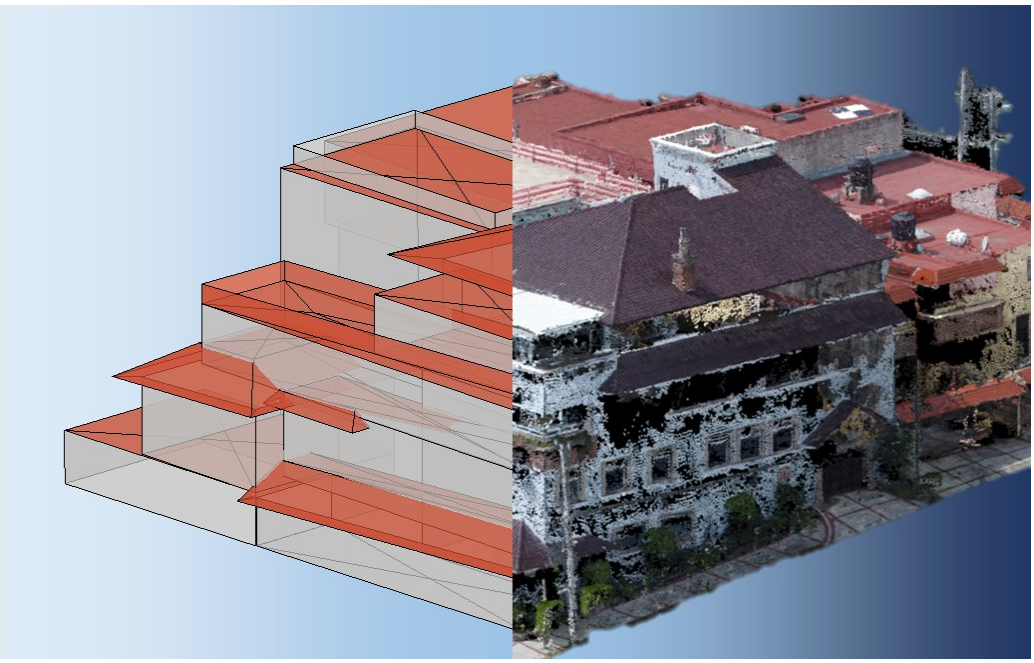
# EVALUACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE PERCEPCIÓN REMOTA PARA LA EXTRACCIÓN DE LA GEOMETRÍA DE UN CATASTRO TRIDIMENSIONAL



06/09/2019

## Informe final

Se presentan los resultados obtenidos del proyecto 268773 del Fondo Sectorial CONACyT-INEGI.

# EVALUACIÓN DE TÉCNICAS AVANZADAS DE PERCEPCIÓN REMOTA PARA LA EXTRACCIÓN DE LA GEOMETRÍA DE UN CATASTRO TRIDIMENSIONAL

**INFORME FINAL**

## PRESENTACIÓN

Se trata de un estudio propuesto para desarrollar y probar metodologías de percepción remota empleadas en la creación y actualización de un catastro tridimensional en suelo urbano. En una primera fase se recopiló información sobre las experiencias de otros países sobre el diseño, implementación y operación de catastros 3D. En esta etapa se exploró un esquema de implementación a partir de un catastro 2D existente, esto con miras a potenciar la utilidad para el caso de México, donde actualmente se cuenta con bases de datos catastrales en 2D. Así mismo, se identificaron las técnicas de extracción de información (uso de suelo, geometría y semántica) que son relevantes para un catastro 3D. Adicionalmente, se planteó la implementación y/o aplicación de algunas técnicas semiautomatizadas para la extracción de información geométrica-semántica a partir de la integración de imágenes multiespectrales de alta resolución espacial, datos de altimetría obtenidos con escáner láser aerotransportado (LiDAR) existentes, así como nubes de puntos fotogramétricas adquiridas mediante una aeronave no tripulada (drone). Por un lado, las imágenes y los datos LiDAR permitirían delinear la forma gruesa de un gran número de edificios, las nubes de puntos fotogramétricas proporcionarían detalles tridimensionales de la estructura de edificios seleccionados para un modelado detallado. Los avances reportados en este informe incluyen el aprendizaje empírico sobre el levantamiento de fotografía aérea y la generación de nubes de puntos con software licenciado y libre. Así mismo, se desarrollaron algoritmos de segmentación de techos a partir de nubes de puntos de baja densidad. El problema de generar la geometría 3-d a partir de nubes de puntos en forma automática mostró ser sumamente complejo, pero que puede simplificarse mediante un enfoque basado en modelos geométricos predefinidos, por lo que se desarrolló una plantilla para la representación de tipos de techos con nivel de detalle LoD2, mismo que es compatible con técnicas de edición manual y procedural. Además de estos avances, otros siguen en curso a través del desarrollo de dos tesis que abordan los problemas de clasificación automatizada de tipos de techos y la generación automática de edificios a partir de nubes de puntos segmentadas.

# Contenido

PRESENTACIÓN ..... 1
PRODUCTOS GENERADOS ..... 2
Artículos arbitrados ..... 2
Participaciones en conferencia ..... 3
Formación de Recursos Humanos ..... 3
Desarrollo tecnológico ..... 3
Difusión y Extensión ..... 3
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA ..... 4
RECONSTRUCCIÓN GRUESA MEDIANTE LIDAR E IMÁGENES SATELITALES ..... 4
Datos vectoriales ..... 4
LiDAR ..... 5
Modelo Digital de Superficie y Terreno ..... 6
Segmentación de edificios ..... 7
Segmentación de techos ..... ¡Error! Marcador no definido.
Estimación de alturas ..... 10
Estimación del número de pisos ..... 11
GEOMETRÍA FINA MEDIANTE VANTS ..... 15
Nubes de Puntos Fotogramétricas ..... 15
Protocolo ..... 17
Procesamiento de nubes de puntos ..... 18
Normalización ..... 18
Clasificación ..... 19
Segmentación ..... 20
MODELADO GEOMÉTRICO DE EDIFICIOS ..... 21
Biblioteca de techos ..... 23
MODELACIÓN PROCEDURAL ..... 24
PAREIDOLIA ..... 27
LO QUE FALTA ..... 28
AGRADECIMIENTOS ..... 28
TRABAJOS CITADOS ..... 28

# PRODUCTOS GENERADOS

## Artículos arbitrados

1. Artículo de revisión de catastros 3D en el mundo. Se trata de una revisión extensa de la experiencia internacional en torno a catastros 3D, pero haciendo énfasis en el uso de tecnologías geoespaciales modernas para alimentar la información catastral. El artículo se encuentra en una

revisión interna por los coautores participantes. La versión actual se proporciona como producto generado (Silvan Cárdenas, Guerrero Íñiguez, Nuñez Hernandez, & Gonzalez Zuccolotto, 2019).

2. Artículo de modelo de datos para la geometría de Edificios. Se trata de un artículo donde se describe la plantilla para la generación de una biblioteca de techos con nivel de detalle LoD2. En ese mismo artículo se describen la edición manual a partir de puntos generadores y la edición procedural a partir de un micro lenguaje desarrollado para tal fin. El artículo ya fue enviado a la revista del INEGI, Realidad Datos y Espacio. Revista Internacional de Estadística y Geografía (Silván Cárdenas & Guerrero íñiguez, 2019).
3. Artículo sobre aplicaciones de la Transformada de Hermite a problemas de correspondencia de imágenes. Es un artículo que revisa las propiedades teóricas de la Transformada de Hermite y define una operación hasta ahora subutilizada como lo es la traslación local. Se demuestra que al combinar dicha operación otras más conocidas, como la rotación y escalamiento local, se pueden resolver problemas como el de puntos de correspondencia entre imágenes que son necesarios para la reconstrucción 3-d a partir de fotografías. El artículo fue publicado en una revista especializada procesamiento de imágenes de la IEEE (Silvan-Cárdenas & Salazar-Garibay, 2019).

## Participaciones en conferencia

4. Poster. En 2018 se presentó un poster en la Conferencia Anual de la Asociación Americana de Geografía sobre la influencia de los tipos de vuelos (circular y doble grid) en la precisión de las nubes de puntos. El estudio permitió determinar que las nubes de puntos generadas mediante fotografía aérea y técnicas de visión por computadora cumplen con nivel de precisión requerido para la geometría del catastro.
5. Artículo de Conferencia. Por su relevancia con el catastro y el modelado 3-d se apoyó la publicación de un artículo sobre el modelado de raíces de arbolado en zonas urbanas a cargo de uno de los participantes del proyecto (Íñiguez, 2017).

## Formación de Recursos Humanos

6. Tesis de Licenciatura sobre el protocolo de levantamiento fotogramétrico de edificios a partir del uso de vehículos aéreos no tripulados, el cual representa un producto comprometido en el marco del proyecto. El alumno presentó y defendió exitosamente la tesis para el grado de Ingeniero del programa de Ingeniería Geomática de la Faculta de Ingeniería de la UNAM (Herández, 2019).
7. Tesis Maestría sobre detección automatizada de techos (en curso) del programa de Maestría en Ciencias de Información Geoespacial del CentroGeo. Se prueban técnicas de aprendizaje computacional para la clasificación automática de formas de techos a partir de imágenes y nubes de puntos (Gonzalez Zuccolotto, 2020).
8. Tesis de Doctorado sobre generación automática de geometrías a partir de nubes de puntos y gramáticas generativas (en curso) del programa de Doctorado en Ciencias de Información Geoespacial del CentroGeo (Guerrero Íñiguez, 2021).

## Desarrollo tecnológico

9. PAREIDOLIA, una herramienta de procesamiento de nube de puntos. Se documentó y publicó en línea una herramienta de procesamiento de nubes de puntos en MATLAB. En ésta se incorporaron las herramientas de segmentación, clasificación y filtrado de nubes de puntos desarrolladas dentro el proyecto: http://pr.centrogeo.org.mx/pareidolia/

## Difusión y Extensión

10. Seminarios INEGI. Se participó en el 5° y 6° seminario "Presentación de las investigaciones financiadas con recursos del Fondo Sectorial CONACYT-INEGI" que organizó el INEGI en febrero de 2018 y agosto de 2019.
11. Taller sobre procesamientos de nubes de puntos. Se impartió un taller para personal del Departamento de Servicios de Información Catastral del INEGI sobre el manejo de nubes de puntos para operaciones catastrales.
12. Se publicó en línea un micro blog para difundir algunos resultados del proyecto: http://pr.centrogeo.org.mx/

# REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Si bien la revisión bibliográfica inició prácticamente desde la conformación de la propuesta, la integración del documento de revisión fue interrumpida y reiniciada en dos ocasiones, esto debido, primero que el investigador que estaba a cargo de esta parte del proyecto cambió de institución en 2017 y no le fue posible continuar con la actividad y, segundo, debido a la pérdida de información por la avería del disco externo donde se estuvo acumulando la información por un tiempo. Al respecto cabe señalar que se realizaron varios intentos de recuperación de la información, e incluso se cotizaron los servicios con empresas serias pero debido al alto costo (no presupuestado en el proyecto) no fue posible la recuperación de la misma. Lo anterior significó retraso, pero la actividad de revisión y escritura del artículo continuó durante toda la vigencia del proyecto y está ya en preparación para envío a la revista (Silvan Cárdenas, Guerrero Íñiguez, Nuñez Hernandez, & Gonzalez Zuccolotto, 2019).

# RECONSTRUCCIÓN GRUESA MEDIANTE LIDAR E IMÁGENES SATELITALES

## Datos vectoriales

Se contaba con datos de catastro actualizados al año 2000 en formato DXF para las 16 delegaciones. Se generaron archivos vectoriales en formato SHP conteniendo 1) los polígonos de la huella de edificios con número de niveles como atributos, y los polígonos de predios con clave de uso de suelo. La referencia original del catastro estaba en proyección Lambert (Datum NAD 27), pero se re-proyectó a UTM WGS84 para poderlas sobreponer sobre las imágenes y los datos de altimetría. Además del cambio de proyección se le aplicó un desplazamiento manual a cada capa para empatar visualmente la huella de los edificios con la capa de alturas generadas con LiDAR (Ilustración 1). Aunque en general se puede observar una correspondencia espacial entre los conjuntos de datos, se observaron desplazamientos localizados que no se pudieron corregir.

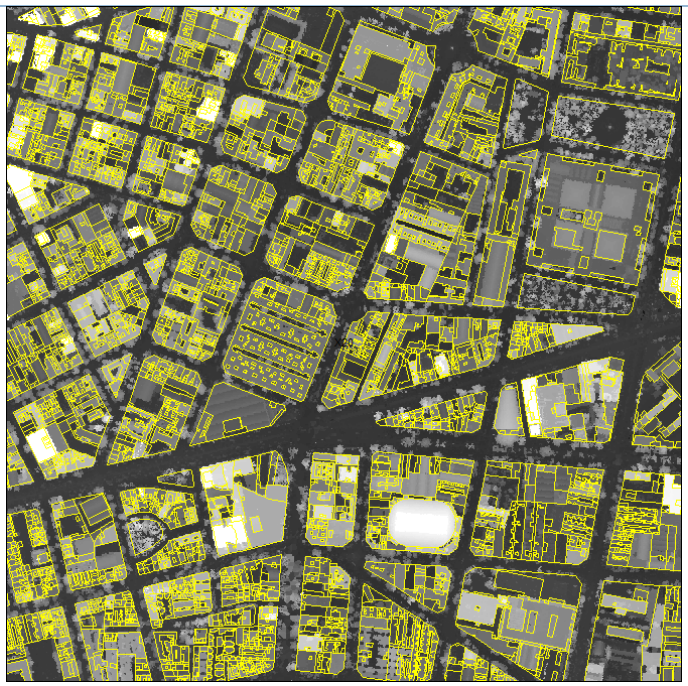


**FIGURA 1. SOBREPOSICIÓN DEL VECTOR DE EDIFICIOS SOBRE EL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES DE LIDAR A 1 M DE RESOLUCIÓN.**

Durante la conversión se generan los polígonos espurios, los cuales se corrigieron como se indica a continuación:

1. Polígonos formados por líneas de anotaciones que indican que el o los polígonos se encontraban en proceso de actualización. Dichas líneas ocasionaban la partición de los polígonos sobre los cuales corría. Se editaron manualmente en ArcGIS usando principalmente herramienta Merge.

2. Polígonos formados cuando un edificio corría sobre más de un predio. Se editaron en algunos casos cuando se trataba de edificios complejos.

3. Duplicidad de polígonos por encontrarse en dos archivos DXF distintos. Se eliminó una copia, conservando la que presentaba mejor registro con respecto a los datos de altimetría.

4. Polígonos huecos. Corresponde a la parte no construida dentro de un predio. Se eliminaron por el atributo DocName que se refiere al archivo DXF de donde se extrae el polígono. Este estaba vació para dichos casos. Posteriormente también se eliminaron aquellos que no presentaban número de pisos de uno o mayor.

5. Polígonos que no representaban edificios. Estos corresponden a fuentes, albercas y glorietas entre otras estructuras urbanas. Fueron eliminados empleado el atributo Texto que se extrajo de la base de datos original y que corresponde al número de niveles, en el caso de edificios, o a una clave en el caso de otras estructuras. Por ejemplo es Texto = “AL” para alberca, etc.

6. Polígonos de áreas insignificantes. Estos fueron fusionados con el polígono vecino con el que compartía el borde más lago. Se fusionaron polígonos con área menor a 4 m2. Este criterio se empleó para asegurar que cayera más de un punto LiDAR dentro de cada polígono para el cálculo de alturas, ya que la densidad de puntos era de aproximadamente ½ por metro cuadrado.

## LiDAR

Se contaba con la nube de puntos LiDAR del área metropolitana del valle de México que fue generada por el INEGI en 2008. Aunque su utilidad para aplicación de catastro es limitada debido a la relativamente baja densidad de puntos (0.433pts/m2), es una fuente precisa para estimación de alturas

(RMSz=7.3 cm). La nube de puntos fue proporcionada por el INEGI en 130 archivos en formato LAS, cada uno de los cuales presentó una línea de vuelo.

Todos los procesamientos descritos a continuación se basaron en ArcGIS y MATLAB (herramienta UIPCPV de desarrollo propio).

Generación del catálogo. Se generó un shapefile de ArcGIS que funciona como catálogo de consulta de las características de cada archivo LAS como su cobertura, número de puntos por retorno y nombre del archivo (Ilustración 2).

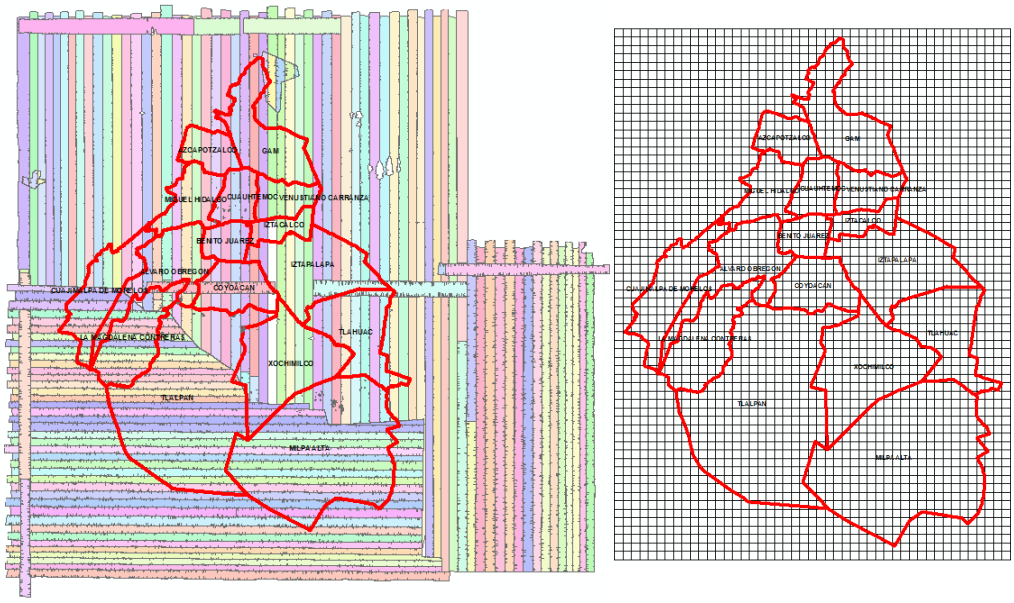



**FIGURA 2. DERECHA: LÍNEAS DE VUELO DE LOS DATOS LIDAR. CADA FRANJA REPRESENTA UN ARCHIVO LAS QUE CONTIENE UNA NUBE DE PUNTOS EN 3-D CON ATRIBUTOS. IZQUIERDA: ÍNDICE DE SUBCONJUNTOS DE LOS DATOS LIDAR.**

Índice de subconjuntos. Dada las limitaciones para el manejo de datos masivos como son las nubes de puntos de LiDAR en MATLAB, se creó una retícula de cuadrados de 1km por 1km cubriendo la CDMX en su totalidad. Se usó la convención de letra-numero para identificar las coordenadas (columna- renglón) de cada cuadrado dentro de la retícula, de tal forma que se pueden especificar rangos con en una hoja de cálculo. El rango completo de la retícula es A1:AU63. Usando una operación de Spatial Join en ArcGIS se asignó a cada cuadrado los nombres de los archivos LAS que cubrían dicho cuadro.

Extracción de puntos. En PAREIDOLIA se importaron los recuadros de algunos de los sitios de prueba seleccionando todos los campos disponibles (Retornos, etc.). Se guardaron en formato nativo de MATLAB para un subsecuente fácil acceso.

## Modelo Digital de Superficie y Terreno

Se generaron modelos digitales de superficie (MDS) para cada área de interés con tamaño de pixel de 1m asignando un valor de pixel correspondiente al valor máximo de elevación de los puntos que cayeron dentro del mismo. En una segunda pasada, se interpolaron los huecos y, finalmente, se exportó el raster en formato ENVI estándar. El MDS se empleó para generar un modelo digital de terreno (MDT), aplicando una segmentación y filtrado de los segmentos de terreno.

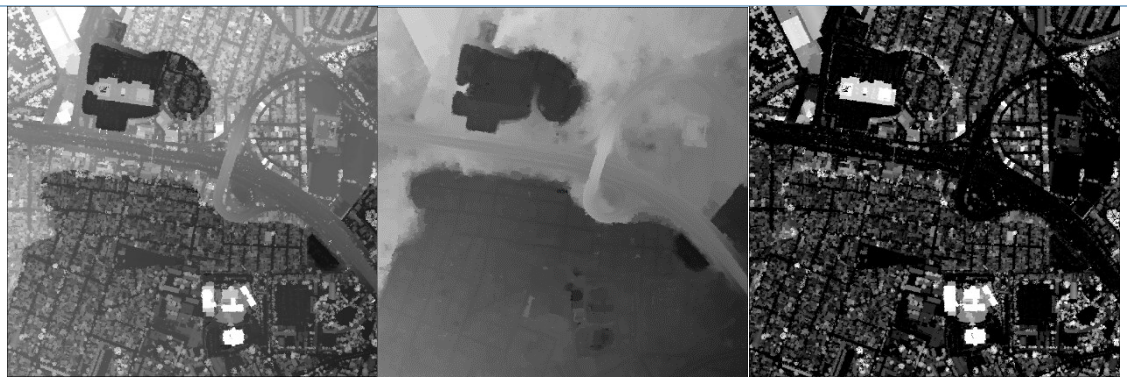


**FIGURA 3. EJEMPLO DE FILTRADO DE TERRENO. SUPERFICIE (IZQUIERDA), TERRENO (CENTRO) Y DIFERENCIA (DERECHA).**

Clasificación de la nube de puntos. La nube de puntos se clasificó a partir de un árbol de decisión empleando 1) el índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) con base en imágenes QuickBird contemporáneas (2007) y 2) el modelo digital de alturas previamente generado. A las combinaciones posibles de NDVI-Alturas (bajo-bajo, bajo-alto, alto-bajo y alto-alto) se asignaron a cuatro clases: Suelo, Vegetación baja, Vegetación alta y Construido.

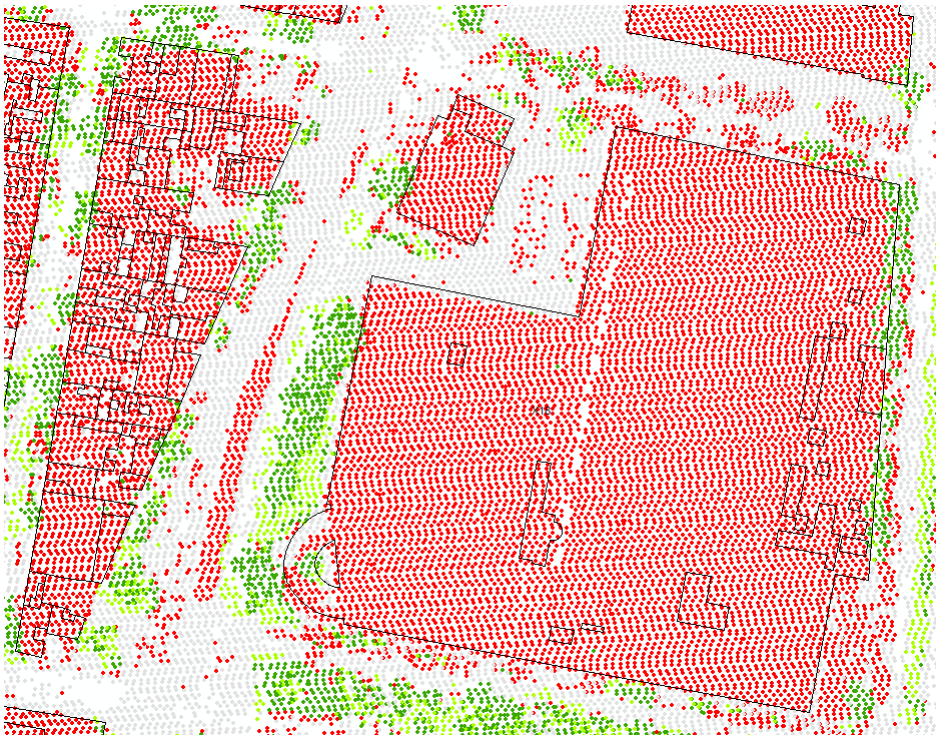


**FIGURA 4. EJEMPLO DE LA NUBE DE PUNTOS CLASIFICADA. ROJO = CONSTRUIDO, VERDE CLARO: VEGETACÍON BAJA, VERDE OBSCURO = VEGETACIÓN ALTA, GRIS = SUELO. SE MUESTRA TAMBIÉN EL VECTOR DE EDIFICIOS DE LA BASE DE DATOS DE CATASTRO.**

## Detección de edificios

### Segmentación por cuencas

La extracción automática de edificios consiste en segmentar el modelo digital de alturas producido a partir de la nube de puntos LiDAR, así como de la clasificación de cobertura generada a partir de las imágenes multiespectrales. Con estos se genera un modelo digital de alturas de edificios, mediante el enmascaramiento de la vegetación y el suelo. Luego se aplica un método de segmentación por cuencas al gradiente de dicho modelo de alturas para extraer segmentos de edificios. Los segmentos con altura menor a 2.0 metros se eliminan, ya que estos por norma no podrían constituir un edifico. Así mismo, los

segmentos aislados de área menor a 16 m2 se eliminan por la misma razón. Solo se preservan segmentos pequeños que representan estructuras en azoteas tales como tinacos, estacionarios, bodegas, etc. Estos últimos se unen con el segmento vecino más grande. La segmentación resultante se convierte a vector usando.

### Evaluación

Se exploró la viabilidad de extraer edificios en forma automática a partir de la segmentación de la nube de puntos. Sin embargo, los modelos generados hasta ahora no son satisfactorios. La Ilustración 5 muestra un ejemplo de resultados obtenidos con esta técnica. Los principales problemas son: 1) la precisión espacial del vector es baja toda vez de la densidad de puntos de la nube no es la adecuada 2) no es posible delinear edificios pequeños, 3) No es posible separar edificios contiguos con la misma altura, 4) la vegetación contigua a los techos representa una fuente de ruido importante 5) las estructuras sobre techos, como tinacos, antenas, bodegas, roofgarden, etc. dificultan la extracción de una región continua.

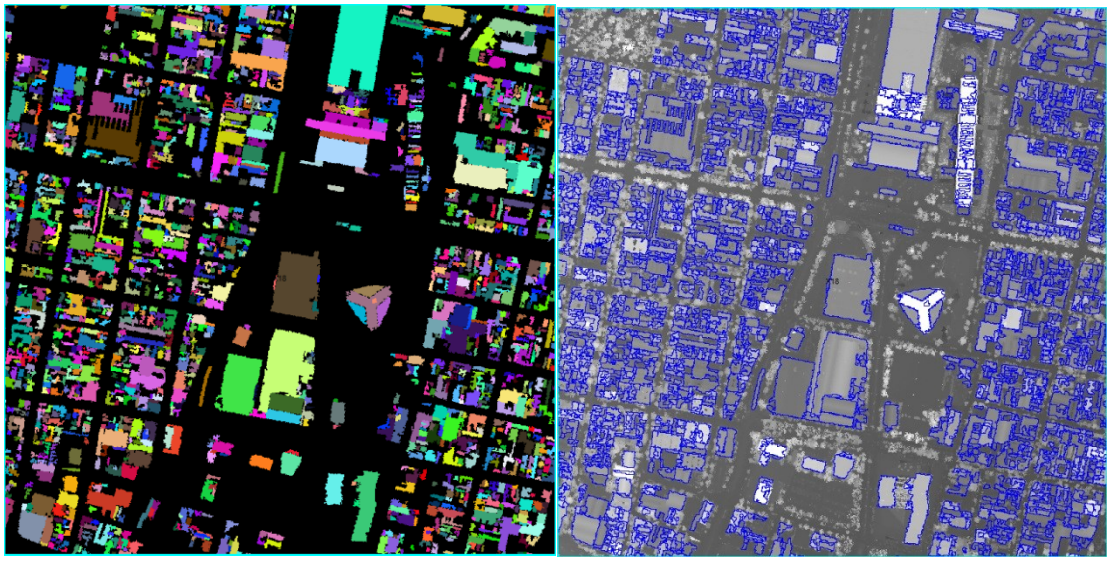


**FIGURA 5. EJEMPLO DE EXTRACCIÓN DE EDIFICIOS A PARTIR DE LA SEGMENTACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ALTURAS. A LA IZQUIERDA SE MUESTRA LA SEGMENTACIÓN Y A LA DERECHA, LOS POLÍGONOS GENERADOS SOBREPUESTOS EN EL MODELO.**

El número y forma de los polígonos producidos generalmente no corresponde con los polígonos del catastro. Esto se debe a muchas causas tales como como la sobre segmentación, oclusión de los edificios por vegetación, ruido en los datos, etc. A la nueva capa de edificios se le anexaron los valores de altura, área, número de niveles como se describe en las siguientes secciones.

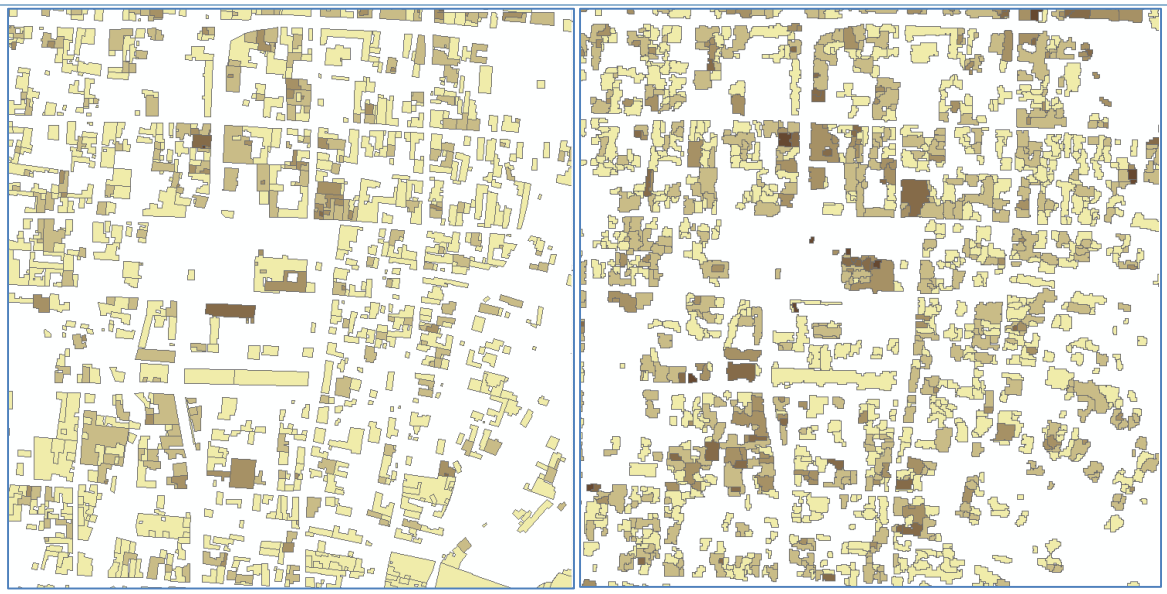


**FIGURA 6. POLÍGONOS DE EDIFICIOS DEL CATASTRO AL 2000 (IZQ.) Y POLÍGONOS EXTRAÍDOS CON DATOS LIDAR DEL 2008 (DER).**

### Componentes conectadas

Adicionalmente a la segmentación basada en el modelo digital de alturas, se está desarrollado un método de segmentación que se basa directamente en la nube de puntos. Esto tiene la ventaja de que no es necesario estimar un raster de alturas, aunque aún es necesario discriminar los puntos de terreno a partir del MDT.

El principio de este enfoque es construir una matriz de adyacencia que establece las conexiones de los puntos vecinos. En un segundo paso, se desconectan los puntos donde no se cumple un criterio de continuidad. Se probaron varios criterios de continuidad, pero el que resultó ser más efectivo fue el que se basa en un índice de la razón de rango de distancias de los vecinos dividido por la distancia media entre los mismos. Los vecinos para los cuales dicha razón fue mayor a la unidad se desconectaron. El paso final consistió en etiquetar las componentes conectadas. Un ejemplo de esto se puede ver en http://pr.centrogeo.org.mx/cdmx.html

En el informe de la Etapa 1 se describió un proceso de segmentación basado en el modelo digital de superficie, esto es en la versión rasterizada de la nube de puntos. En la segunda etapa del proyecto nos avocamos a explorar métodos de segmentación basados en la nube de puntos. En particular se adoptó el método de segmentación por etiquetado de componentes conectadas. Los componentes conectados (CC) tienen la característica de que dado cualquier par de puntos de es posible trazar una trayectoria de conexión empleando los vecinos. Este método se resume en los siguientes pasos:

1. Definición de vecindad. Normalmente se usa triangulación para definir los vecinos de cada punto, aunque se pueden usar umbrales de distancia o los k-vecinos más cercanos.
2. Poda de vecinos. Consiste en borrar conexiones de vecindad a partir de reglas de homogeneidad/continuidad de un mismo objeto. En el ejemplo de la Figura 7 se borra las conexiones hacia y desde puntos de suelo, las conexiones con más de 1 metro de diferencia absoluta en Z y con rango de distancias de la vecindad mayor a la distancia media de la vecindad.
3. Etiquetar componentes conectados. Todos los puntos conectados entre sí pertenecen a un mismo segmento y se les asigna la misma etiqueta (color).
4. Filtrado de segmentos. Se eliminan segmentos pequeños, bajos y con índice de vegetación alto.

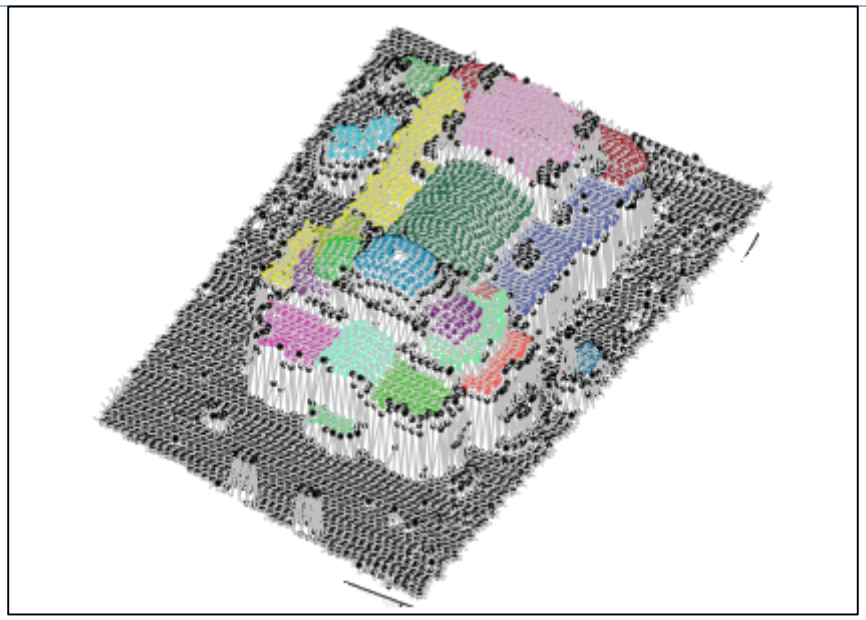


**FIGURA 7. EJEMPLO DE SEGMENTACIÓN POR COMPONENTES CONECTADOS. EL EDIFICIO CORRESPONDE A LA CATEDRAL DE LA CDMX Y LA NUBE DE PUNTOS ADQUIRIDA CON LIDAR EN 2008.**

Este método de segmentación aún no se ha publicado, pero ya está disponible en la herramienta PAREIDOLIA. En el caso de nubes de puntos muy densas, este método no es operativo presenta limitaciones en cuanto a requerimientos de almacenamiento ya que el número de relaciones de vecindad incrementa significativamente.

## Estimación de variables catastrales

### Estimación de alturas

Se emplearon los puntos de la clase Construido para estimar la altura de los edificios. Para cada polígono disponible en la base del catastro 2000 se calculó la altura LiDAR como el promedio de alturas de los puntos del primer cuartil. La tabla de valores calculados se exportó a un archivo ASCII separado por comas, que luego se adjuntó a la base de datos de los polígonos de edificios en ArcGIS. Las estimaciones obtenidas mediante este método fueron empleadas para construir un modelo para el número de niveles, como se explica más adelante. Una primera aproximación a la geometría 3-D de los edificios consiste en la extrusión de los polígonos como la que se muestra en la Ilustración 7.

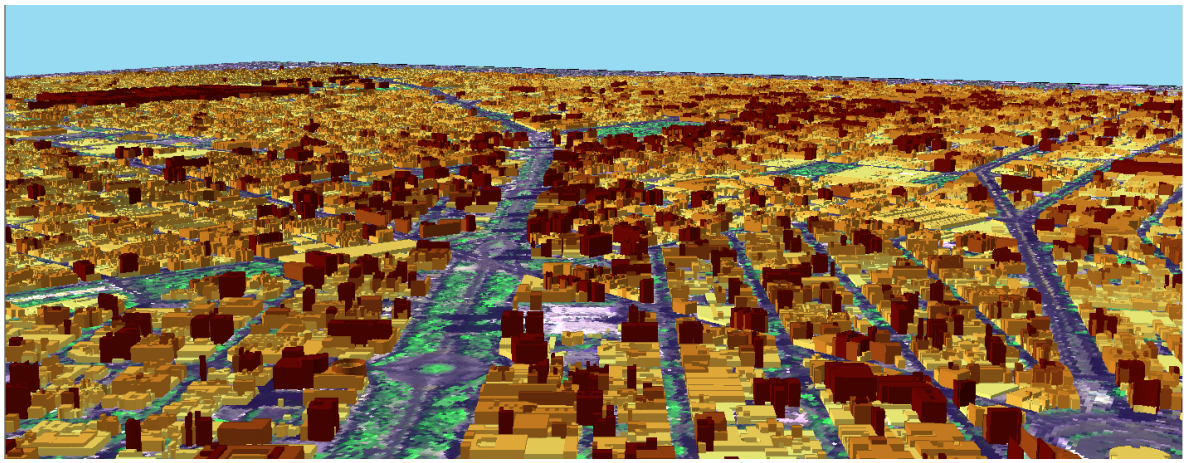


Ilustración 7. Visualización de los datos de catastro 2-D con edificios extruidos usando la altura LiDAR.

### Estimación del número de pisos

Se desarrolló un modelo para estimar el número de niveles a partir de la altura LiDAR. Dado que los datos de niveles no están actualizados a la fecha de toma de los datos LiDAR, es de esperar una gran discrepancia. No obstante, se estimó que la gran mayoría de los edificios se mantuvieron sin cambios entre las fechas del catastro (2000) y la fecha de adquisición de LiDAR (2008). Esto se puede corroborar en los diagramas de dispersión entre alturas y número de pisos (Ilustración 8).

Para determinar el modelo se intentó un ajuste por mínimos cuadrados con y sin transformación logarítmica. Sin embargo, el modelo resultaba fuerte mente sesgado por los edificios de recién creación, por lo que se optó por ajustar visualmente un modelo piezo lineal al diagrama de dispersión.

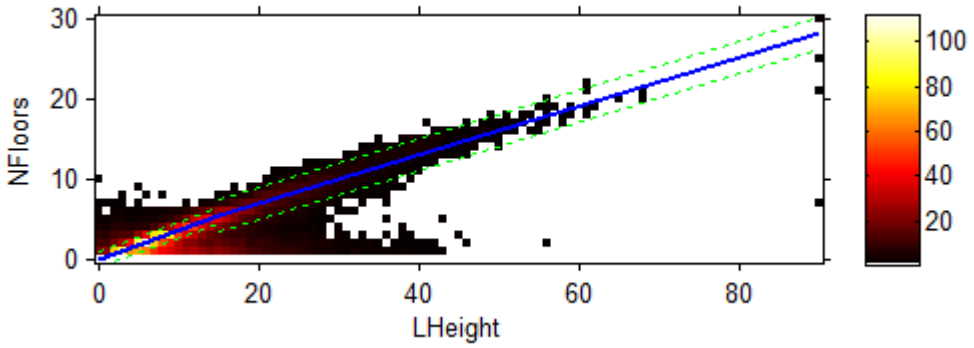



Ilustración 8. Diagrama de dispersión altura LiDAR (LHeight) y número de niveles (NFloors) para tres delegaciones (Cuahutémoc, Milpa Alta y Tlalpan). La línea azul representa el modelo piezolineal ajustado. Las líneas verdes indican una tolerancia empírica.

E l modelo ajustado se puede expresar matemáticamente como:

$$n = \begin{cases} \left[\frac{2h}{5}\right], si\ h < 15 \\ \left[\frac{h+3}{3}\right], si\ 15 \leq h < 45 \\ o \\ \left[\frac{h+19}{4}\right], si\ h \geq 45 \end{cases}$$

donde n es el número de niveles del edificio, h es la altura del edificio, y los corchetes indican redondeo al entero más cercano.

### Clasificación de uso de suelo

Con el fin de evaluar la viabilidad para determinar el uso de suelo a partir de las características de los edificios, se diseñó un experimento de clasificación a nivel de predios en el cual se probaron tres métodos de clasificación de complejidad variable:

1. ISODATA - es un método no supervisado que agrupa naturalmente los datos.
2. Clasificador de Máxima Verosimilitud (MLC por sus siglas en inglés) – es un método de clasificación supervisado que modela la distribución de probabilidades de las clases como funciones Gausianas y selecciona la clase con mayor probabilidad a posteriori.
3. Máquinas de soporte vectorial (SVM por sus siglas en inglés) – método de reconocimiento de patrones supervisado que discrimina entre pares de clases usando un kernel lineal (SVML) o no lineal (SVMK).

Dado que Cuauhtémoc representa la mayor complejidad en cuanto al ensamblaje de uso de suelo, se selección ésta como área de prueba. Además, con el fin de reducir la incertidumbre que suele introducir un método de extracción de edificios mediante PR, se optó por emplear los polígonos de edificio del catastro del 2000 y así atribuir cualquier error de clasificación únicamente al clasificador en cuestión.

MUESTRA DE ENTRENAMIENTO

Los datos utilizados como muestra ya clasificada para entrenar los algoritmos de clasificación supervisados (MLC, SVML Y SVMLK) fueron 160 predios etiquetados en 4 clases de uso de suelo, distribuidos de la siguiente manera:

**TABLA 1. ESQUEMA DE CLASIFICACIÓN Y TAMAÑO DE LA MUESTRA DE ENTRENAMIENTO EMPLEADA CON LOS MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN SUPERVISADA.**

| Clase | Descripción | # Predios |
|---|---|---|
| H0 | Habitacional sin edificios | 21 |
| H1 | Habitacional con edificios de 1 y 2 pisos | 43 |
| H2 | Habitacional con edificios de 3 o más pisos | 49 |
| NH | No Habitacional | 47 |
| | TOTAL | 160 |

El número de entrenamiento es relativamente pequeño considerando que el total de predios de la delegación es de 44,250. La clasificación se llevó a cabo sobre seis variables como predictores:

1. Máximo número de pisos (NFloor).
2. Área construida (BArea).
3. Espacio habitacional (HSpace).
4. Número de edificios en el predio (NBuild).
5. Porcentaje de área construida (PBuild).
6. Área del predio (Area).

Isodata. Llevada a cabo con la función Isodata en Matlab, con el vector de parámetros: [4 4 20 0.6 5 0.15 0.06 5 22000], de tal forma que entregara una agrupación en 4 clases. Antes de correr el algoritmo los datos fueron normalizados considerando el valor máximo de cada predictor como 1, ajustando los demás valores al rango de 0 a 1.

MLC. Los datos de entrada fueron la matriz de predios a clasificar, la matriz de entrenamiento y el vector de clasificación de los datos de entrenamiento, sin más, para obtener el vector de clasificación de todos los predios. MLC se implementó en MATLAB.

SVM. Ya que el clasificador SVML es para 2 clases únicamente, y en este caso se trabajó con 4, fue necesario entrenar una SVM por cada par de clases que se pudieran formar, en este caso 6. De esta forma se aplicaron las 6 SVM a cada observación (a cada predio), teniendo entonces, por cada observación, seis clases asignadas o "votos", asignándole como clase definitiva aquella que tuviera más votos. Hubo observaciones que presentaron un número igual de votos en dos clases o más. Se probaron dos estrategias para solventar esto, primero, en el caso de que se tuvieran dos clases con igual número de votos, se tomaba como "voto de calidad" el obtenido por la SVM que involucrara a las clases empatadas en votos; y la segunda, construir un segundo grupo de 6 SVM, pero con un número de iteraciones mayor al llevar a cabo el entrenamiento, y de esta forma tener 12 votos de clase por cada observación, al

considerar los dos grupos conjuntamente. El primer grupo de 6 SVM fue construido con 10 iteraciones (el valor que está por default en la función) y el segundo con 50 iteraciones.

La primera estrategia resolvió todos los casos en los cuales se presentaron dos clases con igual número de votos, siempre y cuando se hayan tomado sólo 6 SVM (el grupo de 10 ó el grupo de 50 iteraciones). El hecho de tomar conjuntamente las 12 SVM complicó la clasificación puesto que, aunque ciertamente se presentaron menos casos con empate en tres clases, se presentaron más casos con empate en dos clases, y la gran mayoría de ellos no se pudo resolver con el "voto de calidad", puesto que al haber dos SVM que involucraban a las clases empatadas, una de ellas clasificaba la observación en una clase y la otra en la otra clase. De 739 casos sólo se resolvieron 38. Los resultados se muestran en la tabla siguiente; los números entre paréntesis son los casos de dos clases empatadas que se pudieron resolver, y no se consideran en las suma para el total, por estar ya considerados en alguna clase.

## EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN

Para seleccionar la muestra de prueba se generó una malla formada por cuadros de 9 hectáreas (300 X 300 m) que cubriera toda la delegación. Para cada cuadro se generó un índice de diversidad de usos de suelo, de tal forma que entre mayor fue el índice, más equilibrado respecto a la presencia de diferentes usos de suelo era ese cuadro. Se seleccionaron 20 cuadros con el mayor índice. De manera aleatoria se seleccionaron 50 predios para cada una de las clases H1, H2 y NR. Considerando que en toda la Delegación Cuauhtémoc únicamente existen 30 predios de clase H0, estos mismos, a pesar de estar incluidos algunos de ellos en la muestra de entrenamiento, fueron incluidos también en la muestra de prueba. De tal forma que la muestra de prueba tiene 180 predios.

Con la muestra de prueba y las clasificaciones hechas con cada clasificador fueron generadas matrices de confusión y calculados índices kappa. Por cada clasificador se consideran los casos de utilizar la muestra de prueba incluyendo los predios con clase H0 (Habitacional de cero pisos) y sin ellos.

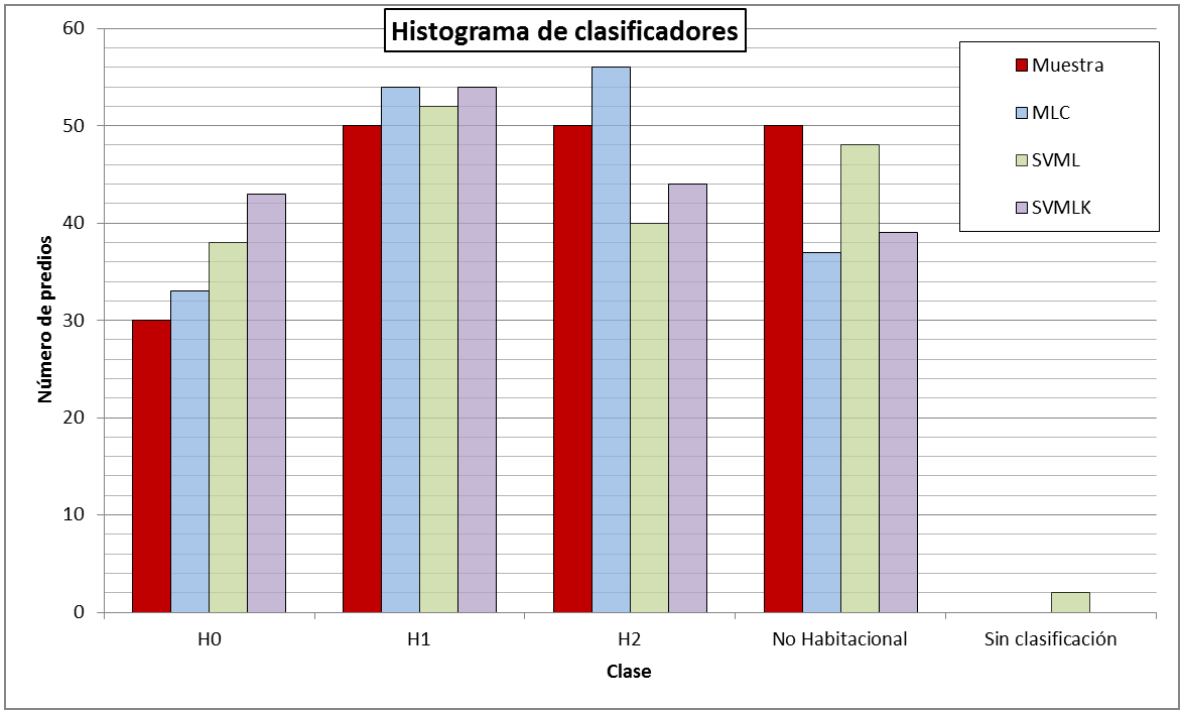



**FIGURA 8. PRECISIÓN GENERAL DE CLASIFICACIÓN DE CADA CLASE MEDIANTE CADA UNO DE LOS MÉTODOS PROBADOS.**

Tabla 11. Matriz de confusión de la clasificación resultante con MLC.

| Uso Suelo MLC | **Habitacional H0** | **Habitacional H1** | **Habitacional H2** | **No Habitacional** | **TOTAL** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Habitacional H0** | **30** | 0 | 0 | 3 | **33** |
| **Habitacional H1** | 0 | **44** | 1 | 9 | **54** |
| **Habitacional H2** | 0 | 2 | **37** | 17 | **56** |
| **No Habitacional** | 0 | 4 | 12 | **21** | **37** |
| **TOTAL** | **30** | **50** | **50** | **50** | **180** |

Tabla 12. Matriz de confusión de la clasificación resultante con SVML.

| Uso Suelo SVML | **Habitacional H0** | **Habitacional H1** | **Habitacional H2** | **No Habitacional** | **Sin clasificación** | **TOTAL** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Habitacional H0** | **30** | 2 | 0 | 6 | 0 | **38** |
| **Habitacional H1** | 0 | **39** | 2 | 11 | 0 | **52** |
| **Habitacional H2** | 0 | 0 | **26** | 14 | 0 | **40** |
| **No Habitacional** | 0 | 7 | 22 | **19** | 0 | **48** |
| **Sin clasificación** | 0 | 2 | 0 | 0 | **0** | **2** |
| TOTAL | **30** | **50** | **50** | **50** | **0** | **180** |

Al evaluar el método de ISODATA se observó un desempeño muy pobre, con un índice kappa negativo, por lo que se optó por descartarlo de cualquier análisis subsecuente. Los resultados de la evaluación de la precisión revelan (Tabla 11 a la Tabla 13) que MLC es el mejor método para estimar el uso de suelo a nivel de predio. Aun así, el mejor valor del índice kappa (Tabla 14 no es satisfactorio (64%)) ya que se está asumiendo una extracción perfecta de edificios, es muy difícil, como se ha demostrado en otros estudios (Silván-Cárdenas & Wang, Extraction of Buildings Footprint from LiDAR Altimetry Data with the Hermite Transform, 2011).

**TABLA 2. MATRIZ DE CONFUSIÓN DE LA CLASIFICACIÓN RESULTANTE CON SVMLK.**

| Uso Suelo SVMLK | **Habitacional H0** | **Habitacional H1** | **Habitacional H2** | **No Habitacional** | **TOTAL** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Habitacional H0** | **30** | 2 | 0 | 11 | **43** |
| **Habitacional H1** | 0 | **37** | 8 | 9 | **54** |
| **Habitacional H2** | 0 | 6 | **25** | 13 | **44** |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **No Habitacional** | 0 | 5 | 17 | **17** | **39** |
| **TOTAL** | **30** | **50** | **50** | **50** | **180** |

**TABLA 3. ÍNDICES KAPPA, CALCULADOS CON LA MUESTRA DE PRUEBA.**

| Clasificador | Kappa | Precisión general | RMSE por clase | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | *Habitacional H0* | *Habitacional H1* | *Habitacional H2* | *No habitacional* | *Sin Clasificación* |
| **MLC** | 0.6409 | 73.3333 | 0.1291 | 0.2981 | 0.4216 | 0.5000 | 0.0000 |
| **SVML** | 0.5103 | 63.3333 | 0.2108 | 0.3651 | 0.4595 | 0.5774 | 0.1054 |
| **SVMLK** | 0.4732 | 60.5556 | 0.2687 | 0.4082 | 0.4944 | 0.5528 | 0.0000 |

# GEOMETRÍA FINA MEDIANTE VANTS

El sistema para la adquisición de datos incluye el vehículo aéreo no tripulado Inspire V1 de DJI, así como una laptop y dos licencias flotantes de PiX4D para el procesamiento de las fotografías aéreas. El proveedor del equipo proporcionó en las instalaciones del CentroGeo una capacitación de 3 días para la operación del VANT y procesamiento de los datos al grupo de colaboradores del proyecto conformado por 3 doctores dos técnicos auxiliares y un estudiante de la Maestría en Geomática y un estudiante de licenciatura (becario del proyecto). Se realizaron prácticas de vuelo. El proveedor otorgó constancias a cada participante.

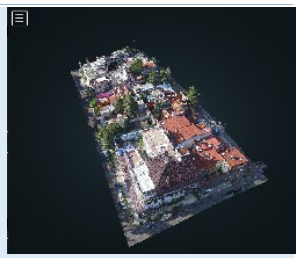
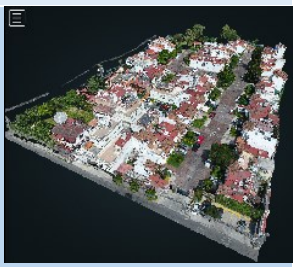
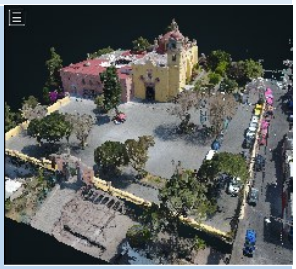
Con el fin de poder realizar el registro del VANT y contar con autorizaciones para vuelos en zonas altamente urbanizadas, se contrató un seguro anual y se hicieron las gestiones para el registro del mismo. No obstante, el registro se ha visto retrasado debido a las afectaciones de los sismos en las oficinas de la DGAC a cargo de estos trámites.

## Nubes de Puntos Fotogramétricas

Desde octubre de 2017 se realizaron alrededor de 12 levantamientos de fotografía aérea en distintos sitios ubicados principalmente en la periferia de la ciudad de México. Si bien la selección de los sitios quedó restringida a áreas donde se contó con el consentimiento local, éstos representaron una amplia gama de características estructurales y tipos de techos. Los levantamientos consisten en la toma de fotografía aérea oblicua y, en algunos casos, de puntos de control para el geo-registro. La descripción de algunos de estos, para los cuales también se cuenta con una visualización en línea, se presenta Tabla 2. Puede acceder a la visualización interactiva de la nube de puntos desde el micro blog del proyecto en http://pr.centrogeo.org.mx/.

**TABLA 4. CONJUNTOS DE DATOS GENERADOS EN EL PROYECTO 268773 CONACYT-INEGI.**

| Fecha | Ubicación | Características | Nube de puntos |
|---|---|---|---|
| **29/09/2017** | San Bartolo,<br>Milpa Alta,<br>CDMX | Zona periurbana con predios de una sola casa, amplia área de jardín con árboles; bardas y caminos. | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **20/10/2017** | Lomas de Padierna,<br><br>Tlalpan,<br><br>CDMX | Manzana donde se localiza el CentroGeo. Edificios complejos, vegetación arbórea, líneas de transmisión, postes. Paredes laterales no reconstruidas completamente. |  |
| **22/10/2017** | Tepepan, Xochimilco,<br><br>CDMX | Fraccionamiento con edificios de viviendas unifamiliares, carros, vegetación, líneas de transmisión, árboles con poda. |  |
| **18/11/2017** | Misiones de la Noria,<br><br>Xochimilco,<br><br>CDMX | Fraccionamiento con edificios de vivienda unifamiliares con techos rojos, carros, vegetación, área verde; múltiples manzanas. | |
| **25/11/2017** | Xochitepec, Xochimilco,<br><br>CDMX | Zona de asentamientos en faldas del cerro de Xochitepec. Edificios en desniveles. Terreno con pendientes pronunciadas, vegetación densa y campo abierto, vehículos. | |
| **18/02/2018** | Los Prados, Yautepec,<br><br>MOR | Fraccionamiento con casas de descanso, estacionamiento, albercas, jardines. | |
| **25/02/2018** | Tepepan, Xochimilco, CDMX | Área de la Parroquia de Santa María de la Visitación Tepepan. Edificio con cúpulas y torreón, vegetación, terreno con pendientes pronunciadas y desniveles. |  |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **21/04/2018** | Jardines en la Montaña, Tlalpan, CDMX | Edificio de la Universidad Pedagógica Nacional. Edificio de formas geométricas complejas, escaleras, desniveles, puentes. Jardines con vegetación arbórea profusa. | |
| **19/02/2018** | Parque Científico y Tecnológico de Yucatán | Edificio de la Biblioteca del PCTY y subsede del CentroGeo en Mérida. Edificio con paredes inclinadas y curvas y segmentos cilíndricos. | |
| **23/05/2019** | Ciudad de Aguascalientes | Complejo del INEGI. Edificio con estructuras simétricas y repetitivas; nivel de sótano. | |

## Protocolo

Las fotos aéreas se procesaron en el Software Pix4D donde además se incluyen los puntos de control. Dependiendo del número de fotografías del proyecto, el software puede tardar varias horas para generar productos de salida como son la nube de puntos, lo que constituye el principal insumo para la generación de la geometría de edificios.

No siempre es posible recabar los puntos de control debido a que se requiere medir durante 30 minutos cada punto marcado previamente antes del vuelo, lo que limita el número de puntos que se pueden levantar, pero, además, no siempre es posible dejar instalado el equipo por mucho tiempo. Para marcar los puntos se usan lonas de 2x2 metros con cuadrícula de 1m. También se probó la tecnología RTK para reducir el número de puntos que se requieren levantar. Un informe completo sobre el protocolo de adquisición de fotografía y generación de de nubes de puntos y otros productos se describe ampliamente en la Tesis de Roberto (Herández, 2019). El Protocolo propuesto consiste en un desglose de todos las actividades y procesos necesarios para la obtención de los productos relevantes para el catastro. El flujo de actividades que con consideradas en el protocolo se muestran en la Figura 9 (Herández, 2019).

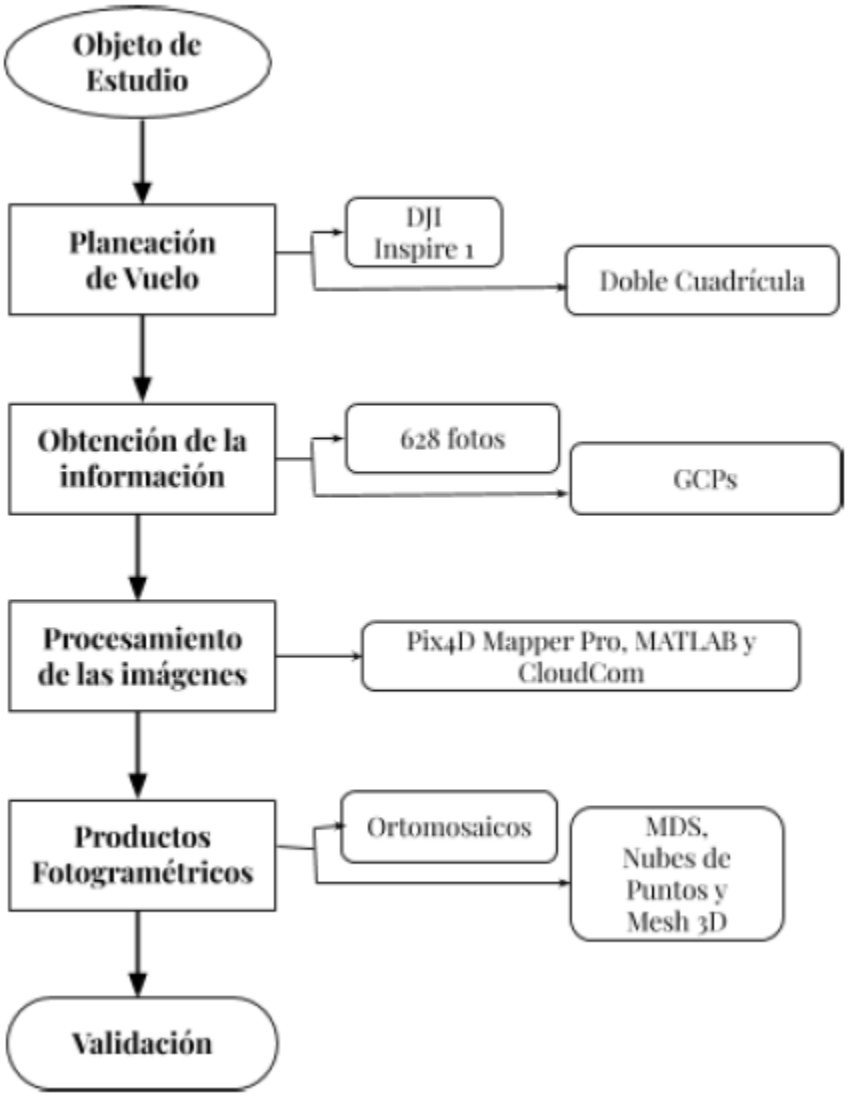



**FIGURA 9. FLUJO DE TRABAJO PARA LA GENERACIÓN DE PRODUCTOS DE APLICACIÓN CATASTRAL A PARTIR DE UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO (HERÁNDEZ, 2019).**

Dependiendo de los productos fotogramétricos que se requieran serán los parámetros de la planeación de vuelo. En particular, en este proyecto se puso énfasis en la generación de la nube de puntos ya que se consideró como el principal insumo para el modelado tridimensional.

## Procesamiento de nubes de puntos

### Normalización

Otro producto necesario para el modelado de edificios en 3-d es la superficie de terreno desnudo la cual se emplea para normalizar la nube de puntos a un terreno plano (Figura 10), lo que a su vez facilita la clasificación de puntos de terreno (H = 0) y no terreno (H > 0).

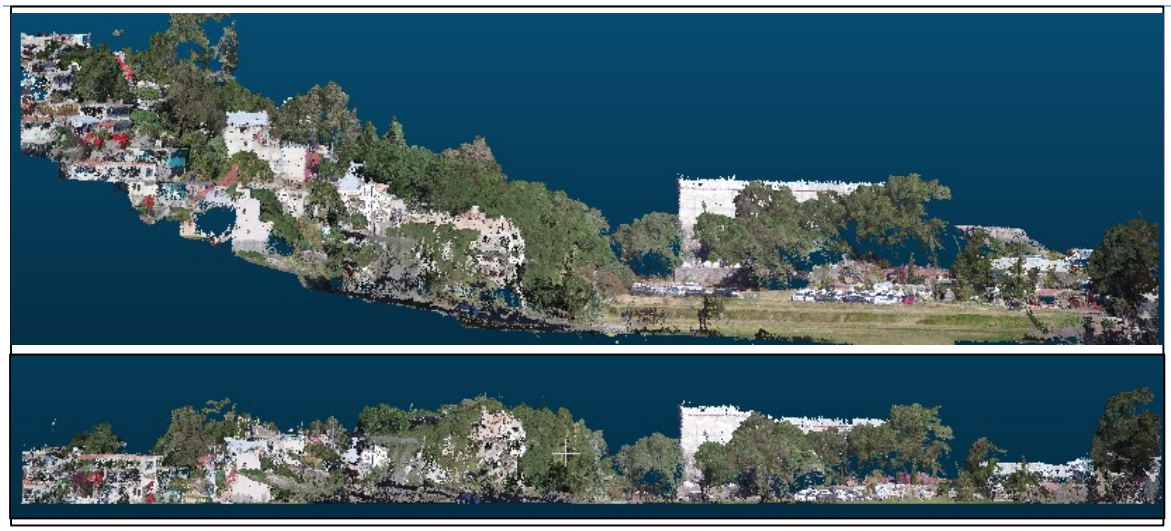


**FIGURA 10. NUBE DE PUNTOS ANTES (ARRIBA) Y DESPUÉS (ABAJO) DE LA NORMALIZACIÓN A UN TERRENO PLANO.**

En la práctica el valor de altura de cada punto se anexar como campo adicional a la nube de puntos original, por lo que la normalización como tal no es necesaria, sino sólo el valor de altura de los puntos normalizados. El algoritmo para la generación de la superficie de terreno es el mismo que en el caso de los datos LiDAR.

### Clasificación

En un siguiente nivel de procesamiento es necesario filtrar los puntos de vegetación, ya que éstos dificultan el modelado de los edificios. Para esto se desarrolló un índice de vegetación basado en una descomposición canónica de las clases de vegetación y otros en el espacio de color RGB. La descomposición canónica es similar a un análisis de componentes principal, pero en lugar de ordenar las componentes de mayor a menor varianza, se ordenan de menor a mayor razón de varianza intra-clase a varianza inter-clase, de tal forma que los componentes canónicos corresponden a las dimensiones de mayor separabilidad lineal. En nuestro caso las clases son la vegetación y no vegetación (suelo, asfalto y techos). Las muestras recolectadas en varias nubes de puntos arrojaron consistentemente una componente principal que se aproxima a C1 = 4G-R-B. A partir de esta componente se propuso un índice de vegetación RGB de la forma:

$$VI = \frac{4G - R - B}{4G + R + B}$$

Similar al índice de vegetación de la diferencia normalizada, NDVI, los valores de VI > 0.3 coinciden con los puntos de vegetación verde por lo que se puede emplear esta regla para filtrar gran parte de los puntos de vegetación en la nube de puntos. Más aún, en combinación con la altura de cada punto se puede generar una clasificación más detallada como se indica en el árbol de decisión de la Figura 11. Un ejemplo de la aplicación de este esquema de clasificación se muestra en la Figura 12.

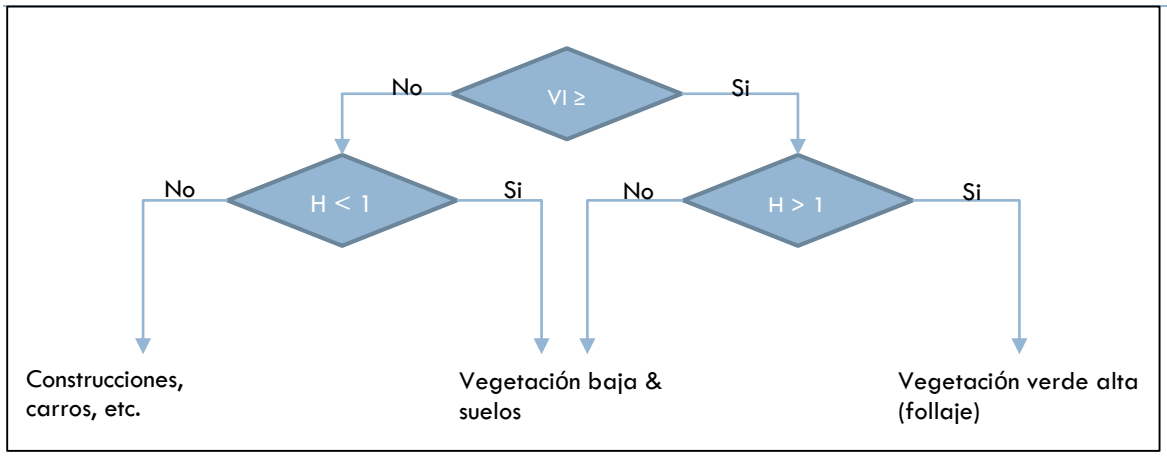



**FIGURA 11. ÁRBOL DE DECISIÓN PARA DISCRIMINAR LA VEGETACIÓN BAJA Y ALTA DE LAS CONSTRUCCIONES.**

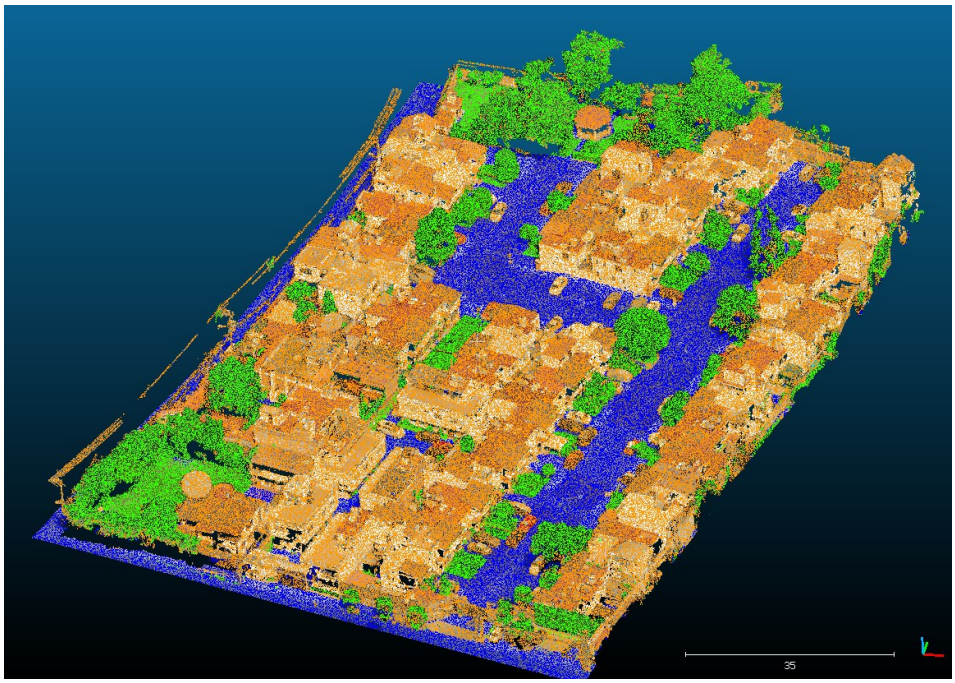


**FIGURA 12. EJEMPLO DE NUBE DE PUNTOS CLASIFICADA EMPLEANDO UN ÍNDICE DE VEGETACIÓN Y LA ALTURA.**

Otros esquemas de clasificación supervisada y no supervisada se implementaron en la herramienta PAREIDOLIA. Para efectos del modelado 3-d, el esquema anterior puede ser suficiente ya que permite aislar los edificios de forma rápida.

### Segmentación

Otro método que se ha explorado, pero que aún no se incorpora a PAREIDOLIA es el de proyecciones. La idea de este método es proyectar la nube de puntos a lo largo de ejes principales y construir histogramas de frecuencia para cada dirección de proyección. Cuando la orientación de proyección es paralela a la orientación de una pared, los puntos de la pared aparecen como picos de alta densidad en el histograma, por lo que pueden ser fácilmente detectados y etiquetados. La principal ventaja de este método es su eficiencia con nubes de puntos masivas ya que opera en una dimensión. Su desventaja es que sólo detecta paredes planas y que el espacio de búsqueda de orientaciones tiende a crecer en techos inclinados y complejos. La Figura 13 muestra un ejemplo de segmentación de las paredes de las casas.

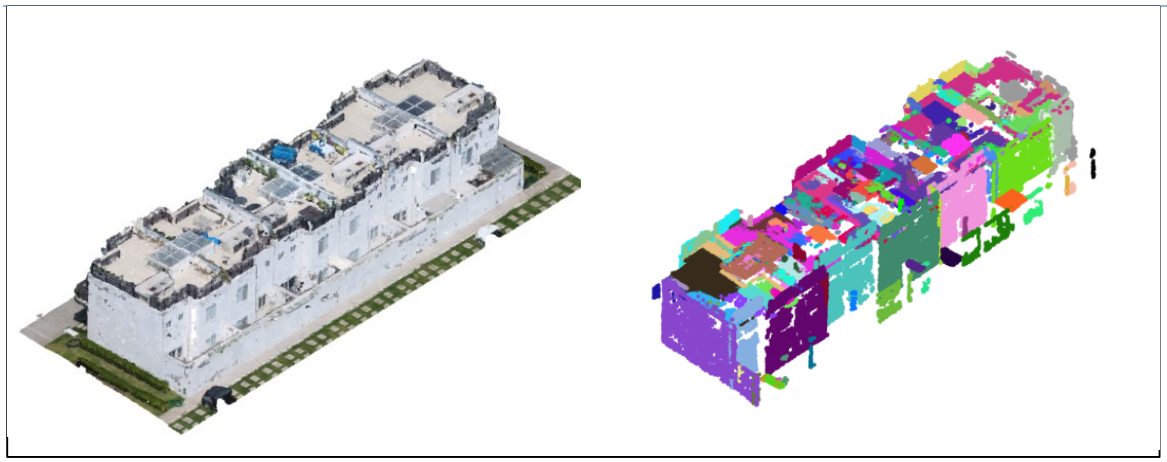


FIGURA 13. EJEMPLO DE SEGMENTACIÓN A PARTIR DE PROYECCIONES 1-D.

## MODELADO GEOMÉTRICO DE EDIFICIOS

Se desarrolló una plantilla para el modelado de formas básicas de construcciones que son compatibles con el nivel de detalle 2 (LoD2) del estándar CityGML. La plantilla se basa en la especificación de un modelo poliédrico genérico capaz de representar segmentos de edificios tanto estándares como formas libres. Entre sus características se enumeran las siguientes: 1) especifica por separado las tres partes constitutivas de los segmentos: base, paredes y techo; 2) permite bases rectangulares, redondas, y poligonales, 2) permite definir paredes inclinadas y no planas, 3) permite definir techos curvos, 4) es compatible con edición manual y automatizada de edificios. Adicionalmente, aunque no cuenta con un nivel especificación semántica para la composición de edificios complejos, es posible crearlos a partir de una red, lo que en principio habilitaría la automatización de la reconstrucción 3-d a partir de nubes de puntos. A lo largo del documento se incluyen ejemplos que ilustran el uso de la plantilla en la generación de la geometría de edificios reales e imaginarios. Aquí se presenta un resumen. Los detalles de la plantilla se describen en (Silván Cárdenas & Guerrero íñiguez, 2019).

La Tabla 5 describe los atributos de la plantilla, la cual describe las primitivas de edificios en términos de tres componentes: base, paredes y techo. La superficie de cada primitiva se forma a partir de anillos isomorfos con la base, donde el número de anillos puede ser variable, pero el número de vértices por anillo es igual que el anillo de la base, de tal forma que cada anillo se puede parametrizar en términos de hasta 7 parámetros relacionados con desplazamientos en 3-d (3 parámetros), escalamientos en el plano horizontal (2 parámetros) e inclinación respecto al plano horizontal (2 parámetros).

TABLA 5. RESUMEN DE LA ESPECIFICACIÓN DE LA PLANTILLA DE SEGMENTOS DE EDIFICIOS.

| **Partes** | **Atributos** | **Descripción** | **Valor por Default** |
|---|---|---|---|
| **Base** | BaseShape | Forma de la base: 'rect' – rectangular, 'round' – redondo, o 'polyg' – poligonal | 'rect' |
| | Points | Matriz de orden **NumPoints**×2 con vértices de la base del edificio | Obligatorio si **BaseShape** es 'polyg' |
| | Length | Longitud del edificio (a lo largo de la dirección principal) | Obligatorio |

| Partes | Atributos | Descripción | Valor por Default |
|---|---|---|---|
| | Width | Ancho del edificio (a lo largo de la dirección secundaria) | Obligatorio |
| | NumPoints | Número de vértices de la base elíptica | 32, sólo se requiere si **BaseShape** es 'round' |
| | XLoc | Coordenada X de la ubicación del segmento | 0 |
| | YLoc | Coordenada Y de la ubicación del segmento | 0 |
| | ZLoc | Coordenada Z de la ubicación del segmento | 0 |
| **Paredes** | Height | Altura de las paredes (a lo largo de la coordenada Z) | Obligatorio |
| | WallsShift | Indica el desplazamiento de la(s) línea(s) superior(es) de las paredes con respecto a la línea del piso. Se especifica en porcentajes de **Length**, **Width** y **Height** para las tres dimensiones. | [0 0 100] |
| **Techo** | RoofShape | Forma de techo: 'flat', 'shed', 'gabled', 'hipped', 'tented', 'flattop', 'half-hip', 'gablet', 'gambrel', 'mansard', 'saltbox', 'skillion','bonnet','monitor', 'barrel', 'dome', 'bow','saddle','onion' o 'userdefined' | 'flat' |
| | RoofExtent | Indica si la extensión del techo se basa en las paredes o el base. Los valores válidos son 'floor' y 'walls'. Sólo tiene efecto si se especifica **WallsShift**. | 'floor' |
| | RoofHeight | Altura total del techo. Algunos techos requieren dos alturas, en cuyo caso el parámetro debe ser un vector de longitud 2 | Depende de **RoofShape** |
| | RoofShift | Desplazamientos de los anillos de techo respecto a la base del techo. En general es una Matriz de M×3 para techos simétricos horizontales, M×4 para simétricos inclinados, M×5 para techos no simétricos horizontales, M×6 para no simétricos e inclinados, o M×7 para tipo mariposa. | Obligatorio si **RoofShape** es 'userdefined' |
| **Todas** | Parts | Indica las partes que se incluyen en el poliedro. Se especifica como una | 'floor+walls+roof' |

| Partes | Atributos | Descripción | Valor por Default |
|---|---|---|---|
| | | combinación de 'floor','walls' y 'roof' concatenadas con un '+' | |
| | Colors | Vector de 3×1 (color indexado) o matrix de 3×3 (color RGB) indicando el color de la base, las paredes y el techo, respectivamente | [0 0 0<br>0.5 0.5 0.5<br>1 0 0 ] |

Para cada anillo de techo, los parámetros de desplazamientos horizontales $(\alpha, \beta, \alpha', \beta')$ definen implícitamente los escalamientos y traslaciones horizontales que se aplican al anillo de la base del techo a lo largo de las orientaciones principal y secundaria dadas por **RotAngle** y **RotAngle** + 90. Más específicamente, si $(x_b, y_b, H)$ son las coordenadas del anillo de la base del techo y asumiendo una inclinación a lo largo del eje x, entonces las coordenadas de un anillo de techo $(x_r, y_r, z_r)$ asociadas a los parámetros $(\alpha, \beta, \alpha', \beta', \gamma, \gamma')$ están dados por:

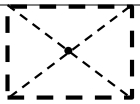
$$x_r = (1 - \alpha - \alpha')x_b + (\alpha - \alpha')L$$
$$y_r = (1 - \beta - \beta')y_b + (\beta - \beta')W$$
$$z_r = (1 + \gamma)H + \left(\frac{x_b/L + 0.5 - \alpha}{1 - \alpha - \alpha'}\right)(\gamma' - \gamma)H$$

En el artículo mencionado, este modelo se generaliza para representar anillos inclinados a lo largo de un ángulo $\delta$ con respecto al eje x y para considerar techos con dos generatrices, como el paraboloide hiperbólico o silla de montar.

## Biblioteca de techos

A partir de la especificación de las primitivas es posible definir un conjunto de primitivos estándares de techos, al que llamamos la biblioteca de techos. Dicha biblioteca incluye los tipos de techos más comunes. La Tabla 6 muestra los valores de los parámetros para algunos de los techos estándares en porcentaje, mientras que la Figura 14 se muestra el conjunto ampliado de techos estándares de la biblioteca desarrollada con el modelo propuesto.

**TABLA 6.VALORES DE DESPLAZAMIENTO RELATIVO PARA ALGUNOS DE LOS TECHOS DE LA BIBLIOTECA. * EN ESTOS EJEMPLOS LA ALTURA DEL TECHO ES 50% LA ALTURA DEL SEGMENTO (HEIGHT).**

| RoofShape | RoofShift | Plano | Notas |
|---|---|---|---|
| **Flat** | [50,50,0] |  | Un anillo colapsado a un vértice de cierre |
| **Shed** | [0,100,50,0,0] | | Un anillo colapsado a un segmento en la parte posterior |
| **Gabled** | [0,50,50] | | Un anillo colapsado a un segmento centrado |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Hipped** | [20,50,50] | | Un anillo colapsado a un segmento de longitud reducida un 40% centrado |
| **Tented** | [50,50,50] | | Un anillo colapsado un vértice elevado |
| **Gambrel o Dutch** | [0,15,35 0,50,50] | | Dos anillos elevados sucesivamente, uno reducido en una dirección y otro colapsado a un segmento |
| **Mansard o French** | [10,10,35 30,30,50 50,50,50] | | Dos anillos concéntricos elevados sucesivamente y un tercero colapsado a un vértice de cierre |

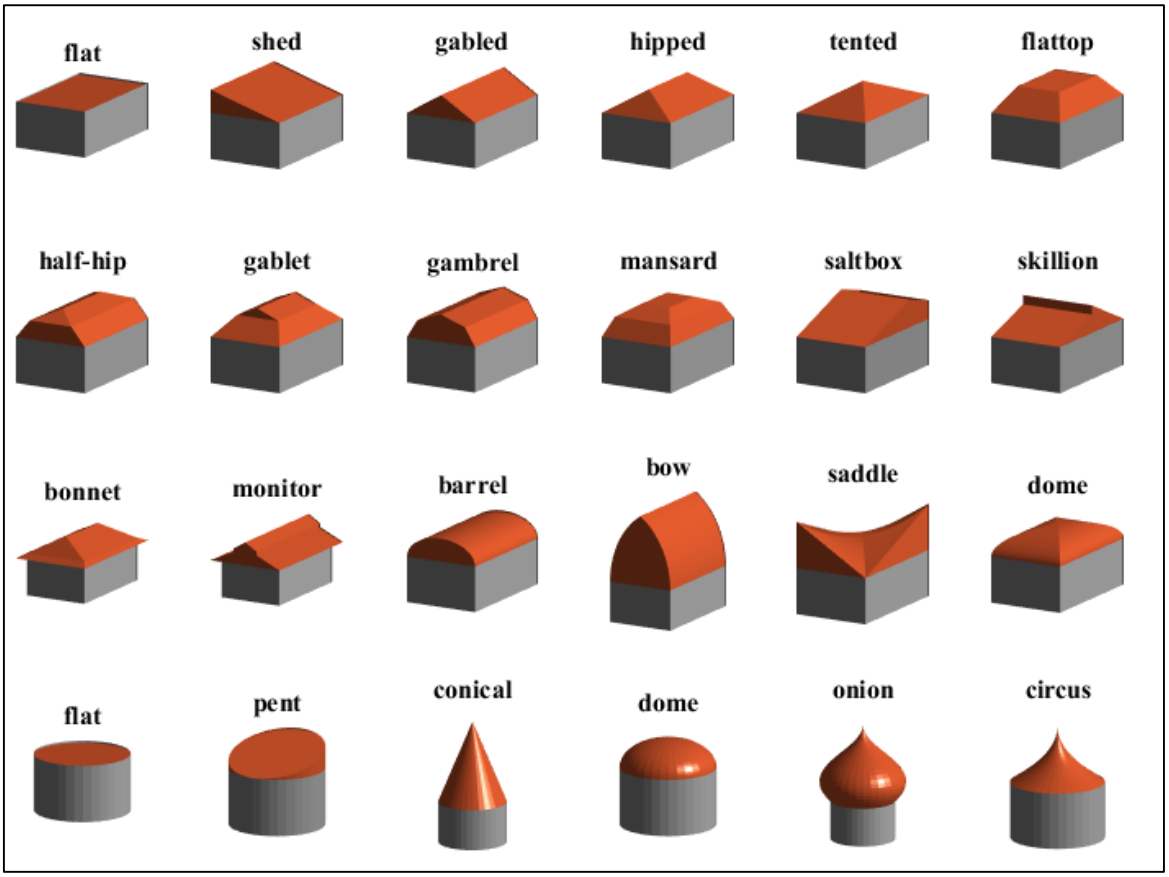



**FIGURA 14. EJEMPLOS DE TECHOS ESTÁNDARES DE BASE RECTANGULAR Y REDONDA (ÚLTIMO RENGLÓN). LOS PARÁMETROS DE ALGUNOS DE ESTOS ESTÁN DADOS EN LA TABLA 3.**

## MODELACIÓN PROCEDURAL

Se refiere al empleo de comandos para generar/modificar geometrías. Con el fin de mostrar la viabilidad de una modelación procedural a partir de la plantilla, se escribió la función BUILDEDIT para

MATLAB, la cual recibe la capa de edificio como un arreglo de registros (tipo struct) y una lista de instrucciones de la forma:

<editcmd> [<target>] [<transfcmd> <transfcmd2> …]

Donde <editcmd> especifica un comando de edición. Actualmente los comandos de edición implementados se muestran en la Tabla 5.

**TABLA 7. COMANDOS PRINCIPALES DEL MICRO LENGUAJE DE EDICIÓN.**

| Comando de Edición | Descripción |
|---|---|
| `create` | Crea un segmento a partir de los puntos generadores. No requiere <target>, la capa son los puntos generadores. |
| `delete` | Borra los segmentos <target>. No requiere comandos de transformación <transfcmd> |
| `copy` | Copia los segmentos <target> y define estos últimos como la entrada a la secuencia de transformaciones en la línea de comando |
| `select` | Selecciona segmentos <target> y los define como la entrada a la secuencia de transformaciones en la línea de comando |

La lista completa de comandos de selección y edición se describen en un artículo en revisión (Silván Cárdenas & Guerrero íñiguez, 2019).

El siguiente ejemplo ilustra el uso del micro lenguaje. Considere una capa en la cual se tiene un segmento de base rectangular que representa piso y paredes únicamente (Parts = 'floor+walls'). Éste puede generarse a partir de puntos generadores como se describió en la sección previa. A partir de esto, se crea un primer nivel con 3 segmentos rectangulares como sigue:

copy first resize 0.5 along y move right align front of first*

copy last move back

La primera línea hace una copia el segmento 1, lo re-escala en Y, lo mueve a la derecha de sí mismo, y lo alinea respecto al frente del primero de toda la capa (que en este punto solo tiene dos segmentos, el 1 y 2). La segunda línea copia el último (el segmento 2) y lo mueve atrás de sí mismo. El resultado de estas líneas se muestra en la Figura 13-izquierda.

Supongamos ahora que se tienen un segundo nivel con la misma distribución de cuartos, pero dos de los cuartos tienen paredes más elevadas (Figura 13-centro). Esto se logra con la siguiente secuencia de comandos:

copy all move top

select 5:6 resize 1.5 along z

Finalmente, se definen techos inclinados para los segmentos de la segunda planta como sigue:

select 4 update RoofShape lean-to-left

select 5 update RoofShape lean-to-front

select 6 update RoofShape lean-to-back

select 4:6 update Parts floor+walls+roof

donde las tres primeras líneas definen la forma de los techos de cada uno de los segmentos por separado, mientras que la última línea define las partes que representan los segmentos 4-6. El resultado se muestra en la Figura 13-derecha.

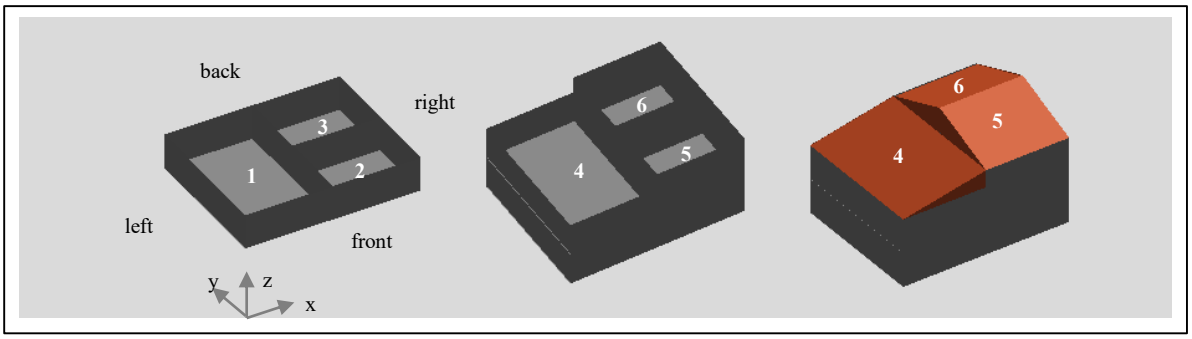



**FIGURA 15. EJEMPLO DE CONSTRUCCIÓN PROGRAMÁTICA DE UN EDIFICIO CON PAREDES INTERIORES.**

Este método de modelado fue empleado en el caso del fraccionamiento Marbella y del complejo del INEGI en Aguascalientes (Figura 16). Estos y otros modelos están disponibles para descarga del micro blog del proyecto en formato SHP y OBJ.

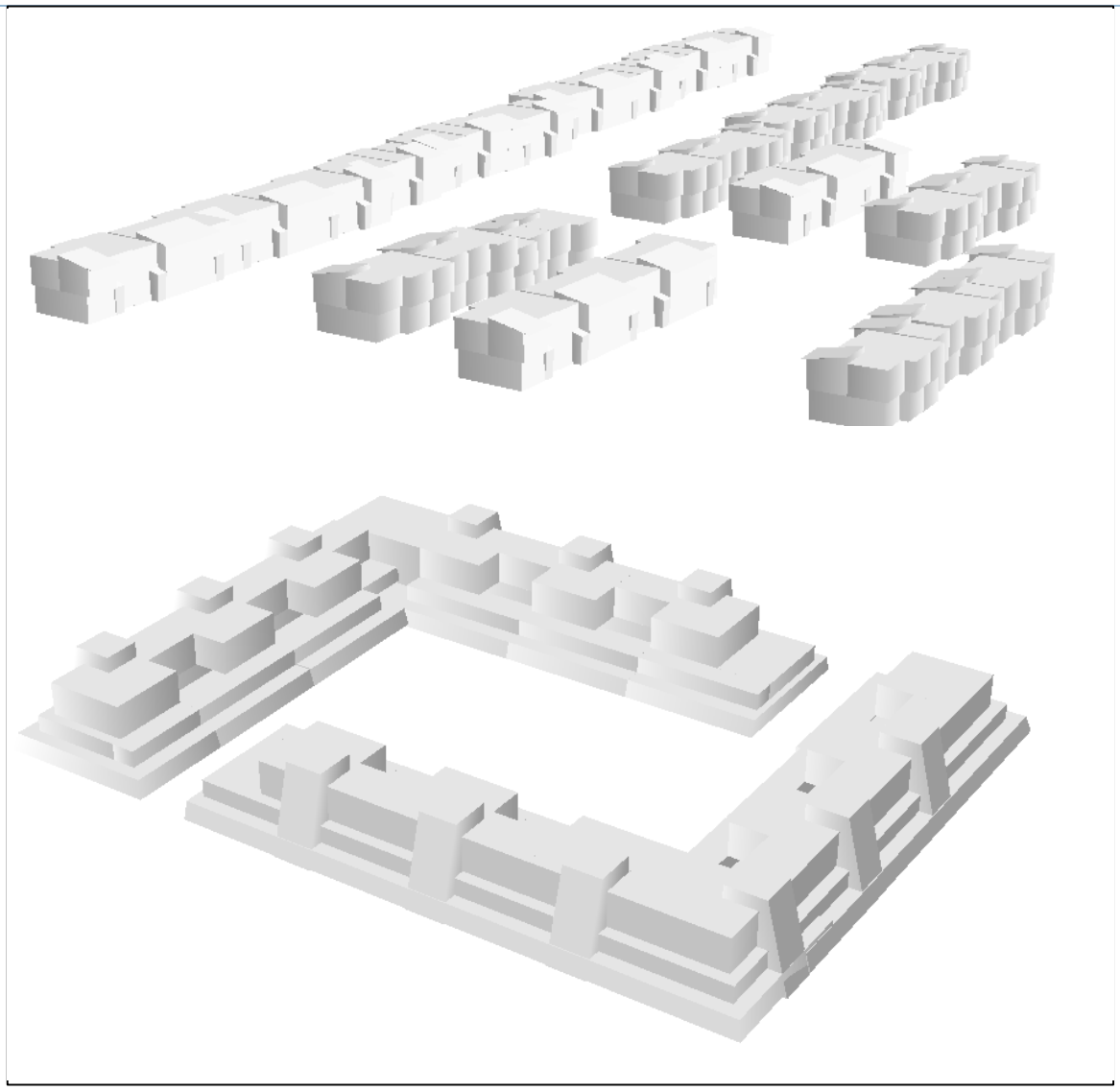


**FIGURA 16. EJEMPLOS DE MODELOS GEOMETRICOS DE EDIFICIOS GENERADOS PROCEDURALMENTE: FRACCIONAMIENTO MARBELLA (ARRIBA) Y COMPLEJO DEL INEGI EN AGUASCALIENTES (ABAJO).**

## PAREIDOLIA

La generación de modelos 3-D a partir de la nube de puntos requiere del desarrollo de herramientas de cómputo que faciliten el procesamiento y segmentación de las nubes de puntos, como las referidas en las secciones previas. En este proyecto se desarrollaron algoritmos de procesamiento y análisis de nubes de puntos en la plataforma MATLAB. Para un mejor uso de los desarrollos se creó una interfaz gráfica llamada PAREIDOLIA (Ilustración 9) que permite la carga, visualización, procesamiento y distribución de productos derivados de las nubes de punto. Uno de los primeros productos que ya se generan a partir de esta interfaz es la visualización en web de las nubes de punto como las que se describen en la sección anterior. La descripción amplia para su adquisición, instalación y uso se presenta en el manual disponible en línea (http://pr.centrogeo.org.mx/pareidolia/).

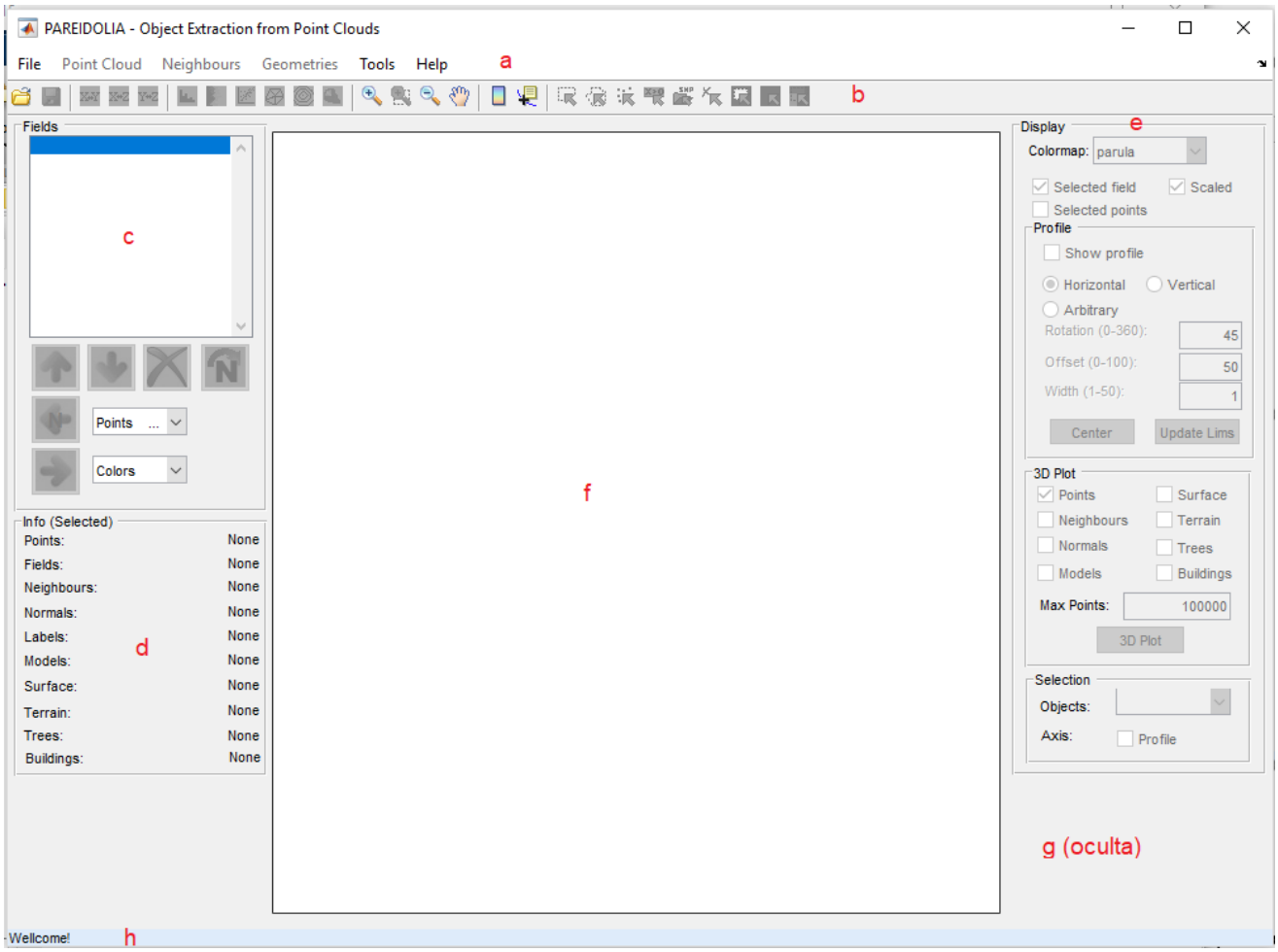



**FIGURA 17. INTERFAZ DE USUARIO PRINCIPAL DE LA HERRAMIENTA PARA EL PROCESAMIENTO Y VISUALIZACIÓN DE NUBES DE PUNTOS.**

Aunque la herramienta ya cuenta con un manual de usuario en línea, se continuará con su actualización a medida que se incorporen más herramientas en los menús.

## LO QUE FALTA

El proyecto no sólo permitió avanzar en la evaluación de técnicas avanzadas de percepción remota para la generación la geometría de un catastro 3-d, pero también permitió identificar necesidades que van más allá del campo de la percepción remota y que tienen que ver con la definición de procedimientos de registro de parcelas y edificaciones acordes a la norma mexicana, así como la implementación de un sistema catastral con funcionalidades de manejo y visualización de datos en 3-d a través de la web. En el terreno de la percepción remota y el procesamiento digital de imágenes quedan pendiente las tesis y artículos que se deriven, pero sobre queda pendiente mejorar los métodos para la generación automática de información que permita alimentar un catastro 3-d.

## AGRADECIMIENTOS

El responsable técnico agradece el apoyo financiero al Fondo Sectorial CONACyT-INEGI, y a los estudiantes y colegas del CentroGeo que participaron en las distintas actividades que hicieron posible la realización de este proyecto.

## TRABAJOS CITADOS

Gonzalez Zuccolotto, K. (2020). *Clasificación de techos mediante aprendizaje de máquinas*. Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, A.C., Posgrado. CdMx: CentroGeo.

Guerrero Íñiguez, J. (2021). *Spatial Grammars for processing urban point cloud products*. Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, A.C., Posgrado. CdMx: CentroGeo.

Herández, R. (2019). *PROTOCOLO PARA EL LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO DE EDIFICIOS A PARTIR DEL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS*. UNAM, Fac. de Ing. . CdMx: UNAM.

Íñiguez, J. (2017). GEOMETRIC MODELLING OF TREE ROOTS WITH DIFFERENT LEVELS OF DETAIL. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing \& Spatial Information Sciences, 4*.

Silván Cárdenas, J., & Guerrero íñiguez, J. (2019). Plantilla para el Modelado Geométrico de Edificios a partir de Nubes de Puntos. *Realidad Datos y Espacio. Revista Internacional de Estadística y Geografía*, en revisión.

Silvan Cárdenas, J., Guerrero Íñiguez, J., Nuñez Hernandez, J., & Gonzalez Zuccolotto, K. (2019). Diseño, implementación y operación de los catastros 3D en la experiencia internacional. *En preparación*, na.

Silvan-Cárdenas, J., & Salazar-Garibay, A. (2019). Local geometric deformations in the DHT domain. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1980--1992.