nivel de resolución necesario para obtener una mínima pérdida de información de la malla explicado en el capítulo 5.1.4 Resolución de la malla para recuperar el detalle. Determinando que se necesitan 60.000 polígonos por metro cuadrado para recuperar el detalle mediante una malla homogénea, ya que el área de nuestro modelo es de 563 m<sup>2</sup>, se necesita una resolución de 3'378.000

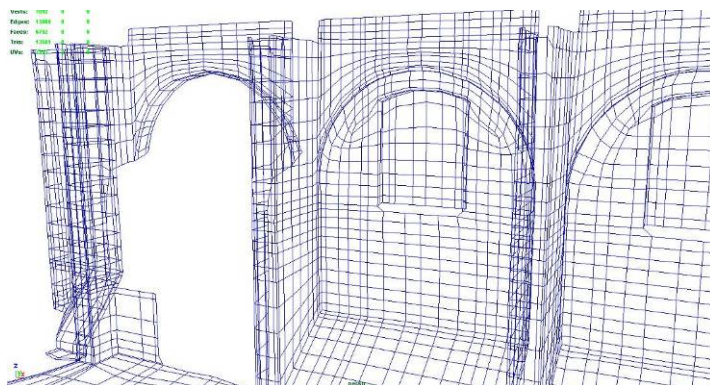


Figura 4.54: Malla de retopología de mayor resolución, con una distribución homogénea de los vértices en promedio cada 10cm.

	Retopología homogénea				
Nivel de subdivisión	1	2	3	4	5
Polígonos de la muestra	6169	24675	98827	395669	1581719
<b>Desviación del modelo</b>					
Núm. Vértices efectivos	942597	952046	990477	1138991	1730109
Distancia mínima	0	0	0	0	0
Distancia máxima	0,30389	0,30863	0,30874	0,30248	0,3075
Distancia media	0,00595	0,00411	0,0027	0,00161	0,00092
Desviación estándar	0,0089	0,00553	0,00378	0,00278	0,00217
<b>Desviación malla/malla</b>					
Distancia mínima	-0,31076	-0,30306	-0,30874	-0,30975	-0,30259
Distancia máxima	0,31024	0,31041	0,29858	0,31052	0,30654
Distancia media	0,00014	0,00003	0	-0,00002	-0,00002
Desviación estándar	0,01087	0,00706	0,00491	0,00367	0,00299
<b>Curvatura Análisis</b>					
Máxima	0,71637	1,24858	1,69899	1,63195	1,70757
Mínima	-2,9333	-0,77509	-1,70838	-1,59716	-1,74188
Desviación estándar	0,22782	0,16798	0,12622	0,10634	0,10405

Tabla 13.6: Comparación de malla de la nube de puntos sin filtros y malla de retopología con mayor resolución 1 vértice cada 10cm en promedio.



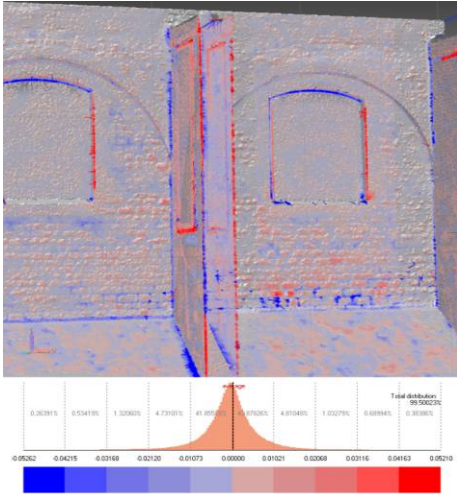


Figura 4.55: Desviación del modelo, representación con vectores: Retopología homogénea, nivel de proyección 1

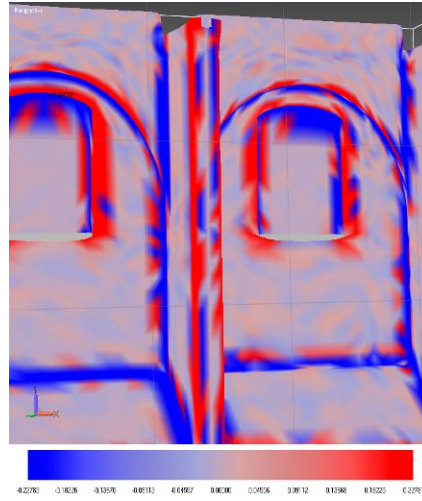


Figura 4.56: Análisis por curvatura: Retopología homogénea, nivel de proyección 1

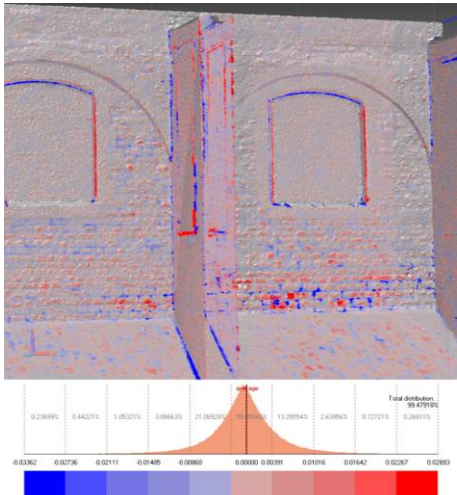


Figura 4.57: Desviación del modelo representado con vectores: Retopo. homogénea, nivel de proyección 1

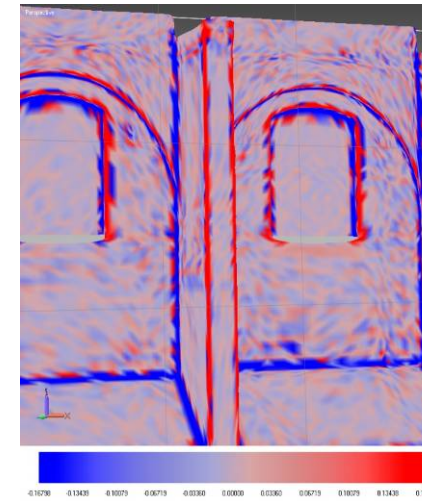


Figura 4.58: Análisis por curvatura: Retopología homogénea, nivel de proyección 2

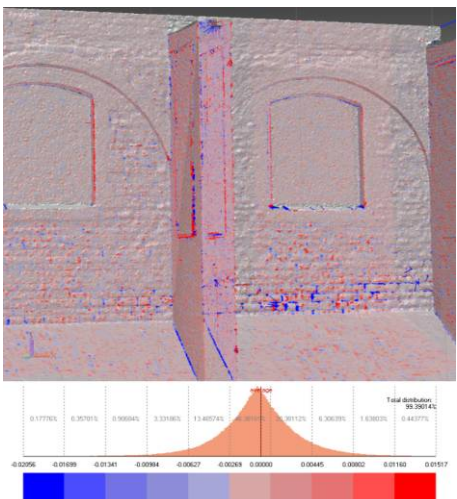
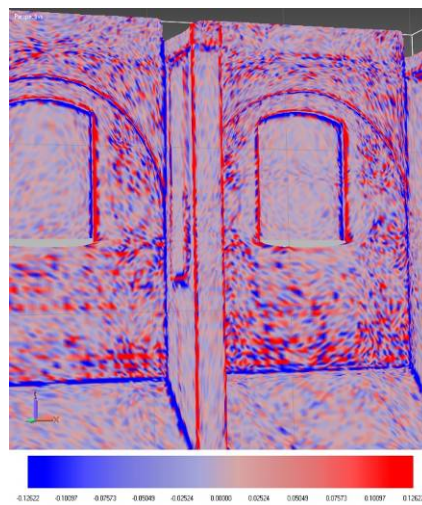


Figura 4.59: Desviación del modelo representados con vectores: Reto. homogénea, nivel de proyección 3



4.60: Análisis por curvatura: Retopología homogénea, nivel de proyección 3

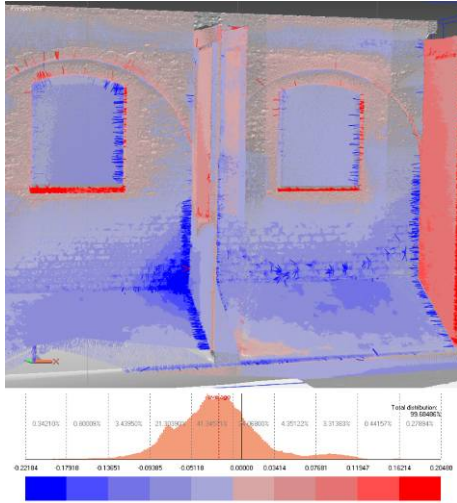


Figura 4.61: Desviación del modelo representado con vectores: Reto. Sin adaptive skin, nivel de proyección 1

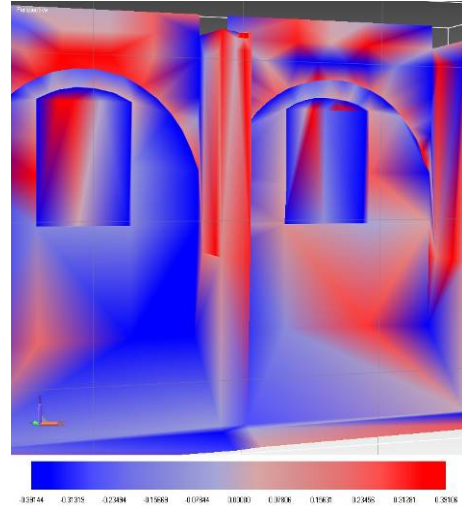


Figura 4.62: Análisis de curvatura: Reto. Sin adaptive skin, nivel de proyección 1

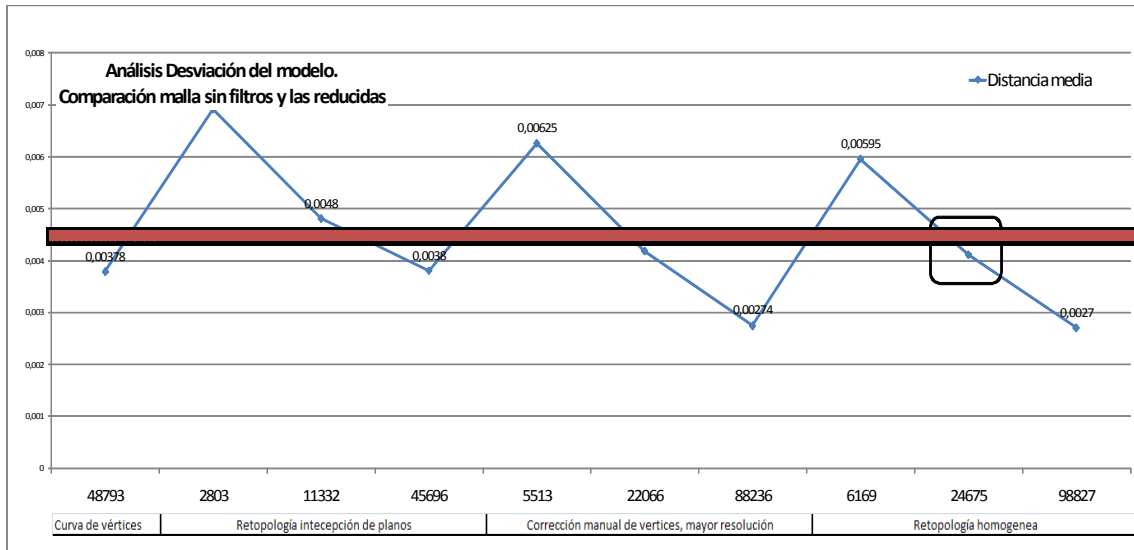


Figura 4.63: Análisis desviación del modelo, comparación de la malla de la nube de puntos sin filtro y las reconstruidas por retopología.

En esta grafica vemos el comportamiento de las mallas de retopología al aumentar la resolución poligonal, denotando que el nivel 1 de las mallas es muy alejado de la media necesaria para no perder el detalle volumétrico del modelo base y la subdivisión nivel 3 esta muy cercana a la malla base para poder obtener el detalle del desplazamiento de forma legible. También la mínima afectación en los cambios realizados entre el modelo de vértices manuales y mayor resolución con la malla homogénea en relación a la media.

## Metodología propuesta:

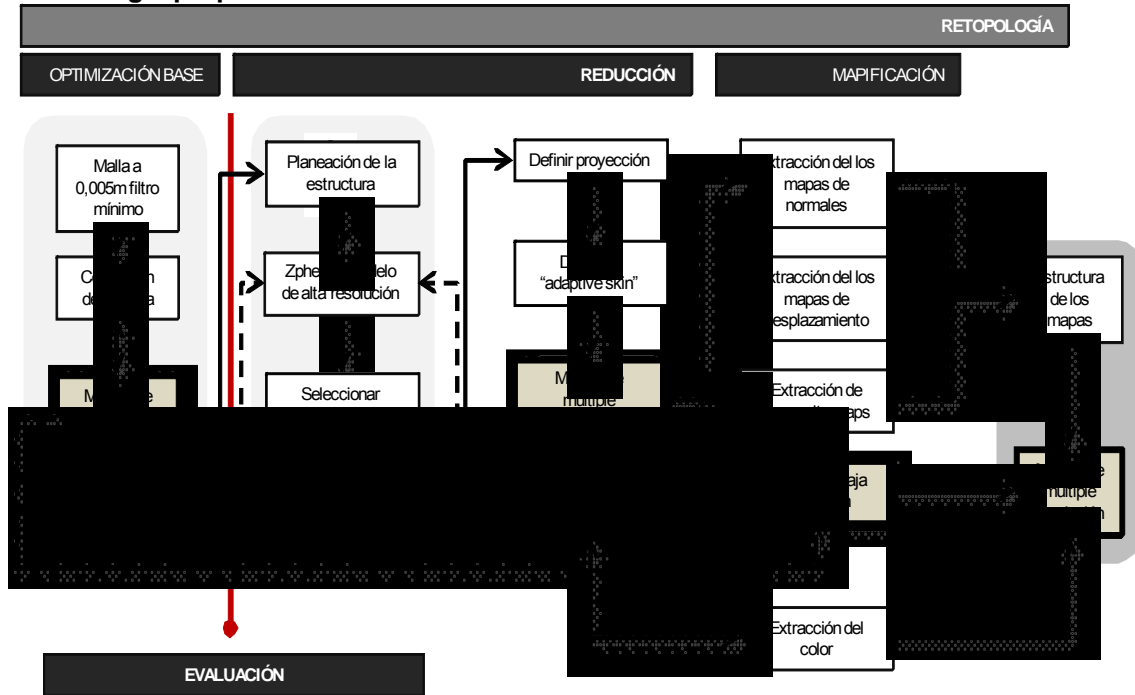


Figura 4.64: Metodología propuesta para reconstruir la malla de escáner laser mediante retopología y adaptive Sking.

Antes de comenzar la retopología el modelo de base tiene que tener los bordes rectos y no tener huecos. La retopología necesita una planeación previa, la cual se dibuja sobre la malla de alta resolución poligonal, como guía para colocar los puntos y en que orden comenzar la retopología, ello ayuda a agilizar el proceso. La retopología se establece mediante una Zphere, la cual llama la malla base, permitiendo utilizar un modelo de baja resolución como base de la topología, o contrayéndola punto a punto. Posteriormente se define el adaptive skin en cuanto a la dirección para proyectar los vértices y el número de divisiones en la proyección de la malla, la cual solo puede ser de ocho niveles de subdivisión, siendo la seis un nivel alto que demora más de un día en proyectar para una malla de más de 00m<sup>2</sup>.

Una vez proyectada se exporta como un modelo de múltiples niveles de resolución y sobre el menor se construye el mapa de UV, el cual permite exportar el mapa de desplazamiento entre la malla de nivel dos y la malla de alta resolución. Siendo un proceso lento en la etapa de construcción, pero que permite exportar mapas para diferentes aplicaciones relativamente rápido, además de permitir el uso de herramientas de modelado de alta resolución.

### Ventajas de la retopología

- Flexibilidad: Existe una interacción entre modelos de alta resolución y el modelo simplificado, ya que un modelo simplificado se puede utilizar como puntos de proyección en la retopología, por lo cual si se modifica la malla base se puede utilizar la malla simplificada o parte de ella como puntos de retopología, generando un proceso cíclico en donde la malla se mejora o se altera para corregir el modelo definitivo.
- Ahorro tiempo en la extracción de la información, ahorro tiempo en la conversión de la información a otras plataformas

### Problemas de la retopología

- Mayor tiempo de procesamiento inicial: La planeación de la estructura de reconstrucción de la malla y su construcción consume un tiempo considerable.

- Puntos sueltos mal proyectados: Los puntos de retopología que no estén sobre la superficie base, se proyectaran a otra superficie con el radio y dirección dado en la proyección, impidiendo generar superficies continuas influyendo en la generación de los diferentes mapas.
- Proyección en bordes irregulares: Los bordes de cierra y sus irregularidades por falta de información en las mallas de alta resolución impiden la correcta posición de puntos de retopología para los contornos, ya que al subdividirse los puntos de proyección quedan puntos sin una superficie a la cual proyectarse y se proyectan en direcciones erróneas, por lo cual la malla base tiene que suavizar sus bordes promediando sus irregularidades generando bordes rectos o continuos, sobre los cuales una línea recta que se subdivide tenga información a la que proyectarse.
- Puntos desconectados: Los puntos que no estén atados en la estructura de quads se proyectaran independientemente, ignorando la trayectoria y dirección de la geometría a la que se proyectan, generando proyecciones erróneas. Este punto es un problema ya que la identificación de estos errores solo se encuentran al proyectar a alta resolución y ese proceso consume tiempo y es difícil de identificar el punto de error.

## 5 MODELOS 3D A PARTIR DE IMÁGENES 2.5D

La extracción de los diferentes mapas de desplazamiento depende tanto de la estructura de los mapas de UV, que dan la referencia a la posición de los vértices del modelo mediante los vértices de UV, identificando el modelo 3D en el 2D, como punto de referencia, en este aspecto intervienen dos variables, la primera la normal que determina la dirección del desplazamiento y la forma como se extrae y la segunda el tipo de mapa, que depende del punto de referencia en el espacio del la escena de modelado, la cual puede ser del objeto, de la tangente o del mismo escenario.

**La normal:** La superficie de la normal es la perpendicular a la superficie, determinando la orientación a una fuente de luz y la orientación de cada vértice para imitar la superficie Phong shading.<sup>64</sup>

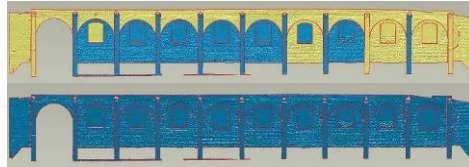


Figura 5.1: Modelo de clasificación con normales invertidas y el modelo

Al combinar posiciones de escáner laser y al pasar entre programas se puede perder la correcta orientación de las normales, ya que la normal del punto se calcula al compara la posición del escáner y el punto en XYZ, de esta forma se determina la orientación del punto y en el momento de unir todos los puntos se pierde este valor de orientación hacia el instrumento de medición, en pro de corregir esto algunas aplicaciones le dan el valor de la normal como una orientación del punto a otro punto en XYZ, pero este proceso genera errores en algunos puntos, sobretodo los aislados, ya que pueden tener la normal invertida, y no con relación a la geometría del objeto.

Para re calcular la normal se puede reorientar la normal a una vista determinada, siendo un proceso dispendioso y que depende de una correcta zonificación del modelo para no invertir las normales erróneas, por lo cual es recomendable reorientar la normal desde la fase de puntos y tratar de tener superficies continuas para que grupos aislados no equivoquen su orientación.

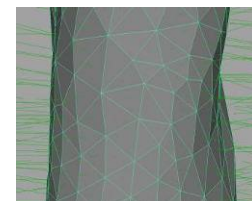
### “Tangent space” vs “object space” vs “World space”:

El uso del espacio del mapa de normales es diferente según la necesidad. Espacio se refiere al punto de referencia en valores de X,Y,Z (el RGB en términos de mapas de normales).

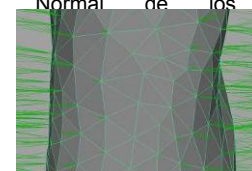
En el “tangent space” X, Y son U V en la textura y Z es la normal de la superficie. Los mapas de normales de tangente aparecen sobretodo en la luz azul (127,127,255) porque el azul representa la dirección de la superficie del modelo. Los canales rojo X y verde Y son la separación de esta dirección.

En “Object Space” el mapa de normal es usado con una orientación en X Y Z. En donde Y es comúnmente la dirección hacia arriba del modelo mientras que X es la izquierda y Z es la dirección hacia la que apunta el modelo. Estos mapas parecen un arcoíris porque representan la normal que enfrenta en todas las direcciones no solo las 180 grados que genera el “Tangent space normal map”.

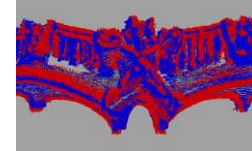
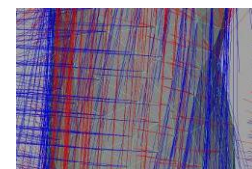
“World Space normal maps” son muy similares a “Object Space normal maps”, exepcto que X Y Z estan en cordenadas del espacio world. Dependen de las coordenadas del world space para que la iluminación sea corecta. Por ello solo se usa en modelos estáticos que tienen una única coordenada en la textura.



Normal de los



Normal del vértice



Tangente de la normal

Figura 5.2: Normales

<sup>64</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Surface\\_normal](http://en.wikipedia.org/wiki/Surface_normal)

## 5.1 Mapas de desplazamiento del modelo

### Algoritmos existentes de extracción de mapas de desplazamiento<sup>65</sup>:

En general existen dos categorías en la creación de mapas de desplazamiento en la extracción del detalle entre mallas:

- Técnicas que explotan la información precisa en el modelo; correspondencia de vértices<sup>66</sup>
- Técnicas basadas es “raytracing” y enfocadas a “render-to-displacement-map”

Complementarias técnicas existen herramientas que permiten crear mapas de desplazamiento de modelos 3D, desde nubes de puntos, de pixols o con herramientas de Renderizado, que amplia los horizontes de la aplicabilidad de mapas de desplazamiento como herramientas de modelado y de edición, de modelos complejos en una dirección determinada, la de la normal al modelo aplicado.

#### 5.1.1 EXTRACCIÓN DEL MAPA DE DESPLAZAMIENTO MEDIANTE RAYTRACING

El modelo de extracción se realiza mediante una operación de Raytracing entre un modelo de baja resolución y otro de alta resolución, la diferencia entre estas dos mallas arbitrarias se escribe en el espacio de I textura de UV en el modelo de baja resolución. Por lo tanto la textura extraída contiene la diferencia entre estas dos superficies y en el momento de renderizar el modelo de baja resolución, el mapa de desplazamiento deformara este modelo a lo largo de las caras de la dirección de la normal, de acuerdo con la información de altura del mapa. El render resultante debe verse igual al modelo de alta resolución del cual se extrajo la información de altura.

En el proceso de extracción de mapas de desplazamientos los modelos de baja resolución se tratan como una superficie “SubD”, la cual se subdivide en el proceso, reconociendo más o menos detalle de la superficie, esto implica que con más subdivisiones el modelo consume más memoria en el proceso de extracción y al colocarse muy ceca del limite de la superficie puede generar el mismo resultado, con menos consumo de memoria, ahorrando tiempo a la hora de renderizar, reduciendo los requisitos de la memoria. Para este proceso se tienen cuatro niveles de detalle de menos complejidad a una extremadamente detallada.

- Ninguna: trata a el modelo de baja resolución como una malla poligonal, sin aplicar subdivisiones al proceso de extracción.
- Pobre: subdivide la superficie hasta que las caras del modelo de baja resolución alcance por lo menos 4 pixeles en la extracción del mapa (4 texel).
- Buena: subdivide la superficie del modelo de baja resolución hasta que alcance cada cara poligonal llegue a un máximo de 2 texel.

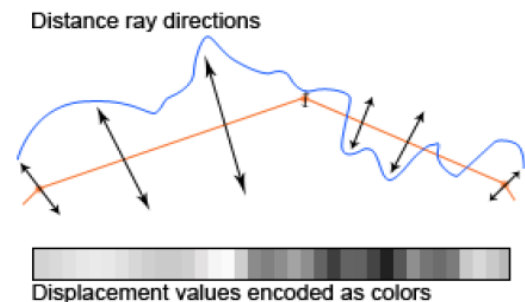


Figura 5.5: Proyectando rayos para determinar el valor del desplazamiento. Fuente: Ilya Tisevich, Displacement and Normal Map Creation For Pairs of Arbitrary Polygonal Models Using GPU and Subsequent Model Restoration. 2007.

<sup>65</sup> TISEVICH, Ilya, Displacement and Normal Map Creation For Pairs of Arbitrary Polygonal Models Using GPU and Subsequent Model Restoration, Department of Computational Mathematics and Cybernetics Moscow State University, Moscow, Russia, 2007. [http://www.graphicon.ru/2007/proceedings/Papers/Paper\\_43.pdf](http://www.graphicon.ru/2007/proceedings/Papers/Paper_43.pdf)

<sup>66</sup> Zbrush de Pixologic entra en esta categoría estableciendo una conexión uno a uno entre los vértices de la malla simplificada y el modelo de alta resolución

- Completa: divide la malla tantas veces que cada cara es del tamaño de un pixel de la cara extraída.

La extracción pobre ya alcanza niveles óptimos de detalle, por lo cual se recomienda el uso de esta y se pasa a un nivel mayor de detalle cuando el modelo de baja resolución esta muy reducido, siendo la diferencia entre baja y buena casi idéntica, pero al necesitar cierto grado de precisión con los modelos de escáner laser, se pone al limite la extracción del desplazamiento, con los mapas de mayor tamaño y mayor resolución, teniendo un coste de procesamiento importante.

En la figura 5.3 se aplico un filtro de "highlight" para encontrar las diferencias de pixeles entre los mapas.

Es recomendable que el modelo de alta resolución se grave como \*.bio (es un \*.obj binario mejorado, que remplaza el streaming \*.obj)

### Rayrange<sup>67</sup>

En algunos programas este rango es max search depth (%) es la distancia que se le permite al rayo recorrer para encontrar el detalle entre dos mallas, viajando solo tan lejos como se le permita. Este rango actualmente se puede detectar automáticamente, pero si se modifica se corre el riesgo de cortar el detalle o extraer un mapa vacío, al reducir la profundidad del rayo, los mapas negros se dan cuando el rayrange no ha podido encontrar ningún detalle dentro de los rangos dados, por otra parte se tiene que mantener el rango más cercano a la malla para asegurar una extracción más eficiente. Este rango es muy importante cuando se utiliza mapas de 8 bit o 16 bit, debido a la naturaleza de estos dos formatos, por ser dependientes de este alto rango desplazamiento al final del render.

"CPU-based raytracer implementations are pretty slow, taking up to a few hours to build a 4096x4096 displacement map for a pair of models with a below-the-average geometry complexity on a 2.4GHz single-core processor."<sup>68</sup>



Figura 5.3: Mapa de desplazamiento

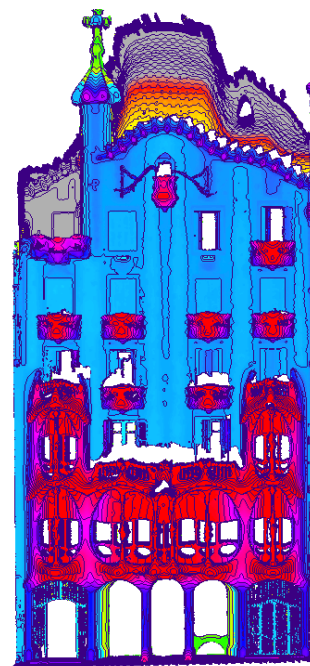
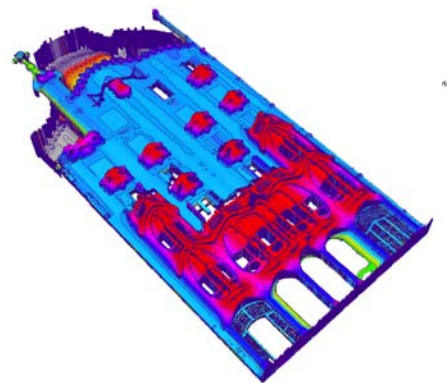


Figura 5.4: Modelo 3D con herramientas GIS

<sup>67</sup> <http://homepage.ntlworld.com/matthew.leonard1/sphereviewer/download/muadpoxreview.pat>

<sup>68</sup> TISEVICH, Ilya, Displacement and Normal Map Creation For Pairs of Arbitrary Polygonal Models Using GPU and Subsequent Model Restoration, Department of Computational Mathematics and Cybernetics Moscow State University, Moscow, Russia, 2007. [http://www.graphicon.ru/2007/proceedings/Papers/Paper\\_43.pdf](http://www.graphicon.ru/2007/proceedings/Papers/Paper_43.pdf)

## 5.1.2 PROYECCIÓN DEL MODELO SOBRE UN PLANO DE MÚLTIPLE RESOLUCIÓN

Entre los modelos de múltiples resolución hay una relación entre los vértices sus diferentes niveles (figura 5.6), permitiendo generar mapas de desplazamiento de una forma ordenada en su procesamiento, proyectando la información por zonas poligonales del modelo de menor resolución, mediante dos procesos, por interpolación o por raytrace, los cuales establecen la relación y la almacenan en el mapa de UV. Ello nos permite el control de que tipo de información se almacena en los mapas, si es suavizada, exagerada, o complementada con bump maps, concavities, definiendo su dirección de diferentes formas, dependiendo de la normal, la tangente (explicados previamente), en diferentes combinaciones, el cual presenta dos niveles para expertos. Estas combinaciones son muy amplias ya que los diferentes programas que leen mapas de normales no lo hacen de la misma forma, por ello existen ayudas de archivos pre configurados por aplicación en el zmapper, al igual que códigos para generar mapas de desplazamiento en el multidisplacement 3 de zbrush, como por ejemplo DE-LBEK-EAEAEA-R32 el cual es usado para Maya (autodesk), donde cada letra especifica una característica del mapa, en este caso un mapa de 32Bits RGB, 3 canales, cada uno escalado con A.D Factor, en un full range con una resolución full y el código rápido para 3ds max es DE-LBEK-EAEAEA-R32<sup>69</sup>. La creación de mapas de normales es un proceso complejo desde zbrush, por lo cual se recomienda la lectura de los capítulos 9 rendering Zbrush Displacement in Maya, capítulo 10 Zmapper y capítulo 11 Zcripts, macros and interface customizations del libro Zbrush character Creation Advanced Digital Sculpting<sup>70</sup>.

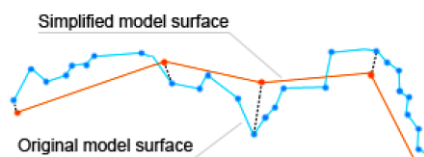


Figura 5.6: Correspondencia entre vértices.  
Fuente: Ilya Tisevich, Displacement and Normal Map Creation For Pairs of Arbitrary Polygonal Models Using GPU and Subsequent Model Restoration, 2007.

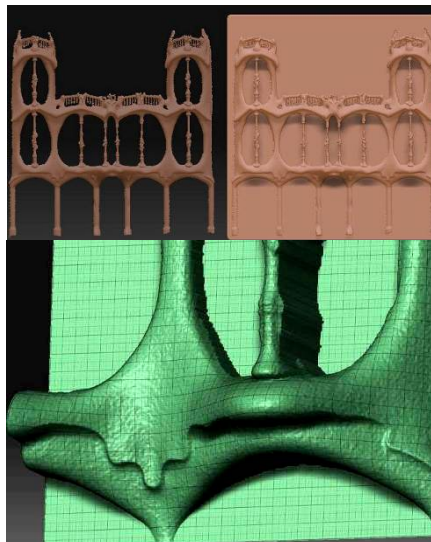


Figura 5.7: Proyección del modelo sobre un plano de múltiples niveles de resolución poligonal

### CLONAR SUPERFICIES:

Existen herramientas que permiten clonar superficies de mallas en 3D, de un modelo a otro o desde el mismo modelo, lo cual nos permite subdividir una malla a millones de polígonos y clonar la superficie de un modelo en tres dimensiones sobre un plano el cual tiene un mapa de UV preestablecido, que permite la extracción de un mapa de normales y de desplazamiento del modelo. Esta proyección con una herramienta de modelado permite esculpir el modelo desde diferentes direcciones, pero al mover los vertices en una primera dirección la malla disminuye el numero de polígonos para proyectar desde otra dirección, al igual que si se sale de la zona de proyección se puede alterar todo el modelo, por lo cual se recomienda solamente para usar en una única dirección, imitando un mapa de desplazamiento, como se muestra en la figura 5.7 con la batlló, la cual partió de una de cuatro quards, subdividida 6 veces llegando a 2'443.000 de polígonos, logrando extraer un mapa de desplazamiento máximo de 8192 pixels de tamaño de 32bits con cuatro niveles de precisión. Este proceso tiene que ser complementado con dos técnicas de modelado de alta resolución.

**Morph target:** Al clonar la superficie de una malla a otra modificamos los vertices de la malla en su nivel de menor resolución, lo cual modifica la extracción de los mapas de

<sup>69</sup> Michael McCarthy, ZBrush to 3ds Max 8 Displacement Guide, Pixologic, Inc. 2006

<sup>70</sup> SPENCER, Scott, Zbrush character Creation Advanced Digital Sculpting, Wiley Publishing, Inc, Indianapolis, Indiana, págs 247-318, 2008.



desplazamiento, por lo cual se utiliza el morph target, siendo una herramienta de la sub-palette, que permite almacenar los datos de los pixols en un punto concreto de la etapa del modelado, permitiendo pasar de un modelo almacenado al otro sin alterar los niveles de subdivisión de la malla en una mayor resolución y al ser grabado el modelo antes de el clonado, se puede llamar este modelo y desde este exportar el mapa de desplazamiento. Esta técnica es utilizada en el modelado cuando más de una persona trabaja sobre un modelo y mueve los vértices de este, por ejemplo cuando una modela el detalle y la otra texturiza el modelo, por lo cual aunque el modelo sea alterado ambos pueden unir sus modelos guardando un punto de restauración de la malla determinado.

**Geometry HD (high definition)**<sup>71</sup>: La subdivisión de la malla de quads tiene limitantes con respecto a la capacidad del ordenador utilizado, por lo cual existe el sistema de geometría HD, el cual permite subdividir aun más la malla a una resolución que el ordenador no podría llegar, al limitar la geometría a la zona visualizada cuando se modela con geometría HD, llegar así a modelos complejos de mil millones de polígonos. La limitante de este proceso es extraer esta información, lo cual será posible en la versión 3.5 de Zbrush, mediante los mapas de desplazamiento HD.

#### Almacenar la información del pixol en el canal Alpha:

En zbrush el pixol almacena la información que vemos en el cambas, como la altura, el color o el material, esa información puede extraerse en imágenes como material o como un canal Alpha, este canal Alpha permite almacenar la información de altura del modelo, generando una imagen de desplazamiento. Por lo cual si se inserta un modelo en el cambas en cierta posición se puede extraer la información de altura de cada pixol que se visualiza en el cambas en una única dirección, siendo una herramienta que nos permite generar mapas de desplazamiento en malla de alta resolución poligonal.



Figura: 5.8: Información del pixol como mapa de desplazamiento mediante un canal alpha y proyección en el lienzo 2.5D

Desde otro punto de vista también podemos corregir mapas de desplazamiento al pasar la información del canal Alpha a los pixols, lo cual permite ver el modelo en el cambas 2.5D (figura 5.8 abajo), facilitando la utilización de herramientas de modelado 2,5D y de iluminación para alterar el mapa o generar mapas nuevos como el de concavidades (en nuestro caso se puede interpretar como mapa de grietas).

**The Z-Depth Frame Buffer:** Es la representación de la profundidad de una escena basada en el punto de vista de una cámara mirando un plano, usada generalmente para difuminar (2D fog) partes selectivas de un render, al utilizar múltiples “passes” o para generar un rapido efecto de “depth-of-field post-process”<sup>72</sup>.

<sup>71</sup> PATNODE, Jason, Character Modeling with Maya and Zbrush, profesional Polygonal Modeling Techniques, Focal Press, pág 91, USA, 2008

<sup>72</sup> [http://www.animation.dreamers.com/clases/3d/crear\\_pinscreen.php](http://www.animation.dreamers.com/clases/3d/crear_pinscreen.php)

### 5.1.3 MAPA DE DESPLAZAMIENTO MEDIANTE MODELOS DE NUBES DE PUNTOS FILTRADOS

La información del escáner laser Riegl se recoge en panoramas, al girar 360° sobre su eje en la toma de datos, por lo cual se puede representar en dos formatos, uno como nube de puntos en tres dimensiones y otro mediante una imagen de 2.5D, siendo este formato de dos dimensiones utilizado para la detección de contornos, de tipos de superficies<sup>73</sup>, para la clasificación<sup>74</sup> y la combinación de la información de puntos con otras bases de datos como la de color, siendo extraída por posición de escaneo y reagrupada según el tipo de proceso necesario según los objetivos propuestos, ya que el reconocimiento de superficies o de contornos se puede unir en etapas posteriores mezclando las informaciones detectadas, aunque sean mallas, las cuales se pueden unir y los contornos como vectores también se pueden reagrupar y editar en una etapa posterior.

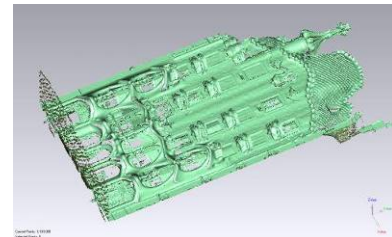


Figura 5.8: Nube de puntos filtrada

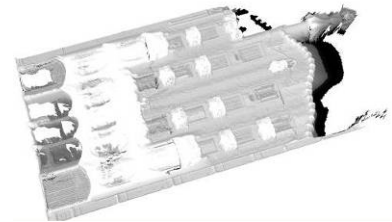


Figura 5.9: Modelo generado a partir de un Geotif

Estas posiciones de toma de datos se pueden unir en un archivo único, un polydata, perdiendo la interpretación de la información en 2.5D, por lo cual es necesario utilizar filtros para poder manejar estos archivos sobre dos ejes y uno de altura para cada punto. Siendo necesario utilizar todas las posiciones realizadas sobre el mismo objeto, ya que es necesario tener una nube de puntos continua, para saber cuales puntos están delante y cuales detrás para eliminarlos y mantener un único valor en un eje determinada, el filtro de nubes de puntos se realiza mediante un buffering de los puntos, estableciendo una retícula en el programa Riscan Pro, para esta retícula es necesaria la orientación de la nube de puntos en solo dos ejes, dejando solo los puntos superiores del eje que se filtra, estableciendo al mismo tiempo unas dimensiones de resolución de la nube de puntos, la cual va a ser regular facilitando el proceso de conversión de la nube en un mapa de desplazamiento en este caso de fachadas (figura 5.10)

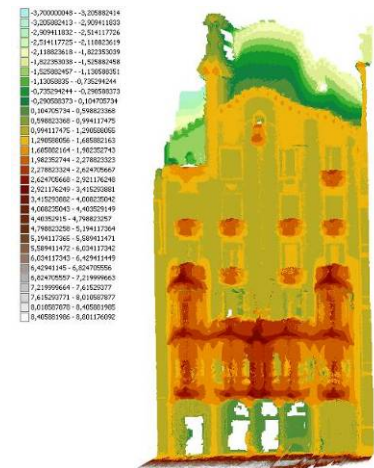


Figura 5.10: Modelo generado a partir de un DEM

Un ejemplo de su aplicación lo vemos con el proyecto de la pirámide de Giza<sup>75</sup>, con un escáner laser Riegl, el cual se filtro en celdas regulares de 0.5 x 0.5 m exportado de Riscan Pro en un archivo ASCII a Arc GISTM, posteriormente mallado en un formato TIN interno (organización de red irregular de triángulos TIN<sup>76</sup>), almacenando en cada vértice las coordenadas "X" "Y" y la altura ("Z") identificando los vértices conectados por líneas rectas a él, recogiendo la topología de la referencia a los vértices conectados a cada punto de la red. Por otro lado también se pueden generar el TIN a partir de unir los vértices o

<sup>73</sup> BRIESE, Christian, Towards Automatic Feature Line Modelling From Terrestrial Laser Scanner Data, Christian Doppler Laboratory "Spatial Data from Laser Scanning and Remote Sensing" Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology, 1040 Vienna, Austria, 2008.

<sup>74</sup> BARNEA, Shahar Segmentation Of Terrestrial Laser Scanning Data By Integrating Range And Image Content, Transportation and Geo-Information, Civil and Environmental Engineering Faculty, Technion – Israel Institute of Technology, Haifa, 2008

<sup>75</sup> W. Neubauer, COMBINED HIGH RESOLUTION LASER SCANNING AND PHOTOGRAMMETRIC DOCUMENTATION OF THE PYRAMIDS AT GIZA, CIPA 2005 XX International Symposium, Torino, Italy, 2005

<sup>76</sup> Triangular Irregular Networks Gridding for Oasis montaj,

puntos distribuidos irregularmente, almacenando en cada triangulo los vértices que lo determinan y los que lo rodean.

En la figura 5.8 vemos la nube de puntos filtrada en “X” “Y”, la cual se exporto en formato ASCII con un punto por cada 10cm y se importo en aplicaciones Gis de dos maneras, una desde Global mapper convirtiendo la información de altura de los puntos en un rango de color en formato GeoTif, obteniendo un nivel de resolución alto, sin establecer un valor de altura para cada color, el cual se aplico al convertir la nube de puntos en un Digital Terrain Model, el cual se clasifico en 23 valores de altura (figura 5.10).

## 5.2 Perdida de información entre mapas y modelos

### 5.2.1 Mapas de desplazamiento como herramienta de modelado

#### Información de los mapas de desplazamiento:

La más común representación se basa en la textura de mapas, en donde cada vértice de la malla esta dentro de un parámetro de 0-1 en relación a una textura convencional en dos dimensiones y en algunos casos se combina un mapa de desplazamiento con vectores de normales.

El formato utilizado usualmente es de 32 bits por pixel en 4 canales, aunque 16 bits por canal es también usado para almacenar una buena precisión.

Los mapas de desplazamiento se codifican en conjuntos de bits de longitud determinados (la llamada profundidad de color) en los pixeles, los cuales se pueden dar en<sup>77</sup>:

**8bits:** Solo almacena la medida de desplazamiento, mientras que la dirección del desplazamiento lo determina la dirección de la superficie de la normal a un punto dado. Permitiendo una precisión de 256 niveles de altura ( $2^8$ ), por lo cual la información extraída en el modelo de alta resolución debe encajar en este rango de profundidad. Estos 256 niveles de desplazamiento en mapas de 8bits no son capaces de capturar grandes desplazamientos sin introducir artefactos como “stair stepping or banding” debido a el pequeña variedad de tonos de este formato.

**16bits:** pueden almacenar 65.536 valores diferentes ( $2^{16}$ ), ofreciendo una mayor gama de valores para almacenar esta información en comparación con el mapa de 8bits. Los datos extraídos se normalizan para que encajen con la profundidad de bits determinada.

**32bits** “float maps” pueden almacenarse 4294967295 valores ( $2^{32}$ ). Este es el formato recomendado para extraer de mapas de desplazamiento ya que la profundidad de 32bits captura de todos sus datos sin pérdida de calidad. Se extraen los mapas de 32 bit de punto flotante en unidades espaciales del proyecto, siendo los centímetros las unidades por defecto.

En aplicaciones de video juegos usualmente 8 bits cubre la mayoría de necesidades para estas aplicaciones, pero en aplicaciones de cine mapas de desplazamiento de 32 bits de punto flotante son necesarios para el realismo necesario.

Una imagen de 32 bit se refiere también a una imagen de high dynamic range image (HDRI), que almacena todos los valores positivos y negativos entre un rango de 0 a 1. Los programas de “image modeler” soportan la extracción del desplazamiento en el modelo con

---

<sup>77</sup> <http://download.autodesk.com/esd/mudbox/help2009/index.html>

UV que existe afuera de un rango de 0 a 1. Cada UV tile esta extraída para cada archivo de imagen separado.

Los mapas de 32bits pueden tener diferentes combinaciones en su información

**24 Bits dirección y 8 bits desplazamiento:** Tres de los canales definen la dirección del desplazamiento a un punto determinado y el cuarto canal contiene el desplazamiento. También es posible almacenar en esos 8 bits solo la información de "X" y "Y" del vector de desplazamiento, en donde el tercer vector puede ser restaurado con la ecuación  $z^2=1-(x^2+y^2)$ . Cada uno de los vectores restantes puede ser representado por un valor de 12bits, permitiendo una precisión reduciendo los tiempos computacionales.

**16bits dirección y 16bits de desplazamiento:** La dirección del vector contiene la "X" y "Y" solamente y el desplazamiento por el valor de 16bits.

**8bits desplazamiento y 24bit normal:** Igual que el mapa de 8bits pero integrando un mapa de normales para corregir en tiempo real el sombreado de la superficie.

**2 x 8bits desplazamiento y 16bits normal:** También conocido como "Dual Relief Textures" usado por "Relief Mapping". Dos canales de desplazamiento que representan los valores imaginario superior e imaginario inferior del plano, permitiendo simular una superficie cerrada opaca del objeto, en una única referencia de mapa triangulado.

**16bits desplazamiento y 16bit normal:** Una alta precisión de desplazamiento y un componente reducido de vector de normal.

Como ejemplo del modelado desde un mapa de desplazamiento (figura 5.11) se redujo el detalle de una sección de la malla de la nube de puntos sin filtrar mediante técnicas de suavizado, posteriormente se realizo una reducción del 4%, pasando de una malla de 254.000 polígonos a 6.000 polígonos, lo cual permitió extraer el mapa de desplazamiento entre la malla original y la simplificada.

Al tener el mapa y la malla reducida, se procedió a subdividir la malla hasta llegar a los 4 millones de polígonos, se le aplico el mapa de desplazamiento como desplazando los vértices de la malla con la información de altura del mapa y en base a la dirección de la normal del modelo.

Al tener el modelo con el detalle de la malla base se procedió a compararlo con esta, encontrando que existe una diferencia de las dos mallas en los bordes, pero es inferior a un milímetro, la cual se genero en la simplificación de la superficie, en la que los bordes se desplazaron promediando el contorno de la geometría.

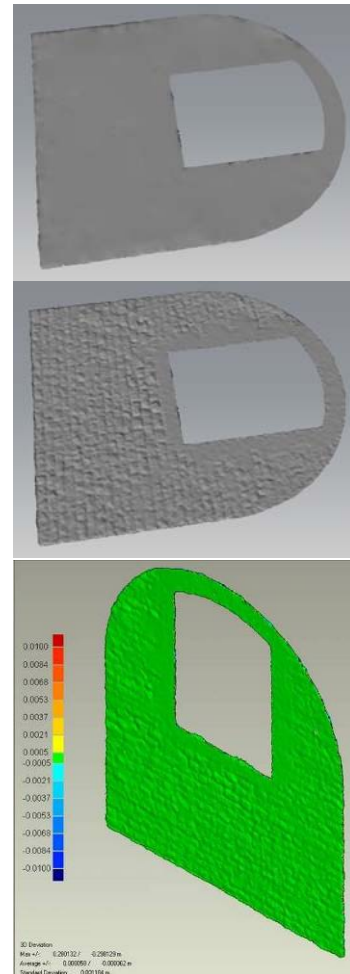


Figura 5.11: Comparación de la malla original y el producto de la malla simplificada con el detalle del mapa de desplazamiento.

### Tipología de mapa de desplazamiento en relación de la proyección como herramienta de modelado:

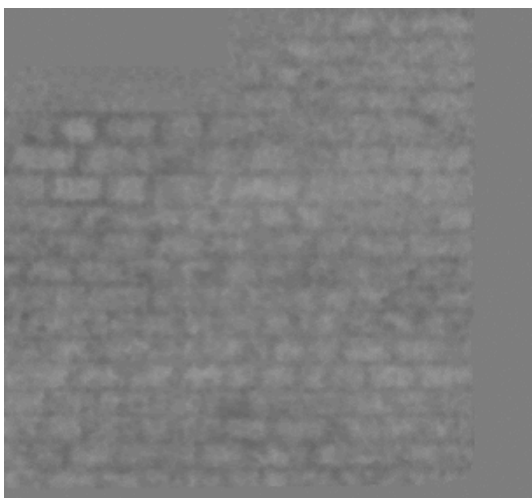


Figura 5.12: Mapa de desplazamiento

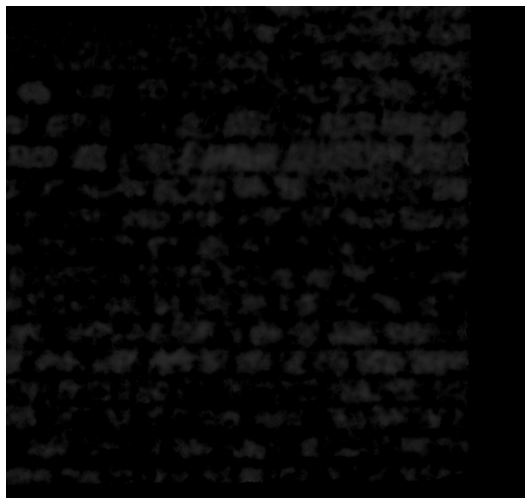


Figura 5.13: Mapa de desplazamiento con punto flotante 32 bits

Cuando el modelo de alta resolución (fuente de la información) está por encima del de baja resolución (objetivo) el valor almacenado es positivo, pero cuando el modelo de alta resolución está por debajo del de baja resolución el valor es negativo. En una escala de grises de 32 bits cero y los valores negativos se representan en valores de negros en la imagen, en distancias entre 0 y 1 en términos de escala de grises y distancias mayores que 1 se muestran como blancas. Siendo similar este proceso en 8 o 16 bit, cabe anotar que una imagen de 32 bit almacena rangos mayores de los que puede visualizarse en los monitores.

La construcción de los mapas de desplazamientos usados en esta tesis se guiaron por el hecho de reconstruir el modelo de alta resolución, uniendo la información 2.5D y la 3D, para lo cual no todos los formatos es permitido, siendo los principales factores que influyen en ello:

- Canales: Los mapas de desplazamiento se pueden crear en tres canales como con los mapas de normales, cada uno puede ser independiente en cuanto a la información que dan.
- Existen diferentes combinaciones para extraer la información de relieve de una superficie, pero la que permite el desplazamiento de los vectores como herramienta de modelado es: para mapas de 8 y 16 bits se extraen con la información de full range, pero la información de los mapas de 32 bit coma flotante se extraen con el valor "positivo". Los otros tipos de información que se puede extraer pero que no permiten el desplazamiento como herramienta de modelado actualmente son: Normal x, normal y, normal z, normal -x, normal -y, normal -z, cero (ninguna información gris), base line (ninguna información negro), Positiva, negativa y full range.
- Esta información puede tener tres niveles de calidad: Minor, full y mayor
- Existe un factor de escala que hay que apagar para no alterar la información métrica, estos factores son: factor añadido, automático y automático + factor añadido.

**Comparación entre las mallas modeladas a partir de mapas de desplazamiento de diferentes resoluciones, delimitando la pérdida de información y de que tamaños deben ser las malla con los tamaños límite actuales:**

Tamaño de mapa	256			512		
Bits	8bits	16bits	32bits	8bits	16bits	32bits
<b>Desviación del modelo</b>						
Núm. Vértices efectivos	794732	794712	794711	794723	794696	794696
Distancia mínima	0	0	0	0	0	0
Distancia máxima	0,11331	0,12537	0,12634	0,11922	0,12565	0,12567
Distancia media	0,00243	0,00102	0,00098	0,00233	0,00044	0,00044
Desviación estándar	0,00143	0,00091	0,00089	0,0011	0,0005	0,0005
<b>Desviación malla/malla</b>						
Distancia mínima	-0,11331	-0,12537	-0,12634	-0,11922	-0,12565	-0,12567
Distancia máxima	0,08077	0,10134	0,10304	0,08719	0,10871	0,10875
Distancia media	0,00233	0,00029	0	0,00232	0,00001	0
Desviación estándar	0,00204	0,00188	0,00185	0,00158	0,00126	0,00126
Tamaño de mapa	1024			2048		
Bits	8bits	16bits	32 RGBA	8bits	16bits	32bits
<b>Desviación del modelo</b>						
Núm. Vértices efectivos	794728	794696	794696	794732	794704	794704
Distancia mínima	0	0	0	0	0	0
Distancia máxima	0,12167	0,1262	0,12622	0,11947	0,12579	0,12584
Distancia media	0,00232	0,0002	0,0002	0,00232	0,00011	0,00011
Desviación estándar	0,00105	0,00034	0,00034	0,00114	0,00033	0,00033
<b>Desviación malla/malla</b>						
Distancia mínima	-0,12167	-0,1262	-0,12622	-0,11947	-0,12579	-0,12584
Distancia máxima	0,08756	0,11052	0,11058	0,08773	0,09678	0,09666
Distancia media	0,00231	0,00001	0	0,00231	0,00001	0
Desviación estándar	0,00139	0,001	0,001	0,00139	0,00102	0,00102

Tabla 15: Comparación de mallas modeladas a partir de mapas de desplazamiento contra el modelo de alta resolución de la nube de puntos sin filtro.

El área sobre el cual se aplicó la muestra es de  $23\text{m}^2$  y el área útil del mapa de desplazamiento es del 60%, por lo cual el área total que se podría almacenar si se utilizara el 100% del mapa sería de una malla de  $38\text{m}^2$ . Como el tamaño de mapa máximo actualmente es de  $8192 \times 8192$  píxeles, representaría que con un mapa de  $256 \times 256$  píxeles de 32bits cubriríamos un área de  $1216\text{m}^2$  de malla (32 mapas de 256 = 1 mapa de 8192 pix), teniendo un desplazamiento de media de 0, pero al analizar las dos mallas como si fuera un mismo modelo, encontramos una diferencia de las mallas del 0,00034 de desplazamiento. Una mayor precisión se alcanza al modelar con un mapa de 16bits con un tamaño de  $512 \times 512$  píxeles, llegando a cubrir un área de  $608\text{m}^2$  de malla (16 mapas de 512 = 1 mapa de 1892). Teniendo en cuenta que existe una pérdida de aprovechamiento del mapa de desplazamiento que hay que restarla a las aéreas mencionadas con anterioridad.

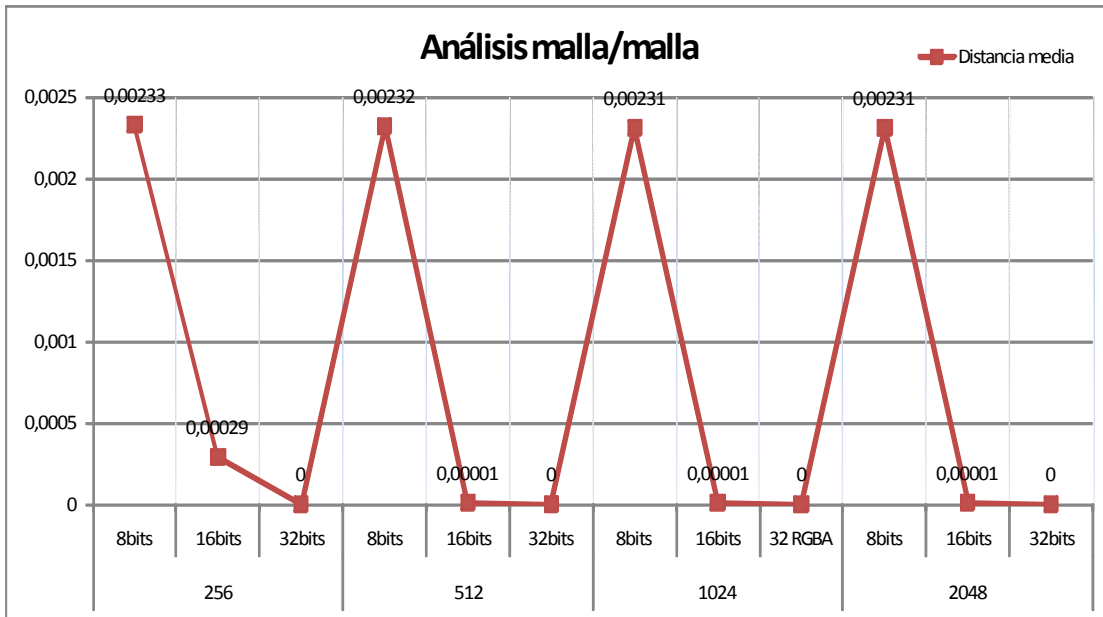


Figura 5.14: Análisis del modelo, distancia media de las mallas modeladas a partir de una malla de retopología de baja resolución a través de los mapas de desplazamiento comparada con la malla de la nube de puntos sin filtrar. El análisis de la distancia media entre los vertices de la malla de la nube de puntos sin filtros y la generada a partir del mapa de desplazamiento sobre la malla de retopología nos muestra la pérdida de información de los mapas de 8bits, pero las de 32bits llegan en todos los modelos tiende a ser cero.

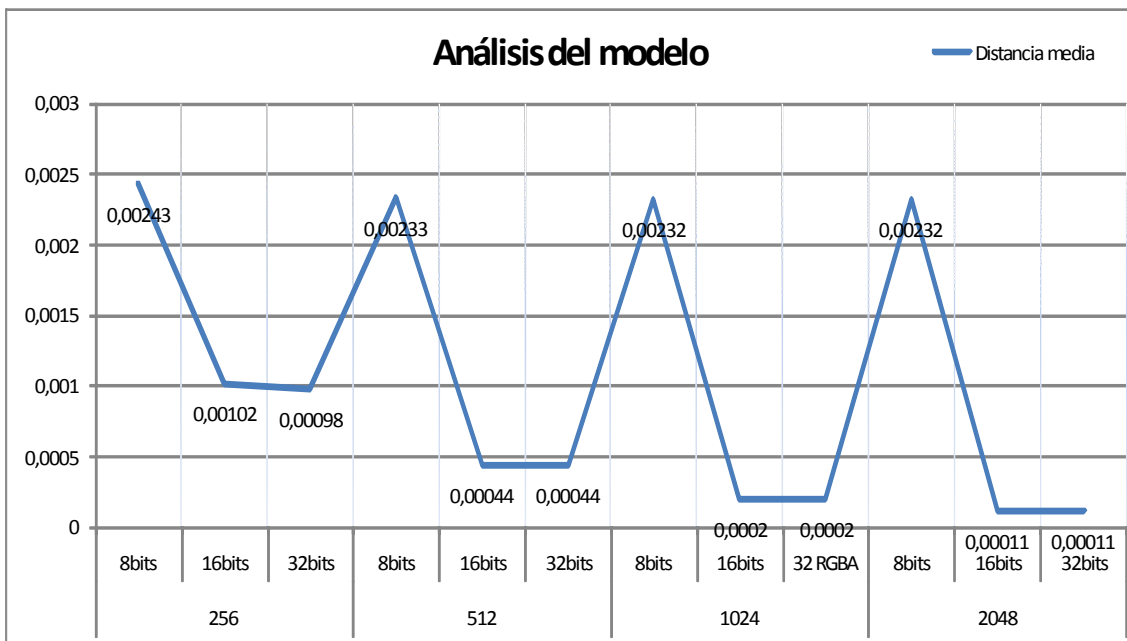


Figura 5.15: Análisis del modelo, distancia media de las mallas modeladas a partir de una malla de retopología de baja resolución a través de los mapas de desplazamiento comparada con la malla de la nube de puntos sin filtrar.

Realizando la comparación de las dos mallas como si fueran un modelo único, se obtuvo una diferencia en la resolución por tamaños de los mapas, siendo el mapa de 256 megas insuficiente para almacenar la información, y el de 512 llega a una proximidad del modelo de 0.00044m con una diferencia de 0.00033 de la máxima resolución obtenida con el número de 1'309.184 polígonos de malla base.

### 5.1.4 Resolución de la malla para recuperar el detalle.

Partimos de la pregunta ¿cual es el nivel de subdivisión de la malla regular para que se proyecte sobre la malla libre sin que se considere que hay pérdida de información?, ya que el modelado a partir de mapas de desplazamiento, planteado como instrumento para reunir la información del mapa con el modelo de baja resolución, necesita subdividir la malla de baja resolución para poder desplazar los vértices que la convertirían en el modelo de alta resolución, o el estar próximos a este modelo inicial.

M.B.	N.S.	N.pol	Desviación del Modelo				Desviación Shell / Shell				
			N. Ver.	Min. Dist.	Max. Dist.	Av. Dist.	St. Dev.	Min. Dist.	Max. Dist.	Av. Dist.	St. Dev.
<b>3*3</b>	<b>4</b>	<b>1458</b>	<b>1129352</b>	<b>0</b>	<b>0,02264</b>	<b>0,00222</b>	<b>0,00256</b>	<b>-0,0253</b>	<b>0,02517</b>	<b>0,00014</b>	<b>0,00344</b>
2*2	4	1624	1128484	0	0,02267	0,0022	0,00247	-0,02531	0,02494	0,00014	0,00335
5*5	4	3528	1157529	0	0,02301	0,00117	0,00142	-0,0253	0,0253	0,00006	0,00185
11*11	3	3872	1168656	0	0,02312	0,00107	0,00129	-0,02529	0,02528	-0,00001	0,00169
13*13	3	5408	1179620	0	0,02319	0,00084	0,00104	-0,02527	0,02528	-0,00001	0,00136
3*3	5	6048	1156861	0	0,02303	0,00085	0,00113	-0,02515	0,02474	0,00003	0,00142
2*2	5	6496	1135481	0	0,02275	0,00087	0,0011	-0,02517	0,0253	0,00007	0,00141
7*7	4	6498	1156748	0	0,02295	0,00073	0,00093	-0,02529	0,02519	0,00004	0,00119
17*17	3	9248	1187508	0	0,02324	0,00057	0,00075	-0,0253	0,02526	-0,00001	0,00096
19*19	3	11400	1181016	0	0,02312	0,00049	0,00063	-0,02524	0,02505	0,00001	0,00081
5*5	5	14446	1177552	0	0,02312	0,00042	0,00057	-0,02375	0,02487	0,00002	0,00072
11*11	4	15488	1174638	0	0,02305	0,00039	0,00055	-0,0253	0,02518	0,00001	0,00068
<b>23*23</b>	<b>3</b>	<b>16928</b>	<b>1203099</b>	<b>0</b>	<b>0,02321</b>	<b>0,00037</b>	<b>0,00049</b>	<b>-0,02529</b>	<b>0,02517</b>	<b>0</b>	<b>0,00062</b>
13*13	4	21632	1188743	0	0,02313	0,0003	0,00042	-0,02504	0,02526	0	0,00053
3*3	6	25312	1190201	0	0,02321	0,00029	0,00045	-0,02502	0,02527	0,00001	0,00055
2*2	6	26494	1154010	0	0,02263	0,00031	0,00044	-0,02519	0,02494	0,00004	0,00055
7*7	5	26910	1193035	0	0,02324	0,00025	0,00038	-0,02481	0,02522	0,00002	0,00047
17*17	4	36720	1193160	0	0,02296	0,00019	0,00031	-0,02529	0,02493	0	0,00038
19*19	4	45904	1205976	0	0,02302	0,00016	0,00024	-0,02464	0,02527	0,00001	0,0003
5*5	6	58128	1202892	0	0,0232	0,00014	0,00023	-0,02478	0,02487	0,00001	0,00029
<b>11*11</b>	<b>5</b>	<b>63076</b>	<b>1214623</b>	<b>0</b>	<b>0,02282</b>	<b>0,00012</b>	<b>0,0002</b>	<b>-0,02363</b>	<b>0,02431</b>	<b>0</b>	<b>0,00025</b>
23*23	4	66978	1213849	0	0,0232	0,00011	0,0002	-0,02263	0,02496	0	0,00024
13*13	5	87123	1225316	0	0,02404	0,00009	0,00018	-0,02355	0,0249	0	0,00022
3*3	7	100976	1226199	0	0,02303	0,00009	0,00017	-0,02506	0,0235	0,00001	0,00021
2*2	7	106292	1195100	0	0,02275	0,0001	0,00018	-0,02227	0,02495	0,00002	0,00023
7*7	6	107180	1229735	0	0,02323	0,00008	0,00016	-0,02403	0,02506	0,00001	0,0002
17*17	5	149004	1265602	0	0,0247	0,00005	0,00012	-0,0224	0,0247	0	0,00015
19*19	5	183009	1270014	0	0,02323	0,00005	0,00011	-0,02434	0,02323	0	0,00013
5*5	7	234040	1295470	0	0,02323	0,00004	0,00009	-0,0224	0,02367	0	0,00012
11*11	6	252072	1308794	0	0,02323	0,00003	0,00008	-0,02228	0,02323	0	0,0001
23*23	5	268644	1319425	0	0,02288	0,00003	0,00007	-0,02244	0,02288	0	0,00009
13*13	6	349360	1356180	0	0,02286	0,00002	0,00006	-0,02234	0,02286	0	0,00008
7*7	7	426855	1385777	0	0,02323	0,00002	0,00006	-0,0224	0,02323	0	0,00009
17*17	6	595343	1485401	0	0,0168	0,00001	0,00004	-0,0224	0,016	0	0,00007
19*19	6	734470	1549523	0	0,0229	0,00001	0,00004	-0,0224	0,0229	0	0,00007
23*23	6	1077469	1725307	0	0,00642	0,00001	0,00002	-0,0224	0,00131	0	0,00005

Tabla 16: Comparación de mallas regulares generadas a partir del modelado con mapas de desplazamiento con la malla base.

M.B = es el número de quards de cada malla antes de subdividirse, siendo estos los primeros nueve números primos, para evitar que se repitan los números de polígonos en divisiones posteriores.

N.S. = El nivel de subdivisión de la malla. Se analizaron las subdivisiones entre 1500 y 1'000.000 de quards, ya que las inferiores a simple se dificultaba reconocer el detalle y las mayores de 1'000.000 no tenían diferencias unas de otras.

N. pol. = El número poligonal con el cual se ordeno la tabla.

N. Ver. = Número de vértices que se tomaron en la comparación de las mallas.

Min. Dis. = Distancia mínima entre vértices

Max. Dis. = Distancia máxima entre vértices

Av. Dis = Distancia media

Sta. Des = Desviación estándar



Para ello se compararon 36 mallas con la malla base, la que se genero de la nube de puntos sin filtrar. Estos modelos se generaron a partir de unas mallas regulares de igual número de subdivisiones tanto vertical como horizontalmente, con un área de metro veinte, ya que la muestra debía ser mayor de un metro para que después de la proyección de los vértices se recortaran estos bordes, corrigiendo el error que producirían estos en el momento de subdividir el modelo, ya que estos tienden a redondearse y la resolución poligonal de las esquinas es mayor para esta tipología de malla.

Se realizaron dos tipos de análisis el primero la desviación del modelo, comparando cada malla con la malla base como si fueran una solo, permitiéndonos encontrar una distancia media significativa en cuanto a la distancia promedio entre los vértices de las dos mallas. Posteriormente se realizo un análisis Shell/Shell, que consiste en comparar una malla con respecto a la otra, este análisis parte de tomar la malla generada con la nube de puntos sin filtro como base de comparación, por lo cual la media es la

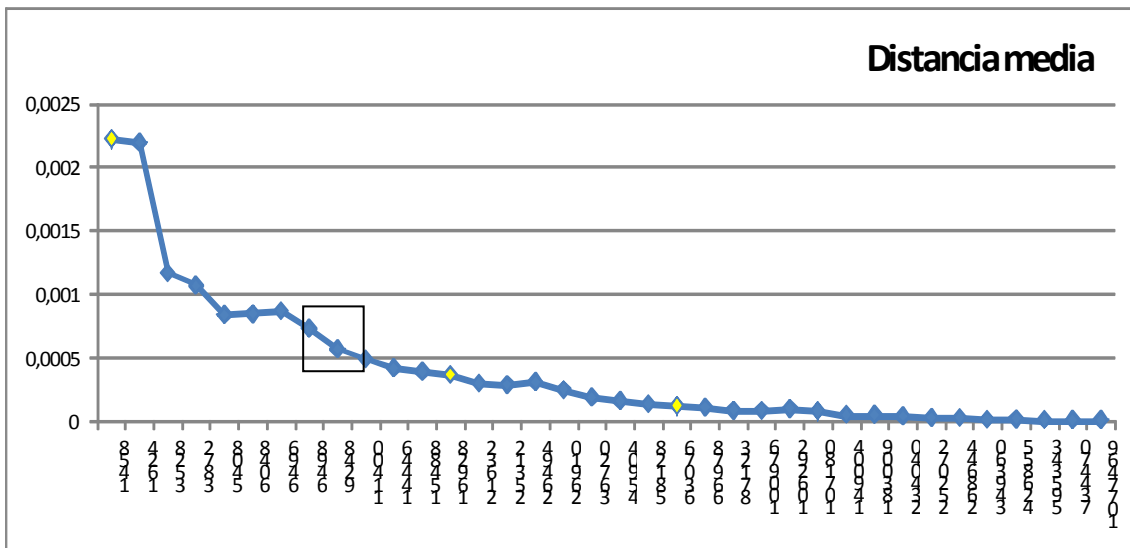


Figura 5.16: Desviación entre modelos, distancia media. Los puntos amarillos representan las imágenes de la figura 5.17.

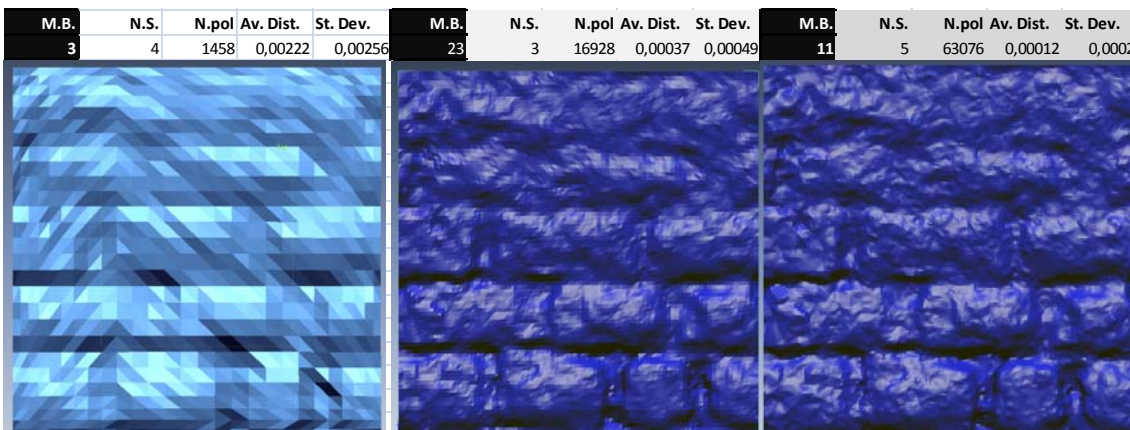


Figura 5.17: Ejemplos de las mallas comparadas.



Figura 5.18: Niveles poligonales quads hasta el punto de equivaler a un pixel en programas de imagen de modelado.

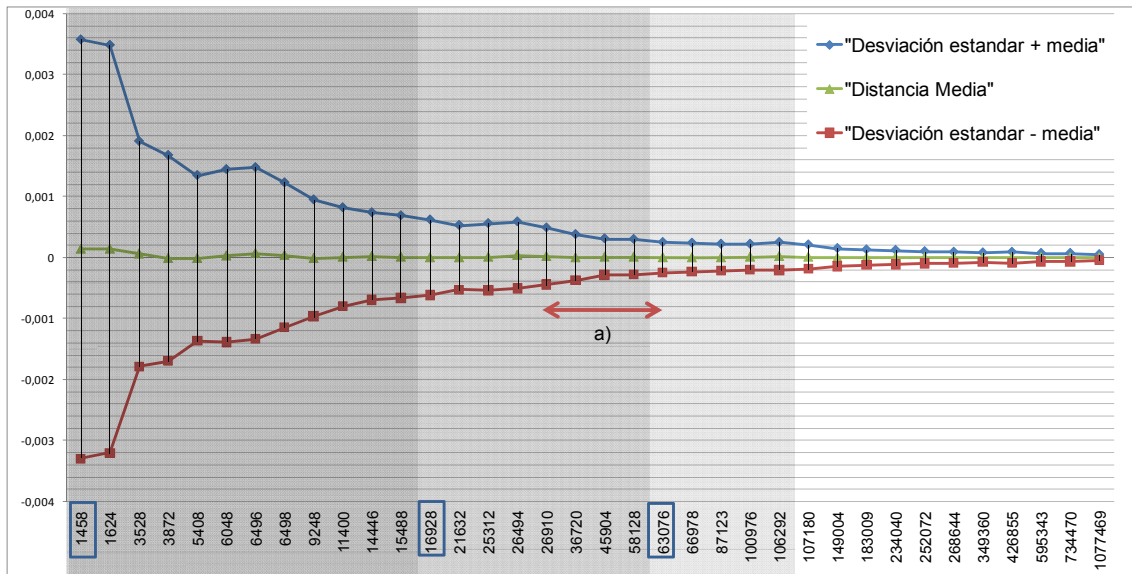


Figura 5.19: Desviación estándar entre malla y malla (Shell/shell). a) Entre este umbral se dificulta encontrar diferencias de resolución, solo perceptible si se comparan secciones inferiores a los 50cm a cierta distancia de dos modelos al mismo tiempo.

Con este análisis de las mallas encontramos que para un metro cuadrado de malla es necesaria una resolución 60.000 polígonos, teniendo en cuenta la resolución del escáner laser Riegl z420i. Llegando a obtener el detalle de una malla con toda la resolución que permite el instrumento, sin ningún filtrado de la misma, por lo cual se puede disminuir la resolución de la malla si se tiene en cuenta el ruido del instrumento y la escala de trabajo para la cual se necesita el modelo,

## 6 ESTRUCTURA Y EXTRACCIÓN DE LOS MAPAS

### 6.1 Estructura de los mapas

La mayoría de proyectos realizados con la tecnología de escáner laser terrestres, que fusionan imágenes de alta resolución con las mallas utilizan el método de textura “per vertex”, lo cual podemos ver en la figura 5.22, en la cual se realizó una sesión fotográfica, y se proyectó con puntos de control la textura en la malla. Esta técnica presenta las siguientes debilidades.

- No se puede asegurar la correcta proyección de la textura con un número reducido de puntos de control.
- La perspectiva de la fotografía genera vacíos de información, cuando se compara con la información del TLS que no presenta distorsión por la perspectiva.
- Al manejar la textura “per vertex” se generan imágenes que no se pueden interpretar como imágenes 2D.
- La manipulación de la textura únicamente en escenarios 3D dificulta la integración entre imágenes, las cuales tienen que ser manipuladas con anterioridad, impidiendo correcciones después de ser proyectadas.
- Se dificulta la integración de varios mapas de UV de un mismo modelo.
- Se dificulta la manipulación o corrección de la textura aplicada.
- Consume una gran cantidad de memoria al realizar el proceso de texturizado.

Esta técnica se utiliza por la incapacidad de generar mapas en 2D que correspondan con la proyección de la textura generada desde la fotografía en proyectos de tecnología de TLS, dada la cantidad de polígonos que se generan con esta información, existiendo la limitación de manipular modelos de mallas con millones de polígonos, siendo los procesos de generación de mapas de los modelos técnicas que se basan en miles de polígonos y no de millones, siendo manipulables cantidades como 200.000 polígonos, cuando este número crece las mallas se convierten en elementos difíciles de manejar, impidiendo un adecuado post procesamiento.

Este proceso de estructuración de los mapas 2D, se puede considerar semiautomático, ya que la proyección y manejo del espacio de la imagen se ha estudiado con profundidad, estableciendo procesos que dejan un mínimo de espacio sin utilizar en el mapa, lo cual permite un procesamiento relativamente rápido en relación del tamaño de mapa, a diferencia de mapas de UV que necesitan espacios vacíos para acomodar grandes planos del modelo.

Este tipo de técnica se puede aplicar para cualquier tipo de mapa, ya que existen procesos automáticos para generar esta clase de mapas cuando el modelo no tiene UV que establezcan un vínculo entre las imágenes 2D y el modelo, siendo imprescindible para esta integración.

Otra técnica que se ha desarrollado ampliamente es generar mapas de UV de forma automática, determinando un patrón de clasificación de las superficies del modelo según su dirección, la cual puede ser restringida a cierto número de vistas, siendo usualmente 6, esto permite generar mapas de UV de gran tamaño que coincidan con una misma orientación, pero es más común que se generen mapas sobre-segmentados, con proyecciones con polígonos individuales, de difícil interpretación en el modelo. Estos procesos también generan mapas que no aprovechan el espacio del mapa, ya que al ser automáticos, no pueden interpretar el manejo del espacio y grandes planos



Figura 5.21: UV automáticas. Fuente: BERALDIN, J-A, Virtualizing a Byzantine Crypt by Combining High-resolution Textures with Laser Scanner 3D Data, VSMM 2002 Schedule, Date: 25~27 September 2002, Venue: Hilton Hotel, Gyeongju, Korea

pueden ocupar un espacio considerable, mientras que los pequeños se ven arrinconados desaprovechando hasta un 50% del espacio del mapa, lo cual genera mapas muy grandes al punto de perder resolución del mapa, porque esta distribución genera mapas en las que el texel es menor que la resolución que permite el mapa. Siendo necesaria generar los mapas en algunos procesos como el de colorear la malla desde la nube de puntos en múltiples mapas, los cuales posteriormente se reorganizaran y se reestructuraran en un único mapa que permita la adecuada estructura de los mapas de UV, aprovechando de la mejor forma posible la resolución del mapa y la información útil que en él se almacene.

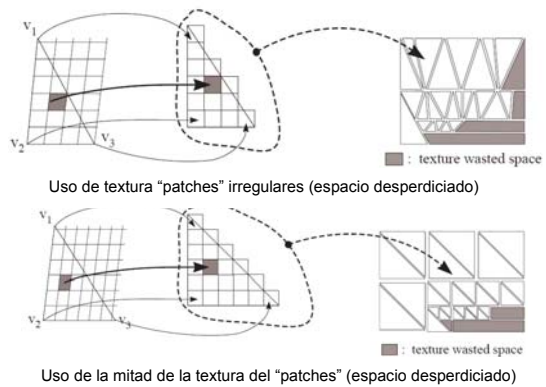


Figura 5.22: Maximisar el espacio de las UV  
Fuente: CIGNONI, P., A general method for preserving attribute values on simplified meshes, Istituto di Elaborazione dell'Informazione – Consiglio Nazionale delle Ricerche

Entre estos procesos semiautomáticos encontramos el Polycube, el cual racionaliza al máximo la proyección de los mapas, siendo un campo de estudio en desarrollo, en el cual el modelo se reinterpreta como figuras geométricas planas básicas, proyectando la estructura de los mapas en cubos. En este proceso el mapa de PolyCube se construye mediante procesos de optimización del mapa en la malla, siendo el primer paso es envolver los vértices del UV, con ello promedian estos vértices en líneas rectas promedio de la geometría y la dirección de esta, el paso siguiente es cerrar la malla, después se proyectan los vértices siguiendo la normal hacia una superficie de cubos, posteriormente se envuelve otra vez el resultado y finalmente se optimiza la posición de la textura. Este proceso tiene en cuenta la Parametrización de la proyección utilizando diferentes técnicas, como el "mean value coordinates", el método de MIPS, la extensión del MIPS y la simple proyección. Con esta técnica se busca<sup>78</sup>:

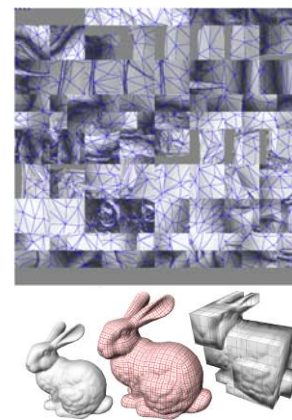


Figura 5.23: PolyCube  
Fuente: TARINI, Marco, PolyCube-Maps, Visual Computing Lab, ISTI / CNR. Pisa

- Dependencia de la malla: Los diferentes niveles de detalle (LOD) de un modelo de multi-resolución requieren generalmente una Parametrización individual y una textura que coincida en todos los niveles del detalle del modelo multi-resolución.
- Filtros inadecuados: Tanto el Mip-mapping y la bilinear interpolation requieren que los texeles sean continuos, lo cual no siempre es correcto en la unión de los bordes de los patch, generando uniones visibles entre los segmentos de la proyección.
- Desperdicio en la memoria de la textura: Incluso los mejores algoritmos de compresión automática no pueden evitar que alguna parte del modelo quede sin textura aplicada. La superficie que no está cubierta de texels se usa parcialmente y se alargan sus límites, pero en general no almacenan ninguna información y se considera espacio del mapa desperdiciado.

<sup>78</sup> TARINI, Marco, PolyCube-Maps, Visual Computing Lab, ISTI / CNR, Pisa

## Estructura de las UV:

A diferencia de los ejes X, Y, Z, que son las coordenadas del objeto 3D original en el espacio del modelo, están también las coordenadas U V de la transformación del objeto, agregando información a la superficie del objeto.

Cuando un modelo es creado como una malla poligonal en un programa de modelado, las coordenadas UV se generan de forma automática para cada vértice de la malla, por ello la técnica de UV mapping solo se usa en geometrías complejas, ya que las platónicas, solidas, primitivas, o formas regulares pueden tener mapas proyectados automáticamente gracias a parámetros preestablecidos.

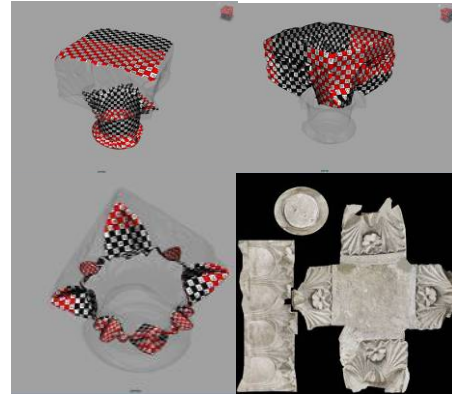


Figura 5.25. Estructura del mapa de color

Existen formas automáticas de desdoblar la malla de triángulos utilizando diferentes capas para secciones de la malla por separado en un mismo modelo. Si el modelo se asemeja o es una esfera se pueden generar una proyección que desdoble este objeto con la forma regular, esto nos permite seleccionar partes del modelo y proyectarlas independientemente según su geometría, para ser posteriormente editadas y unidad como conjunto.

Es importante conocer que las coordenadas de las UV son aplicadas por cara y no por vértice, esto significa que un mismo vértice puede tener coordenadas UV separadas para cada triángulo, y que los triángulos adyacentes pueden dividirse y posicionarse en diferentes partes del mapa, permitiendo un mayor aprovechamiento del espacio del mapa para no desperdiciar memoria en espacios vacíos.

El primer paso para desdoblar el modelo es que corresponda con los ejes del proyecto, para facilitar los diferentes tipos de proyección, en las vistas axonométricas. A diferencia de los desdoblamientos tradicionales en donde las UV no necesitan ninguna interpretación métrica se estira y modifica el mapa para que sea más manipulable posible y para que no malgaste espacios en el mapa aprovechando al máximo la resolución que este otorgue teniendo en cuenta el tamaño del archivo generado. Por ello para plantear un mapa de UV que tenga medidas reales en el espacio de 0 a 1 en UVW hay que realizar proyecciones perpendiculares a los planos y las zonas de mayor curvatura hay que fijar zonas que conserven valores reales y las demás que se retraen y contraen al mismo tiempo se proyectaran mal, por ello de segmentar según la geometría el modelo de UV. También se puede como fase previa a la definición de los mapas, hacer un auto UV a seis caras (o más dependiendo el modelo) la cual va a mostrar las zonas de mayor tamaño que tienen la misma orientación. De esta forma se puede excluir zonas grandes y trabajar directamente con las que más se sobre fragmentan.

Por otra parte las UV tienen que contemplar también de qué forma se tomaron las fotos, ya que estas se tienen que posicionar de igual forma que el mapa, llegando a descomponer la foto en planos que se puedan encajar en el mapa. Para ello se genera un tratamiento de la imagen buscando dos objetivos, la homogeneidad entre fotos, en las superficies comunes, sobretodo los ángulos del modelo 3D y corregir la iluminación de la foto quitando las sombras de la textura y dejando solo la información de color, igualmente las zonas de sobre exposición y que reflejen la luz en el modelo se tienen que oscurecer o nivelar con respecto al resto de la textura mediante mascarar como forma de aislarlas y no afectar al resto. En este proceso no se busca encontrar o resaltar el detalle, por lo contrario el contraste en la imagen imposibilita la adecuada homogenización entre imágenes.

En el proceso de generar el mapa de UV teniendo en cuenta el tipo de extracción que se va a generar posteriormente se tiene en cuenta que no se solape ninguna información de las UV, porque impiden cualquier proceso posterior.

El aprovechamiento del espacio de las UV es fundamental, ya que este determina el rendimiento del mapa en el objeto, si el mapa es muy grande retarda el procesamiento, si es pequeño pero pierde información, en cambio si es compacto y con buena resolución puede almacenar un mayor número de datos, manteniendo los archivos de un tamaño considerable pequeño, con respecto a la información almacenada, lo cual depende también del formato del archivo.

UV representan la proyección en unidades de vectores en el espacio en el plano x y:

$$U = \sin \theta \cos \phi = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$$

$$v = \sin \theta \sin \phi = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$$

UVW mapping se puede interpretar como los ejes cartesianos en los mapas, en donde cada punto en el UVW mapa corresponde a un punto en la superficie del objeto, en donde el diseñador o programador genera un proceso matemático para aplicar el mapa, en donde cada punto de la textura es asignado al punto en XYZ de la superficie. Entendiendo que entre más ordenado el mapa (teniendo en cuenta la disposición de los polígonos) más fácil es trabajar con las texturas.

## 6.2 Extracción de la textura

Debido a la complejidad de los edificios patrimoniales y la precisión de los modelos, se refleja en la calidad de los resultados, siendo tema de discusión las ventajas y limitantes de los procesos automáticos de image-base<sup>79</sup>. Primando en ello el problema de la oclusión, por un lado porque la malla oculta zonas por la misma irregularidad de la malla en donde la self oclusión se reduce al proyectarse la información de color sobre una modelo 2.5D pero al proyectarse las texturas sobre una malla 3D el error mayor, por otro lado esta las ocultaciones en la toma de datos, en las cuales las informaciones de una imagen se entremezclan con las de otra en el proceso de recuperar zonas sin información de color, por lo cual la iluminación juega un papel fundamental en la integración de estas informaciones

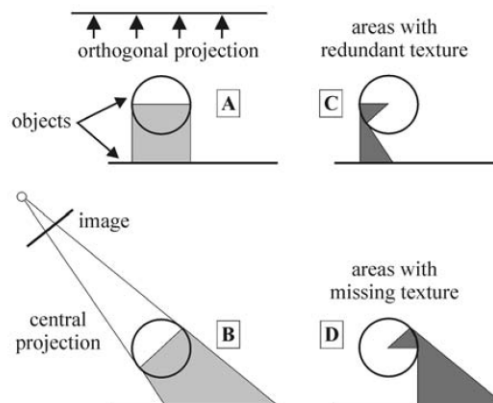
La oclusión:

A: Oclusión de la superficie en la dirección de la orto proyección

B: Objeto que restringe un área en la imagen

C: Zona del objeto con redundancia en la textura de la imagen

D: Zona del objeto que bloquea la textura de la imagen requerida en la orto proyección



<sup>79</sup> Grammatikopoulos, L., Automatic Multi-View Texture Mapping Of 3d Surface Projections, Department of Surveying, Technological Educational Institute of Athens, Greece, 2007.

## Color del vértice

Existen tres procesos en los cuales podemos pasar la información de los vértices de la sopa de polígonos a una malla estructurada y con las UV desarrolladas para una lectura como imagen y los tres procesos parten de extraer el color de la nube de puntos a los vértices de la malla, los cuales se funden en el polígono, determinando el valores de color de este en la interpolación del valor de color de los tres vértices que componen una malla.

Para almacenar este color en los vértices no es necesaria una estructura de UV, ya que queda el valor en el vértice per-vertex<sup>80</sup> y no necesita una referencia con un mapa, por lo cual para extraerla como una textura hay que generar esta relación en el modelo simplificado, mediante procesos automáticos, el problema principal de ello es el consumo de memoria del ordenador, ya que tiene que mantener la relación entre el desdoblamiento de las UV y la referencia de la textura, lo cual actualmente se desarrolla proyectándolas en las mismas direcciones, desdoblado las UV sobre las seis caras que formarían un cubo que contendrían el modelo, al mismo tiempo que almacenaría sobre esas caras la información extraída del vértice, limitando de esta forma el consumo de procesamiento, lo cual no pasaría si al modelo de baja resolución tuviera sus propias UV lo cual consumiría más memoria para exportar esta información.

Por ello de que la información extraída en los programas de ingeniería inversa sea automatizada y no permita una organización en el espacio de las UV.

La otra limitante en cuanto a consumo de la memoria en el proceso de extracción, es el tamaño del mapa, el número de mapas y el tamaño de texel extraído, siendo variables que juegan con el tamaño del modelo y que entran en conflicto cuando el texel que se quiere es muy pequeño en relación del tamaño del mapa, ya que al necesitar mayor precisión el mapa debe ser de mayor tamaño, por lo cual al necesitar la máxima resolución del texel la textura no se puede desarrollar en un único mapa, llegando a un límite de mapas de 4K y una cantidad de 4 mapas en modelos complejos.

## La resolución y los texels

**El pixel:** (acrónimo del inglés picture element, "elemento de imagen") es la menor unidad homogénea en color que forma parte de una imagen digital.

En las imágenes de mapa de bits o en los dispositivos gráficos cada píxel se codifica mediante un conjunto de bits de longitud determinada (la llamada profundidad de color), por ejemplo, puede codificarse un píxel con un byte (8 bits), de manera que cada píxel admite 256 variaciones (28 variaciones con repetición de 2 valores posibles en un bit tomados de 8 en 8).



Figura 5.26: Mapa con poca resolución en los Texels

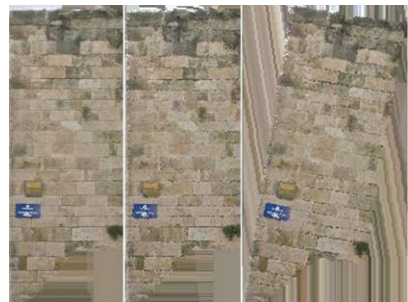


Figura 5.27: Múltiples mapas con mayor resolución

<sup>80</sup> CIGNONI, P., A general method for preserving attribute values on simplified meshes, Istituto di Elaborazione dell'Informazione – Consiglio Nazionale delle Ricerche, 1998

En las imágenes de color verdadero, se suelen usar tres bytes para definir un color, es decir, en total podemos representar un total de 224 colores, que suman 16.777.216 opciones de color. (32 bits son los mismos colores que 24 bits, pero tiene 8 bits más para transparencia) Un píxel alcanza los 8 bits ( $2^8$  colores), 24 bits ( $2^{24}$  colores) o 40 bits ( $2^{40}$  colores). Para poder transformar la información numérica que almacena un píxel en un color hemos de conocer, además de la profundidad y brillo del color (el tamaño en bits del píxel), el modelo de color que estamos usando. Por ejemplo, el modelo de color RGB (Red-Green-Blue) permite crear un color componiendo tres colores básicos: el rojo, el verde y el azul. De esta forma, en función de la cantidad de cada uno de ellos que usemos veremos un resultado u otro. Por ejemplo, el color amarillo se obtiene mezclando el rojo y el verde. Las distintas tonalidades del amarillo se obtienen variando la proporción en que intervienen ambas componentes. En el modelo RGB es frecuente que se usen 8 bits para representar la proporción de cada una de las tres componentes primarias. De esta forma, cuando una de las componentes vale 0, significa que esta no interviene en la mezcla y cuando vale 255 ( $2^8 - 1$ ) significa que interviene aportando el máximo de ese tono.

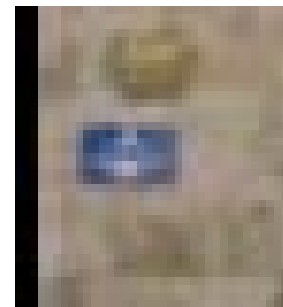
Un megapíxel (Mpx) equivale a 1 millón de píxeles (a diferencia de otras medidas usadas en la computación en donde se suele utilizar la base de 1024, en lugar de 1000, para los prefijos debido a su conveniencia con el uso del sistema binario. Usualmente se utiliza esta unidad para expresar la resolución de imagen de cámaras digitales, por ejemplo, una cámara que puede tomar fotografías con una resolución de  $2048 \times 1536$  píxeles se dice que tiene 3,1 mega píxeles ( $2048 \times 1536 = 3.145.728$ ).

**El Texel:** (contracción del inglés texture element, o también texture pixel) es la unidad mínima de una textura aplicada a una superficie, usada en gráficos por computador. De la misma forma que una imagen digital se representa mediante una matriz de píxeles, una textura se puede representar mediante un matriz de texels.

Cuando se aplica una textura a una superficie 3D, en el proceso conocido como mapeado de texturas, se asignan texels a los píxeles correspondientes que aparecerán en la imagen final. Un texel puede corresponder a varios píxeles, o bien ser de tamaño inferior a uno, en cuyo caso podría no ser visible. El hecho de que un texel corresponda a varios píxeles no quiere decir que éstos vayan a tener un color uniforme. En los ordenadores modernos, este proceso es llevado a cabo en la tarjeta gráfica.<sup>81</sup>

Con una resolución de un punto cada centímetro se debe extraer la información con un mínimo de 0,002m aunque para buscar este valor haya que tomar un rango menor como 0,0004m por ejemplo, lo cual depende de la resolución del segmento de la malla que se trabaje y su resolución particular.

Extracción de texturas en superficies clasificadas



512



1024



2048

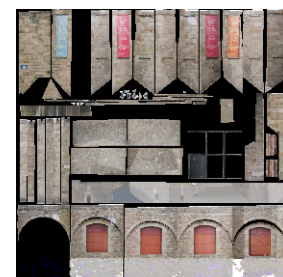


Figura 5.28: Resolución del mapa de color.

<sup>81</sup> [http://es.wikipedia.org/wiki/Texel\\_\(gr%C3%A1ficos\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Texel_(gr%C3%A1ficos))



Se generaron tres texturas

- Dimensión en pixeles 1024\*4096 12 megas  
Tamaño del documento 100\*400 cm resolución 10,236 pixeles/cm
- Dimensión en pixeles 4096\*2048 24 megas  
Tamaño del documento 400\*200 cm resolución 10,236 pixeles/cm
- Dimensión en pixeles 4096\*1024 12 megas  
Tamaño del documento 400\*100 cm resolución 10,236 pixeles/cm

Filtro de las texturas:

El filtrado de textura (llamado también suavizado de textura) es un proceso usado para determinar la textura de color proveniente del mapa de textura de los pixeles, usando el color de los texeles cercanos (pixeles de la textura). En poco tiempo mezcla la textura de los pixels cercanos para romperlos en pequeños pixeles.

Por defecto los programas que proyectan el color de los vértices como texturas aplican filtros de imagen para corregir que la textura este pixelada, lo cual dificulta comparar las resoluciones de la proyección, al modificar estos filtros encontramos que existen en este tipo de aplicaciones los siguientes procesos de filtrado de la textura:

1. Filtro mínimo: Estos afectan solo a uno de los mapas si se generan múltiples mapas y el cambio que introducen en la textura es difícilmente perceptible, entre ellos encontramos:
  - Nearest, Linear
  - Mipmap
  - linear mipmap
  - mipmap linear
  - linear mipmap linera
2. Filtro mag: Si la extracción es correcta no se ve mucho cambio entre estos parámetros, pero si es pixelada se suaviza mucho la imagen y al cambiar el tipo de filtro se ve un cambio significativo en la resolución del modelo. Los filtros que tiene son:
  - Nearest
  - Linear

Debido a que el proceso de reorganización de esta información del color, se realiza no por pixel, sino por procesos de iluminación que pasan la información de color de una malla con UV desorganizadas a una malla estructurada manualmente, mediante rallo en el proceso de Lightrace, estos pixeles se funden en la textura de mayor resolución a la cual se proyecta esta información, por lo cual los filtros en el proceso de extracción del vértice de la malla de escáner laser a la malla reducida son innecesarios, ya que habría un doble suavizado sobre la textura y los procesos de suavizado para evitar se pixele la imagen se puede realizar como paso posterior dependiendo del tipo de ruido o definición de la imagen.

## METODOLOGÍAS DE EXTRACCIÓN DE LA INFORMACIÓN DE LOS VÉRTICES:

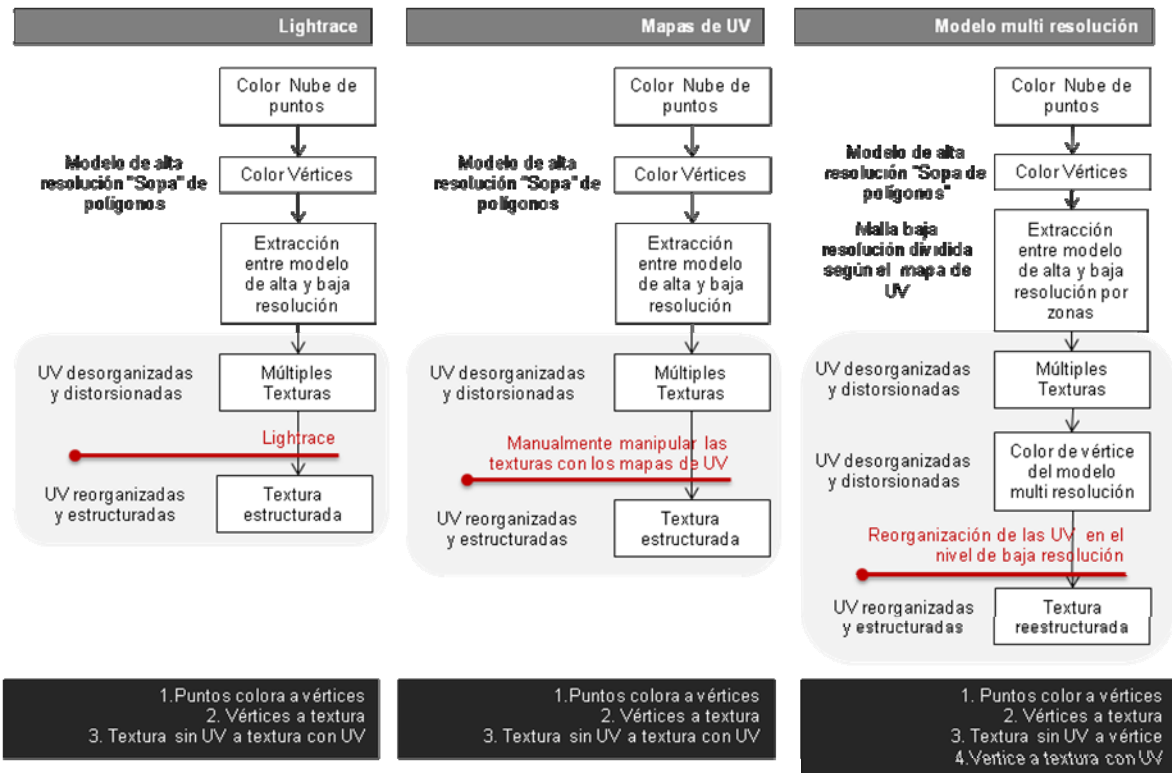


Figura 5.29: Metodologías para reestructurar la información de color de la nube de puntos.

Definidas las limitantes de la extracción de la información de los vértices, se plantea la forma de reorganizar la información de las texturas, lo cual nos sirve tanto con la información de color, intensidad o iluminación entre modelos.

El primer proceso parte de la interacción de dos mallas, una con la información de color desordenada a través de diversos mapas, y otra con una estructura de UV organizada manualmente. Para pasar la información de una malla a la otra se utiliza la técnica de Lightrace, la cual proyecta la información de una malla a la otra mediante un número elevado de rallo, equivalentes a la resolución de la textura en píxeles, trasladando la información de una malla a la otra punto a punto y luego fundiéndola.

El segundo proceso de extracción de la textura parte de la afirmación de que ambas mallas tienen un mapa de UV, el cual permite relacionar ambos modelos, de forma manual, evitando perder resolución de un mapa a otro, el cual solo se podría realizar de las zonas que poseen un tamaño mayor en los mapas de UV, por lo cual necesita el proceso anterior para complementar la información que falte, siendo un proceso extenso y menos eficiente que el Lightrace.

Por último tenemos el uso de programas de modelado de alta resolución, en el cual se crea un modelo de retopología con quads, el cual se usa como modelo de baja resolución sobre el cual extraer la información de los vértices del modelo de escáner laser, posteriormente se introduce en los programas de "image sculpting", en el cual se subdivide llegando a tener polígonos del tamaño de los píxeles, se corrigen las UV en el modelo de baja resolución y la información de la textura se traspasa a los polígonos del modelo, siendo más específicos se pasa a los píxeles y luego se extraen como textura gracias a las UV reestructuradas.

### **Mapas complementarios:**

Se puede texturizar modelos complejos y densos con precisión con fotografías de varias formas:

Colocando el modelo 3d y la proyección del plano de la fotografía en la misma posición, permitiendo proyectar esta información de forma parcial y sistemática en el modelo, permitiendo una manipulación de esta textura en 3d al permitir moverla, estirla interactivamente haciéndola coincidir con el modelo. Este proceso también se puede realizar mediante puntos de control en programas de ingeniería inversa, pero impide la corrección de la proyección,

Basándose en los diferentes mapas, comenzando con el mapa de UV que se proyectan ortogonalmente, considerando que la malla sigue la geometría del modelo y no como mallas libres, para que los vértices sean la referencia para encajar los bordes del objeto de la foto con la malla, siendo otros mapas ayudas para identificar estos límites, como lo serían los mapas de desplazamiento y normales, permitiendo la rectificación de la imagen con puntos de control. Este mismo proceso se puede realizar con las mallas libres filtradas por curvatura, utilizando la densidad de la malla como referencia de límite

Proyección tridimensional mediante programas de "image modeling", en donde se puede:

- Colocar en el espacio 3D la textura y el modelo en la misma posición, y se traspara la información de forma selectiva.
- Se proyecta la textura directamente en el modelo y se manipula con herramientas de mover propias del modelado.
- Se proyecta la textura sobre el modelo 3D mediante una geometría 3D como un plano etc.... encontrando la posición que corresponda a ambas
- Clonar la textura sobre el objeto desde una imagen 2D
- Clonar la textura del objeto desde otro modelo 3D

## 7. EVALUACIÓN Y CONCLUSIONES

Comparación de los modelos analizados

	REDUCCIÓN DE LA MALLA		REESTRUCTURACIÓN DE LA MALLA	
	CURVATURA	CLASIFICACIÓN	SEMIAUTOMÁTICO	RETOPOLOGÍA
Nº polígonos	50.000 $\Delta$	50.000 $\Delta$	42.204 $\Delta$	63.160 $\Delta$ 31580 Quards
Tamaño de los archivos	Modelo: 3,23 megas OBJ color: 4056 píxeles TIF 8bits despla:4056 píxeles TIF 32bits	Modelo: 3,35 megas OBJ color: 4056 píxeles TIF 8bits despla:4056 píxeles TIF 32bits	Modelo: 2,70 megas OBJ color: 4056 píxeles TIF 8bits despla:4056 píxeles TIF 32bits	Modelo: 3,40 megas OBJ color: 4056 píxeles TIF 8bits despla:8194 píxeles TIF 32bits
Información almacenada en el mapa <sup>82</sup>	62% Área aprovechada en el mapa de UV. 19.040 píxeles/m <sup>2</sup>	50% Área aprovechada en el mapa de UV. 15.346 píxeles/m <sup>2</sup>	55% Área aprovechada en el mapa de UV. 16.890 píxeles/m <sup>2</sup>	69% Área aprovechada en el mapa de UV. 86.522 píxeles/m <sup>2</sup>
Comparación de malla como un modelo	Distancia máx: 0,30418 Media 0,00347 Desv.está. 0,00463	Distancia máx: 0,30568 Media 0,00437 Desv.está. 0,00539	Distancia máx: 0,31212 Media 0,00665 Desv.está. 0,00795	Distancia máx: 0,30863 Media 0,00411 Desv.está. 0,00553
Comparación con la malla base malla/malla	Distancia min: -0,30418 Distancia máx: 0,29828 Media -0,00003 Desv.está. 0,006	Distancia min: -0,31227 Distancia máx: 0,30598 Media -0,00028 Desv.está. 0,0072	Distancia min: -0,31212 Distancia máx: 0,30887 Media 0,0001 Desv.está. 0,01044	Distancia min: -0,30306 Distancia máx: 0,31041 Media 0,00003 Desv.está. 0,00706
Promedio del detalle de la superficie	Los procesos de suavizado y decimación son los que mejor promedian el detalle de la malla.	Los procesos de suavizado y decimación son los que mejor promedian el detalle de la malla.	El reconocimiento de la geometría en los procesos de detección y clasificación actuales no están dentro del promedio de la superficies	Al generarse del modelo de mayor resolución reconstruyendo sus niveles inferiores a posteriori, los vértices de la malla no coinciden con el promedio de la superficie.
Análisis curvatura	La dirección y continuidad de las superficies es homogénea, con cierto nivel de perturbación de la superficie en las aristas.	La dirección y continuidad de las superficies es homogénea, exceptuando los polígonos cerca de las aristas, los cuales distorsionan esta continuidad.	Superficies definidas y continuas, con bordes definidos.	No tiene una superficie homogénea y tiene mayor perturbación en las zonas de mayor resolución
Secciones del modelo	Suaviza el detalle de las esquinas	Define mejor las aristas del modelo, exceptuando las zonas en las que tiene pocos polígonos.	Suaviza el detalle de las esquinas	Suaviza el detalle de las esquinas
Procesamiento de la malla	Muy rápido	Rápido	Medio	Lento
Tiempo de extracción mapa	Lento	Lento	Lento	Muy rápido
Distribución de la malla	Malla totalmente irregular, con una densidad poligonal que depende del detalle y la proximidad a los bordes	Malla de patrón irregular con una distribución poligonal uniforme	Malla regular, estructura discontinua y sobre-segmentación en los bordes	Malla regular de estructura continua y uniforme. La resolución depende del detalle necesario
Edición de la malla	Solo permite modificar vértices	Solo permite modificar vértices	Mediante herramientas de modelado	Mediante herramientas de modelado
Estructura del mapa de UV	Al ser una malla irregular la proyección de las UV solo puede mantenerse a escala mediante procesos automáticos de UV. Limitante de bordes de cierre en la unión de texturas.	Al estar clasificada por tipologías de mallas y tener bordes definidos, se puede mantener la escala mediante proyecciones perpendiculares al tipo de plano	Se mantiene la escala al desdoblar las UV, con limitantes en formas libres y con problemas en los bordes sobre-segmentados	Se mantiene la escala de las UV en todo el modelo, hasta en modelos orgánicos, ya que se pueden expandir en relación al tamaño de los polígonos.

<sup>82</sup>En el capítulo 5.2.1 pagina 110 la sección de 23m<sup>2</sup> con un aprovechamiento del 60% tenía: 256 = 1.724 píxeles/m<sup>2</sup>.  
512 = 6.898 píxeles/m<sup>2</sup>. 1024 = 27.594 píxeles/m<sup>2</sup>. 2048 = 110.376 píxeles/m<sup>2</sup>

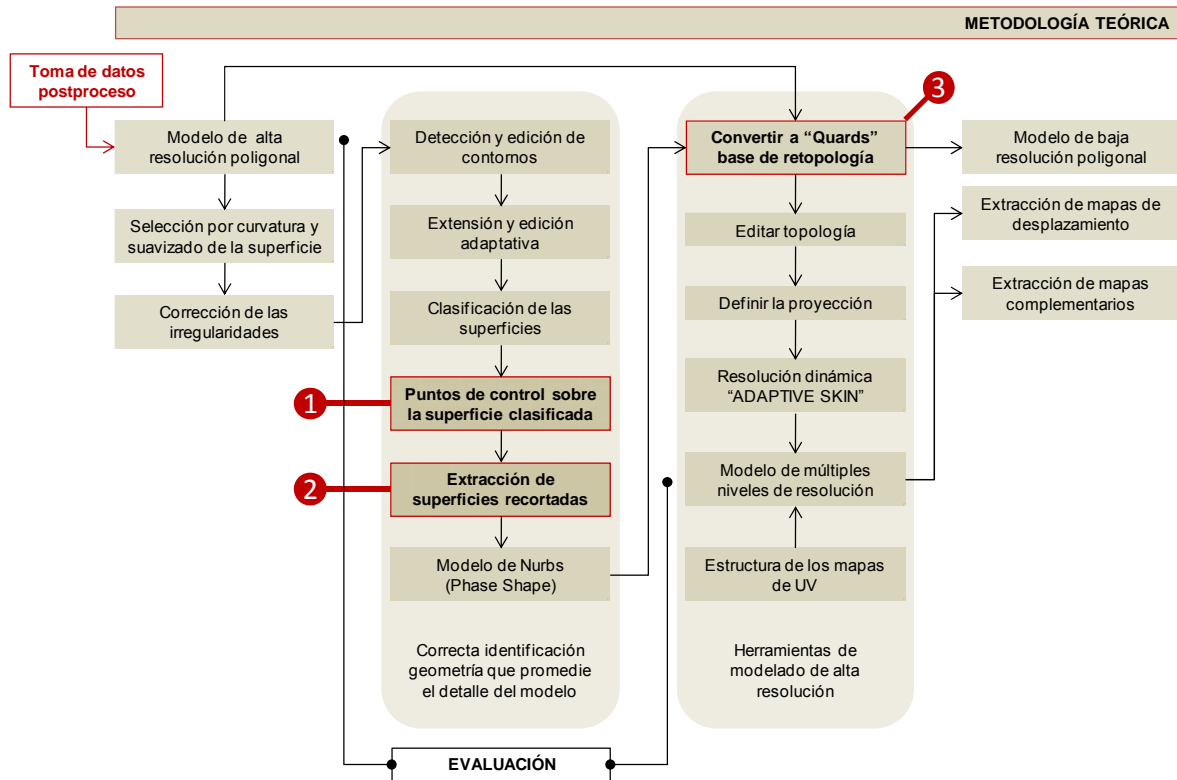
Interacción en otras aplicaciones	Es restringida en programas de simulación y modelado, por ser una malla libre	Es restringida en programas de simulación y modelado, por ser una malla libre	Las nurbs tienen problemas de compatibilidad. Al pasar a polígonos se pierde la distribución de quads convirtiéndose en una malla libre	Compatible con la mayoría de aplicaciones, permitiendo cerrar la malla para aplicaciones de simulación
Errores de las mallas	Errores identificables en herramientas de modelado y al cambiar el tipo de malla	Errores identificables directamente por la reducción de los polígonos	Existe un control de los errores en cada etapa del proceso	Errores de proyección por irregularidades de la malla base y por la redistribución de los puntos al momento de subdividir la malla
Promedio de la superficie	Mediante un proceso de suavizado previo	Mediante un proceso de suavizado previo	Mediante la detección de los bordes del modelo	Mediante puntos proyectados en la malla a una alta resolución.

Con estas comparaciones vemos que los modelos planteados tienen diversas cualidades y debilidades, las cuales hay que tener en cuenta según el proyecto, ya que algunas aplicaciones son más rápidas pero no estructuran la malla y otras son más complejas y generan modelos más manipulables pero gastan un tiempo considerable en su construcción.

Planteando la necesidad de automatizar los procesos, ahorrando el tiempo de procesamiento manual, para poder construir modelos más eficientes, que permitan no solo tener un modelo para visualizar, sino que permita reconocer la geometría de este modelo y de herramientas para poder manipularlo.

En esta búsqueda de compensar las debilidades de los modelos analizados, se plantea una metodología que integra las ventajas de cada uno, comenzando con las técnicas de promedio del detalle de la superficie de la malla, para realizar una detección de la geometría acercándonos al promedio de la superficie, estableciendo una parametrización e identificación de la forma como herramienta de manipulación de esta, generando una malla de baja resolución que se puede utilizar como base topológica de la retopología, para conseguir un modelo de múltiple resolución estructurado que almacene toda la información de la malla base y permita la interacción y la extracción de los mapas de desplazamiento desde una herramienta de modelado de malla de alta resolución.

## Metodología teórica



Esta metodología es teórica, ya que existen obstáculos para su aplicación, pero conceptualmente es la más acertada, porque no solo promedia el detalle de la superficie, sino que lo reconoce geoméricamente, consolidando la utilización de los mapas como el detalle extraído de un modelo volumétrico de alta precisión. Estas limitantes se profundizarán en la etapa doctoral y consisten en:

1. Mejorar la aproximación geométrica del modelo en relación al promedio de los vértices de la superficie. Como comprobamos con las mallas semiautomáticas la detección de la geometría se distancia demasiado del promedio de la malla.
2. La malla generada por el reconocimiento geométrico no tienen continuidad con respecto a la topología de la superficie. Y no hay independencia en el proceso de subdivisión de la malla entre aristas y superficies clasificadas, por lo cual surge una sobre-segmentación de la malla en las aristas
3. Al pasar de nurbs a polígonos se pierde la propiedad de la malla de celdas o quards al subdividirse en triángulos, lo cual es una limitante de modelado ya que desorganiza la malla convirtiéndola en una malla libre, por lo cual hay que buscar como regresar a quards o como no perder esta propiedad en la transición de nurbs a polígonos.

## CONCLUSIONES:

- El suavizado de la malla como proceso previo a la decimación ayuda a promediar el detalle de la superficie, afectando negativamente a las aristas del modelo, redondeándolas o aumentando el ruido en ellas.
- Los procesos semiautomáticos actuales al centrarse en la detección de los contornos no generan una malla en el promedio del detalle de la superficie.
- La construcción de modelos a partir de la detección de los orillos del modelo, tanto desde la nube de puntos<sup>83</sup> como desde una malla<sup>84</sup>, reduce considerablemente la precisión de la información de la tecnología de laser escáner, en relación a procesos de decimación o de reconstrucción de mallas.
- Los mapas de desplazamiento generados a partir de la correspondencia de vértices tiene mayor control sobre la información que exporta, aumentando la flexibilidad y rapidez de esta extracción.
- Los mapas complementarios permiten registrar las modificaciones de la malla y la identificación de elementos sobre ella.
- Como herramienta de modelado los mapas de desplazamiento permiten corregir y alterar la malla en diferentes capas.
- La manipulación e interpretación del detalle a través de mapas es más eficiente que en el modelo 3D, permitiendo una visión integral del detalle del modelo.
- El campo de los mapas de desplazamiento a cobrado mayor interés no solo como herramienta para renderizar, sino como un verdadero desplazamiento gracias a las nuevas tarjetas graficas, que permiten dividir y desplazar los vértices en aplicaciones de tiempo real, permitiendo que estas superficies de mayor detalle sean tangibles y se han abierto campos de investigación en el que los mapas de desplazamiento permiten esculpir un modelo de alta resolución poligonal<sup>85</sup>.
- Llegamos a un punto en que los limites de la tecnología no es de carácter técnico, ya no son estas las limitantes, lo que nos limita es la forma en como las aplicamos y nuestro desconocimiento de los avances en diferentes campos que complementan nuestro desarrollo profesional.

---

<sup>83</sup> Christian Briese, Christian Doppler Laboratory "Spatial Data from Laser Scanning and AR elíneoat e Sensing", Austria, 2008.

<sup>84</sup> Ioannis Stamos, Dept. of Computer Science, New

<sup>85</sup> JAGNOW, Robert Carl, Virtual Sculpting with Haptic Displacement Maps, Tesis, Submitted to the Department of Electrical Engineering and Computer Science in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Computer Science and Engineering at the MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2001

## **BIBLIOGRAFÍA**

### **Laser escáner Terrestre**

BARNEA Shahr , Registration Of Terrestrial Laser Scans Via Image Based Features, ISPRS Workshop on Laser Scanning and SilviLaser, Finland, 2007.

BARNEA Shahr, Segmentation Of Terrestrial Laser Scanning Data By Integrating Range And Image Content, Transportation and Geo-Information, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing 2008.

BOEHLER, Wolfgang, Investigating Laser Scanner Accuracy, i3mainz, Institute for Spatial Information and Surveying Technology, FH Mainz, University of Applied Sciences, Mainz, Germany

CALLIERI, M., VCLab's Tools for 3D range data processing, Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione (ISTI) – Consiglio Nazionale delle Ricerche, Pisa, Italy, 2003.

NEUBAUER, W., Combined High Resolution Laser Scanning And Photogrammetricaldocumentation Of The Pyramids At Giza, Cipa 2005 XX, International Symposium, Torino, Italy, 2005

PFEIFER, Norbert, Laser Scanning – Principles And Applications, Vienna University of Technology y Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Austria, Tesis, 2007.

KERSTEN, Thomas, Geometric Accuracy Investigations of the Latest Terrestrial Laser Scanning Systems, Integrating Generations FIG Working Week, Stockholm, Sweden, 2008.

Laboratorio de modelización Virtual de la Ciudad, Universidad Politécnica de Barcelona, Catalunya [http://www-cpsv.upc.es/lmvc/lmvc\\_archivos/frame.htm](http://www-cpsv.upc.es/lmvc/lmvc_archivos/frame.htm)

### **Escaner Aereo Lidar**

Visintini, D, e-preimetry, international quarterly e-journal on sciences and technologies 2007

VOSELMAN, George, 3d Building Model Reconstruction From Point Clouds And Ground Plans, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXXIV-3/W4 Annapolis, 2001

HANSEN, Wolfgang, Line-Based Registration Of Terrestrial And Airborne Lidar Data, FGAN-FOM Research Institute of Optronics and Pattern Recognition Gutleuthausstr. 1, 76275 Ettlingen, Germany, 2008.

AGUGIARO, G, Definition Of A Transition Surface With The Purpose Of Integration Between A Laser Scanner 3d Model And A Low Resolution DTM, Università Di Padova, Laboratorio de Rilevamento e Geomatica, Padova, Italia, 2009.

### **Lasermap:**

ANTOVA, Gergana,. Precise Mapping With 3d Laser Scanning, University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, Bulgaria, 2006, Publicado en International Conference on Cartography and Gis Jun 2006 [http://www.datamap-bg.com/conference\\_cd/pdf/P3\\_GAntova.pdf](http://www.datamap-bg.com/conference_cd/pdf/P3_GAntova.pdf)

BÖHM, Jan,. Facade Detail From Incomplete Range Data, Institute for Photogrammetry, Universität Stuttgart, Germany, 2008, Publicado en XXIST ISPRS Congress: 3-11, pág 653-658 Beijing, China, 2008 [http://www.isprs.org/congresses/beijing2008/proceedings/5\\_pdf/115.pdf](http://www.isprs.org/congresses/beijing2008/proceedings/5_pdf/115.pdf)



BÖHM, Jan., Facade Modeling For Historical Architecture, Institute for Photogrammetry, Universität Stuttgart, Germany, Publicado en XXI International CIPA Symposium, Athens, Greece, 2007 [http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/2007/boehm\\_CIPA\\_2007.pdf](http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/2007/boehm_CIPA_2007.pdf)

CIGNONI, Paolo, Adaptive TetraPuzzles: Ecient Out-of-Core Construction and Visualization of Gigantic Multiresolution Polygonal Models, ISTI-CNR, Pisa, 2004  
[http://vcg.isti.cnr.it/publications/papers/vbdam\\_sig04.pdf](http://vcg.isti.cnr.it/publications/papers/vbdam_sig04.pdf)

CIGNONI, Paolo, External Memory Management and Simplification of Huge Meshes, ISTI-CNR, Pisa, 2005. [http://vcg.isti.cnr.it/publications/papers/oemm\\_tvcg.pdf](http://vcg.isti.cnr.it/publications/papers/oemm_tvcg.pdf)

IOCCHI, Luca,. Building 3d Maps With Semantic Elements Integrating 2d Laser, Stereo Vision And Imu On A Mobile Robot, 2nd ISPRS International Workshop, 3D-ARCH, "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures", ETH Zurich, 2007  
[http://www.commission5.isprs.org/3darch07/pdf/iocchi\\_pellegrini.pdf](http://www.commission5.isprs.org/3darch07/pdf/iocchi_pellegrini.pdf)

TARINI, Marco, PolyCube-Maps, Visual Computing Lab, ISTI / CNR, Pisa, 2004.  
[http://vcg.isti.cnr.it/publications/papers/vbdam\\_sig04.pdf](http://vcg.isti.cnr.it/publications/papers/vbdam_sig04.pdf)

ÖHRN, Tina, Different Mapping Techniques for Realistic Surfaces, Department of Mathematics, Natural and Computer Science, University of Gävle, Gävle, Sweden  
<http://www.creaf.uab.es/MiraMon/>

ARNOLD, D., VCLab's Tools for 3D range data processing, 4th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage VAST, 2003

#### **INGENIERÍA INVERSA. REDUCCIÓN POLIGONAL:**

ARNOLD, D., VCLab's Tools for 3D range data processing, 4th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage VAST, 2003

BERALDIN, J-A, Virtualizing a Byzantine Crypt by Combining High-resolution Textures with Laser Scanner 3D Data, VSMM 2002 Schedule, Date: 25~27 September 2002, Venue: Hilton Hotel, Gyeongju, Korea

BELTON, David Curtin University of Technology Perth WA, Australia, 2006

BARNEA, Shahrar Segmentation Of Terrestrial Laser Scanning Data By Integrating Range And Image Content, Transportation and Geo-Information, Civil and Environmental Engineering Faculty, Technion – Israel Institute of Technology, Haifa, 2008

BOEHLER, Wolfgang, Investigating Laser Scanner Accuracy, i3mainz, Institute for Spatial Information and Surveying Technology, FH Mainz, University of Applied Sciences, Mainz, Germany

BRIESE Christian, Christian Doppler Laboratory "Spatial Data from Laser Scanning and Remote Sensing", Vienna, Austria, 2008.

BRIESE, Christian, Towards Automatic Feature Line Modelling From Terrestrial Laser Scanner Data, Christian Doppler Laboratory "Spatial Data from Laser Scanning and Remote Sensing" Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology, 1040 Vienna, Austria, 2008.

CIGNONI, P., A general method for preserving attribute values on simplified meshes, Istituto di Elaborazione dell'Informazione – Consiglio Nazionale delle Ricerche, 1998

CIGNONI P., , A Comparison of Mesh Simplification Algorithms, Computer and Graphics, 22(1), 1998  
[http://www.cs.ualberta.ca/~anup/Courses/604/Presentation\\_files/Polygon\\_Simplification/7.pdf](http://www.cs.ualberta.ca/~anup/Courses/604/Presentation_files/Polygon_Simplification/7.pdf)

CIGNONI, Paolo, External Memory Management and Simplification of Huge Meshes, 2004.

CIGNONI, Paolo, Adaptive TetraPuzzles: Efficient Out-of-Core Construction and Visualization of Gigantic Multiresolution Polygonal Models, 2005

COHEN, Jonathan, Simplification Envelopes, Proceedings ACM SIGGRAPH, New Orleans, 1996, [http://www.cs.umd.edu/projects/gvill/papers/simp\\_env.pdf](http://www.cs.umd.edu/projects/gvill/papers/simp_env.pdf) Source code:  
<http://www.cs.unc.edu/~geom/envelope.html>

CHEOL Myeong Ko, Feature-preserving Simplification of Polygonal Surface based on Half-edge Contraction Manner, Multimedia/Graphics Lab. Dept. of Computer Science, Yonsei Univ., Seodaemun-Gu, Seoul 120-749, Korea. <ftp://ftp.risc.uni-linz.ac.at/pub/private/ADG02/ko-paper.pdf>.

CHENG, Irene, 3D Model Simplification & Efficient Transmission, Department of Computing Science, University of Alberta

DE FLORIANI, Leila, Simplification (part four): simplification algorithms for free-form meshes, Department of Computer Science, University of Genova

FUNKHOUSER, Thomas, Polygonal Meshes, Princeton University, 2002.  
<http://www.cs.princeton.edu/courses/archive/fall02/cs526/lectures/meshes.pdf>

GARLAND, M., Multiresolution modeling: Survey and Future Opportunities, Eurographics'99, State-Of-The-ART Report. <http://graphics.cs.uiuc.edu/~garland/papers/STAR99.pdf>

GARLAND, Michael, Quadric-Based Polygonal Surface Simplification, Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. School of Computer Science

GRAMMATIKOPOULOS, L., Automatic Multi-View Texture Mapping Of 3d Surface Projections, Department of Surveying, Technological Educational Institute of Athens, Greece, 2007.

HOPPE, Hugues, Progressive Meshes, ACM SIGGRAPH 1996 Conference Proceedings, 99-108. Microsoft Research, 1996. <http://research.microsoft.com/en-us/um/people/hoppe/>

HECKBERT P. y GARLAND M., Survey of Polygonal Surface Simplification Algorithms, Course Notes SIGGRAPH1997. <http://graphics.cs.uiuc.edu/~garland/papers/simp.pdf>

HINKER, Paul, Geometric Optimization, Advanced Computing Laboratory, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, 1993. <http://www.ccs.lanl.gov/ccs1/projects/Viz/pdfs/93-vis.pdf>

HECKBERT P. y GARLAND M., Survey of Polygonal Surface Simplification Algorithms, Course Notes SIGGRAPH1997. <http://graphics.cs.uiuc.edu/~garland/papers/simp.pdf>

Ioannis Stamos, Dept. of Computer Science, New York, 2002

KAMBEROV, George, Geometric Integrability and Consistency of 3D Point Clouds, Stevens Institute of Technology Hoboken, 2007

KOLLURI, Ravi, Spectral Surface Reconstruction from Noisy Point Clouds, Computer Science Division University of California, Berkeley, California

KRISHNAMURTHY, Venkat, Fitting Smooth Surfaces to Dense Polygon Meshes, Computer Science Department, Stanford University

LOW, Kok-Lim , Model simplification using vertex-clustering, Symposium on Interactive 3D Graphics Proceedings, symposium on Interactive 3D graphics, Providence, Rhode Island, United States, 1997. <http://www.comp.nus.edu.sg/~tants/Paper/simplify.pdf>

LINDSTROM, P., Evaluation of Memory-less Simplification, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 5(2), 1999.

LUEBKE,D. Developer's Survey of Polygonal Simplification Algorithms, IEEE Computer Graphics & Applications (May 2001)  
<http://www.cs.virginia.edu/~luebke/publications/pdf/cg+a.2001.pdf>

PU, Shi, International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation (ITC), Netherlands 2006

SALEMI, G., High Resolution Morphometric Reconstruction Of Multimaterial Tiles Of An Ancient Mosaic, Laboratory of Surveying and Geomatics (LRG) Department of Architecture, Urban planning and Surveying (DAUR) Engineering Faculty, University of Padova, 2008

SCHROEDER, William, Decimation of Triangle Meshes, General Electric Company Schenectady, Nueva York, 2003.

Tahir Rabbani, Section of Optical and Laser Remote Sensing, Netherlands , 2008

TARINI, Marco, PolyCube-Maps, Visual Computing Lab, ISTI / CNR, Pisa

WANG, Yigang, Fast Normal Map Generation for Simplified Meshes, Computer School, Hangzhou Institute of Electronics Engineering, China,2002.

XIANFENG, Wu, A New 3-D Mesh Simplification Algorithm, A New 3-D Mesh Simplification Algorithm, 2003.

#### **MODELADO:**

WANG, Yigang, Fast Normal Map Generation for Simplified Meshes, Computer School, Hangzhou Institute of Electronics Engineering, China,2002.

Venkat Krishnamurthy, Fitting Smooth Surfaces to Dense Polygon Meshes

ÖHRN, Tina, Different Mapping Techniques for Realistic Surfaces, tesis, Department of Mathematics, Natural and Computer Science, 2008

INGRASSIA, Michael, Maya for Games - Modeling and Texturing Techniques with Maya and Mudbox, focal press, 2009

FRÖHLICH, Bernd, Fast Normal Map Generation for Simplified Meshes, Computer School, Hangzhou Institute of Electronics Engineering, China, 2002

TISEVICH, Ilya, Displacement and Normal Map Creation For Pairs of Arbitrary Polygonal Models Using GPU and Subsequent Model Restoration, Department of Computational Mathematics and Cybernetics Moscow State University, Moscow, Russia, 2007.

[http://www.graphicon.ru/2007/proceedings/Papers/Paper\\_43.pdf](http://www.graphicon.ru/2007/proceedings/Papers/Paper_43.pdf)

Michael McCarthy, ZBrush to 3ds Max 8 Displacement Guide, Pixologic, Inc. 2006

SPENCER, Scott, Zbrush character Creation Advanced Digital Sculpting, Wiley Publishing, Inc, Indianapolis, Indiana, pág 247-318, 2008.

PATNODE, Jason, Character Modeling with Maya and Zbrush, profesional Polygonal Modeling Techniques, Focal Press, pág 91, USA, 2008

[http://wiki.cgsociety.org/index.php/Normal\\_maps](http://wiki.cgsociety.org/index.php/Normal_maps)

[www.janesrevolt.com/ray\\_tracing/cs6620-18-o.pdf](http://www.janesrevolt.com/ray_tracing/cs6620-18-o.pdf)

[es.wikipedia.org/wiki/Mipmap](http://es.wikipedia.org/wiki/Mipmap)

[www.bencloward.com/tutorials\\_normal\\_maps3.shtml](http://www.bencloward.com/tutorials_normal_maps3.shtml)

[www.animation.dreamers.com/clases/3d/crear\\_pinscreen.php](http://www.animation.dreamers.com/clases/3d/crear_pinscreen.php)

[www.etereaestudios.com/training\\_img/relief\\_maps/relief\\_maps\\_1.htm](http://www.etereaestudios.com/training_img/relief_maps/relief_maps_1.htm)

### **“REFLECTANCE FIELD”**

DEBEVEC, Paul, Acquiring the Reflectance Field of a Human Face, Conference Proceedings, To appear in the SIGGRAPH, 2000

MA, Wan-Chun, Rapid Acquisition of Specular and Diffuse Normal Maps from Polarized Spherical Gradient Illumination, Eurographics Symposium on Rendering, 2007.

Wan-Chun Ma, Rapid Acquisition of Specular and Diffuse Normal Maps from Polarized Spherical Gradient Illumination, 2007

### **OTROS**

BLANCA CIA, Grietas en las Drassanes, El País, Barcelona, 2007 <http://e-barcelona.org/index.php?name=News&file=article&sid=8235&newlang=cat>

MERCANTE, Mattia, Due bozzetti per fontane da giardino dal Museo Nazionale del Bargello di Firenze. Il caso dell “Ercole lotta con il leone Nemeo”: documentazione informatizzata al servizio del restauratore, Tesi di Diploma di Restauratore dei Beni Culturali, Opificio delle Pietre Dure, 2007.

TSCHUMI, Bernard, Bernard Tshumi Architects & Virtuale, Actar 2004.

TERRADAS Muntañola, Robert, Tesis, Les Drassanes de Barcelona. La geometria, la traça i lestructura com a garants de la identitat de ledifici, Universitat Ramon Llull, España, 2008