

## ***Aplicación del LiDAR en el Diseño Preliminar de Líneas de Transmisión Eléctrica***

Luis A. Maldonado Pérez  
Maestría en Ciencia y Tecnología Geoespacial  
Prof. Víctor Romero González  
Departamento de Ciencias Geomáticas  
Universidad Politécnica de Puerto Rico

---

**Resumen** – Se condujo un estudio para verificar si los modelos de superficie digitales generados a partir de la tecnología del *Light Detection and Ranging (LiDAR)* satisfacen los parámetros de tolerancia vertical en el diseño preliminar de líneas de transmisión eléctrica. Los datos de elevación obtenidos mediante el LiDAR y los obtenidos por *Total Station* se compararon para conocer sus diferencias. La información se recopiló en un tramo de un estudio realizado para el diseño de una línea de transmisión eléctrica. Para la comparación de los datos se estableció un análisis estadístico con la finalidad de hallar la precisión de éstos bajo diferentes escenarios de obstrucción por vegetación. Del estudio se desprende que la calidad de los datos topográficos del LiDAR muestra menor precisión vertical que los obtenidos por equipos convencionales. No obstante, la precisión de los modelos de superficie digitales es aceptable para el diseño preliminar de líneas de transmisión eléctrica.

**Términos claves** – *Espectro Electromagnético, Georreferenciación, Modelos de Superficie, Teledetección.*

### **INTRODUCCIÓN**

La ciencia geoespacial se compone de tres ciencias y tecnologías principales: el GIS (Geographical Information System), el GPS (Global Positioning System) y la teledetección o *remote sensing*. Estas tres disciplinas se utilizan para llevar a cabo la cartografía, inventarios y los análisis necesarios para proyectos de Sistemas de Información Geográfica [1]. Es en la teledetección que se concentra esta investigación.

Durante los últimos 25 años, la recopilación de los datos de campo topográficos para realizar perfiles longitudinales, secciones transversales y topografías para el diseño de líneas de transmisión eléctrica se ha realizado mediante el empleo de equipos de agrimensura convencionales, en los que el uso de *total stations* es uno de los más comunes. En años recientes y con los adelantos en la tecnología geoespacial, específicamente en los GPS, es posible obtener datos de forma más eficiente. El empleo del GPS en su modalidad de tiempo real cinemático o RTK, por sus siglas en inglés, y el de los *total stations* han probado ser herramientas muy precisas en la obtención de datos.

La adquisición de datos de campo topográficos con *total stations* y equipos GPS RTK para el diseño de líneas de transmisión eléctrica requiere un tiempo considerable, especialmente si son de una gran extensión lineal. Esto se debe a que el personal técnico de campo tiene que obtener los datos a lo largo de la ruta, que en ocasiones se extiende por varios kilómetros. En estos casos, es común que la trayectoria por donde se localizará la línea de transmisión se ubique en áreas de difícil acceso al tránsito peatonal y vehicular, lo que a su vez trae como consecuencia una exposición del personal técnico de campo a situaciones de riesgo de accidentes.

Las condiciones del terreno en la mayoría de los proyectos de agrimensura y diseño civil de una línea de transmisión eléctrica en Puerto Rico tiene las siguientes características: terreno accidentado, vegetación densa e inaccesibilidad, las cuales tienen el efecto de demorar la obtención de los datos, además de un impacto en el medio ambiente debido a la tala de árboles. Al reflexionar sobre estas características y su efecto, surge la pregunta de si es

posible recurrir a una solución viable de este problema mediante el uso de nuevas tecnologías.

El empleo de nuevas tecnologías en ocasiones trae como consecuencia cierta resistencia de los usuarios y clientes, pues es necesario romper con el paradigma de que los métodos modernos no son precisos o no encajan con la forma en que tradicionalmente se han realizado los trabajos. Sin embargo, es necesario dar paso a nuevas tecnologías buscando un balance donde sea posible agilizar los procesos sin sacrificar la calidad del producto final. Debido a las razones de limitación en el tiempo y la seguridad del personal técnico de campo, es necesario realizar el trabajo eficazmente conservando la precisión mínima requerida para el diseño preliminar de líneas de transmisión eléctrica.

### Objetivos

Entre los objetivos primordiales para realizar esta investigación está el evidenciar el uso del LiDAR (Light Detection and Ranging) como una tecnología confiable para el desarrollo de modelos de superficie digital. Esta investigación también tiene el propósito de verificar la confiabilidad de los datos LiDAR en un proyecto de la Autoridad de Energía Eléctrica (AEE) y si éstos satisfacen los parámetros de tolerancia vertical en el diseño preliminar de líneas de transmisión eléctrica.

### TELEDETECCIÓN O *REMOTE SENSING*

Uno de los componentes de las ciencias geospaciales es la teledetección o *remote sensing*, la cual es la práctica de derivar información acerca de las superficies tanto terrestre como de cuerpos de agua desde una perspectiva aérea, utilizando la radiación electromagnética en una o más regiones dentro del espectro electromagnético, reflejada o emitida por la superficie de la Tierra [2]. Entre las aplicaciones comerciales de esta tecnología se destacan el manejo de vegetación en líneas eléctricas, determinación de vanos de líneas eléctricas, movimiento y elevación de capas de hielo, estudios de simulaciones para sistemas de altimetría láser de satélites y la generación de

modelos de terreno digital o DTM, por sus siglas en inglés [3].

Para comprender el funcionamiento de la teledetección es necesario conocer que el espectro electromagnético es definido en términos largo de onda (1). El largo de onda del campo de luz se encuentra desde 1 mm de la banda del infrarrojo lejano hasta cerca de 10 nm para la banda del ultravioleta extremo. El LiDAR utilizado en la teledetección se ubica en la banda del infrarrojo cercano y realiza sus mediciones a través de pulsaciones láser desde una aeronave que transmite y recibe radiaciones electromagnéticas [4]. Los valores del espectro electromagnético que contiene el infrarrojo cercano están entre 1.04 y 1.06  $\mu\text{m}$ . A esta modalidad de LiDAR también se le conoce como *Airborne Laser Terrain Mapping* (ALTM) [4]. Vea la Figura 1.

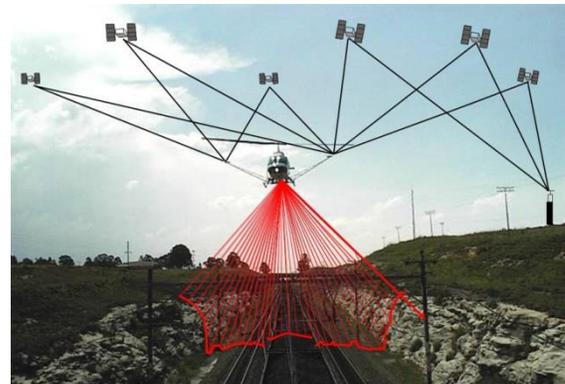


Figura 1  
LiDAR Aerotransportado [5]

Las distancias verticales entre la aeronave con el LiDAR y la superficie terrestre se calculan con el tiempo de retorno de las radiaciones láser y la velocidad de la luz, tal como lo muestra la siguiente ecuación:

$$D = r \left( \frac{t}{2} \right) \quad (1)$$

- $D$ : Distancia entre el sensor LiDAR y el objetivo  
 $r$ : *rate* ( $c$ ) = velocidad de la luz = 0.3 m/ns  
 $t$ : Tiempo desde que se envía el pulso láser hasta que se detecta como retorno. El tiempo se divide entre 2 debido a que la luz debe viajar hacia su objetivo y duplicar su viaje de vuelta al sensor.

La rapidez y calidad de los retornos del LiDAR dependen en gran medida de la capacidad reflectante de los materiales incididos y las pendientes de las superficies. Con esta tecnología los datos obtenidos por el escáner láser se procesan junto a los datos del sistema diferencial de GPS y el sensor inercial de navegación de la aeronave. Todo este sistema se acompaña con una cámara de video que capta la totalidad de las barridas efectuadas por la aeronave, lo cual ayuda enormemente a la interpretación de los datos.

El resultado del procesamiento de datos mencionado en el párrafo anterior es una nube de puntos debidamente georreferenciados tanto en el plano horizontal como en el vertical. Posteriormente, estos puntos pasan por un proceso de filtración de información donde se separan las diferentes cubiertas de la superficie que se captaron durante el proceso de obtención de datos. En esta etapa se separan los puntos de las copas de los árboles, el suelo, carreteras, estructuras y demás infraestructura. Los datos topográficos resultantes se utilizan entonces en la elaboración de modelos de superficie, tales como los modelos digitales de elevación y red de triángulos irregulares (DEM y TIN, respectivamente, por sus siglas en inglés).

La tecnología LiDAR (ALTM) y el desarrollo de modelos digitales de elevación no están exentos de errores sistemáticos e inexactitudes. Entre los más notables se destacan los errores en posicionamiento de los datos del LiDAR y las inexactitudes en el desarrollo de los DEM. En cuanto a la precisión de los datos del LiDAR, la fuente primordial de los errores en posicionamiento se asocia con el equipo de GPS a bordo de la aeronave y la unidad de inercia de navegación. El error horizontal (N, E) es usualmente mucho mayor que el error vertical, debido al efecto de la pendiente del terreno [6]. Por otro lado, entre los muchos factores que afectan la precisión de los DEM se encuentran la precisión de los equipos, la densidad de puntos y fuente de sus datos, los algoritmos de interpolación y la resolución del propio DEM. En términos generales, mientras más

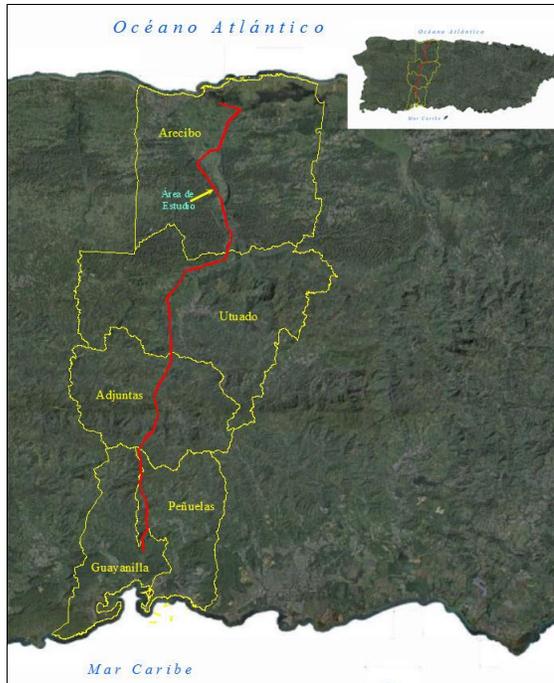
precisos y densos sean los datos del área estudiada, más preciso y confiable será el DEM producido [7].

En sus inicios, la precisión de los datos topográficos recopilados por el LiDAR era inferior que la de los datos obtenidos por las estaciones totales electrónicas (*total stations*) y los equipos GPS. Sin embargo, los avances en los sistemas de LiDAR aerotransportados de hoy día hacen posible la adquisición de datos topográficos de gran calidad en términos de precisión y densidad de los datos. La utilización de los datos LiDAR para la confección de modelos digitales de elevación DEM se ha convertido en una práctica estándar en el campo de las ciencias geoespaciales [8]. Este avance facilita y permite el experimentar con su uso para el diseño preliminar de obras de infraestructura.

Por ejemplo, en la República Popular China se realizó un trabajo en donde se utilizó el LiDAR y los DEM producto de éste para el estudio y trazado de la ruta de una futura línea de transmisión eléctrica. De esa investigación se desprende que el uso del LiDAR hace posible la obtención de modelos digitales de elevación de gran calidad y precisión. Estos DEMs a su vez proveen al usuario no tan solo la oportunidad de escoger la mejor ruta de diseño de una línea eléctrica, sino que también reducen en un 10 por ciento el ahorro en la construcción de la línea [9].

## ÁREA DE ESTUDIO

Dado que el estudio de LiDAR realizado para el proyecto *230 kV Transmission Line from South Coast Plant to Cambalache Plant* fue uno muy extenso y en el mismo se generaron millones de puntos topográficos, fue necesario seleccionar solo una porción del mismo. Por lo tanto, la investigación se limitó al municipio de Arecibo en un tramo de 1.8 km de longitud que comprende el área escénica de la carretera PR-10 en el barrio Carreras hasta la carretera PR-626, sector Calichoza del barrio Hato Viejo. El área seleccionada está dentro de la zona del Carso de Puerto Rico. Vea la Figura 2.



**Figura 2**  
**Ruta del Estudio LiDAR**

## MATERIALES Y HERRAMIENTAS

En la realización de esta investigación se usaron diferentes herramientas, materiales, métodos, datos, etc., los cuales se detallan y describen en esta sección.

### Componentes Físicos o Hardware

- Laptop Panasonic, Modelo Toughbook CF-29, Procesador Intel Centrino
- Laptop Acer, Modelo Aspire S7, Procesador Intel Core i7

### Componentes Lógicos o Software

- AutoCad 2005
- Carlson Civil Suite 2012
- ArcMap 10.1
- Quick Terrain Reader 8
- Microsoft Office Excel 2010
- Microsoft Office Word 2010
- Snagit 11.2.0

### Fuentes para la Colección de Datos

- **Control horizontal y vertical (H/V):** Este control se estableció en el 2002, mediante GPS

estático por el Departamento de Estudios de Ingeniería e Investigaciones de Campo de la AEE y en donde participó el investigador. El control H/V cubrió los pueblos entre Guayanilla y Arcibo. El control horizontal se refirió al *datum* NAD 83 revisión del 1997. Para el modelo matemático de elevaciones se utilizó el Geoide de 1999 obteniendo un MSL local a partir de las elevaciones ortométricas derivadas mediante observación estática de GPS. Es importante recalcar que al momento de este estudio el *National Geodetic Survey* no había finalizado la nivelación de primer orden clase II para Puerto Rico. Los datos se recopilaban con 8 receptores GPS de doble frecuencia (L1, L2), uno de éstos es Javad Legacy-E, otro es Javad Odyssey-E y los restantes 6 son Topcon DX1. La observación estática de GPS se hizo en 8 días laborables por un periodo de 2 semanas.

- **Datos de planimetría y topografía de campo:** Realizados con un *total station* por el investigador para el Departamento de Estudios de Ingeniería e Investigaciones de Campo de la AEE en el 2004. El control horizontal y vertical de campo se desarrolló a partir del control establecido por GPS estático. Para la obtención de los datos de campo se empleó un *total station* Topcon modelo GTS 7001i y un colector electrónico de datos Recon con programación Survey Pro 4.0, ambos de *Tripod Data System*.
- **LiDAR:** Datos obtenida del proyecto *230 kV Transmission Line from South Coast Plant to Cambalache Plant*, específicamente del trabajo realizado para la AEE por las compañías John Chance Land Surveys, Inc., Fugro GeoServices Ltd. y Caribbean Helicorp en el 2003. El investigador participó como observador en uno de los vuelos. El trabajo se extendió a lo largo de unos 37.8 km de sur a norte por los municipios de Guayanilla, Peñuelas, Adjuntas, Utuado y Arcibo. El corredor de información recopilada con el LiDAR fue de 200 metros de ancho, lo que hizo necesario realizar 3 barridas

de la aeronave para obtener la data. La altura de vuelo promedió entre los 250 a 300 metros sobre tierra. El sistema aerotransportado estaba compuesto por 2 *rovers* GPS de doble frecuencia (L1, L2) conectados a 2 Hz en el exterior de la aeronave, una unidad de GPS diferencial en la cabina del piloto, un sensor inercial de navegación, varias unidades estáticas de GPS de doble frecuencia (L1, L2) en tierra conectadas a 2 Hz, una video cámara, y 2 sensores láser con capacidad de emisión de 10,000 puntos por segundo cada uno.

- **Modelos de superficie:** Datos obtenidos del proyecto *230 kV Transmission Line from South Coast Plant to Cambalache Plant*, específicamente del trabajo realizado para la AEE por las compañías John Chance Land Surveys, Inc. y Fugro GeoServices Ltd. en el 2003. Se obtuvieron los modelos de superficie DTM, TIN y TIN 3D y las topografías y topografías 3D realizados.
- **Diseño de línea de transmisión eléctrica:** Trabajo realizado por el Departamento de Diseño y Dibujo de la AEE como parte del proyecto *230 kV Transmission Line from South Coast Plant to Cambalache Plant* entre aproximadamente el 2008 y el 2010. Los documentos están compuestos por el perfil longitudinal y el TIN 3D ilustrando el diseño.

## METODOLOGÍA

La presente investigación consiste de un estudio comparativo experimental. Los datos topográficos del LiDAR en el área seleccionada se compararon con los tomados con el *total station*. En esta comparación se determinó la exactitud vertical de los datos topográficos del LiDAR mediante el uso de estadísticas. En la zona seleccionada para el estudio se encontró que de la nube de datos topográficos de LiDAR había 377,698 puntos de retorno identificados como suelo, de los cuales se tomaron 65 puntos a utilizarse como datos de referencia para su

comparación con 65 puntos tomados con *total station*.

Ante la inmensa cantidad de datos, se eligió realizar una muestra estratificada. Un estudio previo de verificación de precisión vertical de puntos LiDAR muestra que se utilizó exitosamente la razón de muestreo estratificado [6]. En dicho estudio se obtuvieron 250 millones de puntos en un área de 2,000 km<sup>2</sup> y se utilizaron 654 puntos de cotejo y 6 categorías de vegetación.

En la presente investigación, la muestra se basó en la comparación de la cercanía horizontal (coordenadas N, E) entre la huella de puntos LiDAR y los tomados en campo con el *total station*. Las muestras se categorizaron por la cantidad de cubierta vegetal en el área de estudio. Como resultado, las muestras seleccionadas para la investigación cumplieron con dos criterios: estaban ubicadas dentro de la misma categoría de cubierta vegetal y eran cercanas a un control horizontal y vertical del proyecto. Las categorías según la cantidad de cubierta vegetal son las siguientes:

- **Despejada:** Muy poca o ninguna vegetación, mayormente suelo desnudo y superficies de asfalto u hormigón.
- **Moderada:** Arbustos de 2 a 3 metros de altura.
- **Densa:** Área boscosa.

En general, el área de estudio seleccionada presenta árboles de hoja perenne característicos de la zona de piedra caliza húmeda, además de bosques de hojas semi-caducas, según el *Land Cover 2006* del *U.S. Forrest Service*. La arboleda es densa de mediana altura y copa pequeña, así descrita por el Mapa de Uso de Suelos de 1977 del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA).

El archivo de la nube de puntos LiDAR se visualizó y manejó con el programa Quick Terrain Reader 8. Este archivo se encontraba en formato LAS (LASer) y sus puntos estaban etiquetados como puntos de suelo. Una vez seleccionados los puntos sujetos a estudio, se exportaron en un archivo de puntos en formato ASCII (ASC), el cual facilita la lectura del archivo en otros programas.

La nube de puntos en formato ASC se convirtió en formato *shape* (SHP) con el programa Arc Map 10.1, lo que permitió visualizarla sobre una foto de satélite orto rectificadas. Mediante el uso de las herramientas de geo procesamiento de este programa se capturaron los datos que cubrían el área sujeta a estudio y se descartó el restante. Los puntos resultantes de esta selección se exportaron en los formatos *comma separated values* (CSV) y *data base file* (DBF).

La proximidad horizontal entre los puntos del LiDAR y los tomados en campo con el *total station* se verificó utilizando los programas Carlson Civil Suite 2012 y AutoCad 2005. De esta comparación se escogieron aquellos puntos cuya posición fuera la más cercana según la categoría de vegetación y la disponibilidad de puntos de campo. Con estos datos se creó un nuevo archivo que contenía la muestra compuesta por las coordenadas horizontales y verticales de los puntos tomados con *total station* y su correspondiente en LiDAR.

Este nuevo archivo de la muestra se llevó a una hoja de cálculo en el programa Excel para computar las diferencias de elevación entre los puntos similares. Las diferencias verticales se agruparon según la categoría de vegetación y se sometieron a una normalización de datos. Para esto, se realizaron cálculos estadísticos de promedios, varianzas y desviaciones estándar. Los resultados de estos cómputos se tradujeron en gráficas de distribución normal o *bell curves* e histogramas de frecuencia.

Las ecuaciones utilizadas para los cálculos estadísticos son las siguientes:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (3)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (4)$$

$\bar{x}$ : Promedio o media aritmética

$x_i$ : Muestra

$i$ : Número de la muestra

$n$ : Cantidad total de muestras

$s^2$ : Varianza

$s$ : Desviación estándar

Una vez obtenidos los resultados de este análisis, se consultó al profesional capacitado en ley que estuvo a cargo del diseño civil del proyecto. Los resultados se analizaron desde el punto de vista topográfico del diseño junto a los parámetros de diseño de estructuras de líneas de transmisión eléctrica. Con esto se verificó si la precisión de los datos que se obtuvieron en el análisis cumplía con los parámetros mínimos de tolerancia vertical para un diseño preliminar.

## RESULTADOS

En los resultados de la investigación se encontraron valores de elevaciones que oscilaban entre los 183 a 256 metros, *Mean Sea Level* (MSL) local. Las diferencias de elevación entre los puntos tomados con *total station* versus los de LiDAR fluctuaron entre -0.592 a 1.784 metros. La Tabla 1 muestra resultado estadístico de las diferencias verticales para cada una de las categorías de vegetación.

De los datos obtenidos por el LiDAR, el consultor desarrolló modelos de superficie para el proyecto en su fase de diseño. Del área sujeta a estudio se corroboró el resultado y se obtuvieron los modelos de superficie que se muestran en las Figuras 3 a la 6.

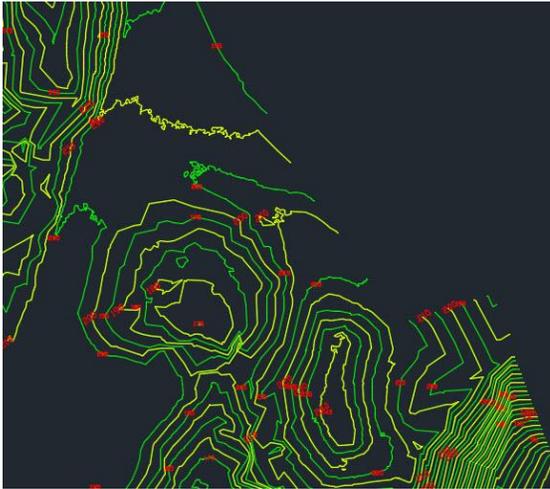
La precisión obtenida de las elevaciones del LiDAR y la gran cantidad de datos obtenidos propició que los modelos de superficie que se desarrollaron fueran de una excelente calidad. Este resultado fue posible en gran medida por la relación existente entre la densidad de datos que genera el LiDAR y su efecto en la precisión de estos modelos. Por otro lado, a menor densidad de datos de LiDAR es más fácil el manejo de los archivos y se reduce el tiempo de procesamiento, pero esto resultaría en una menor resolución y calidad [7].

**Tabla 1**  
**Resultados Estadísticos**

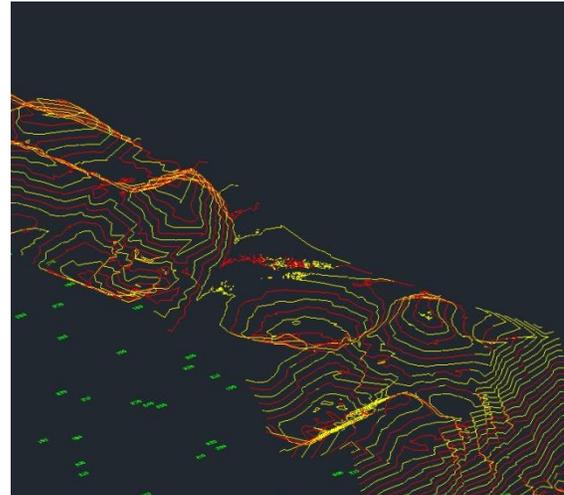
Categoría de Vegetación*	Promedio	Varianza	Desviación Estándar	Cantidad de muestras tomadas con:	
				LiDAR	Total Station
<b>Despejada</b>	0.085 m	0.013 m	0.116 m	26	26
<b>Moderada</b>	0.099 m	0.019 m	0.137 m	24	24
<b>Densa</b>	0.487 m	0.211 m	0.459 m	15	15

\*Categorías de vegetación:

- Despejada: Muy poca o ninguna vegetación, mayormente suelo desnudo y superficies de asfalto u hormigón.
- Moderada: Arbustos de 2 a 3 metros de altura.
- Densa: Área boscosa.



**Figura 3**  
**Topografía de una Porción del Área de Estudio**  
**(Área Escénica en la PR-10) [10]**



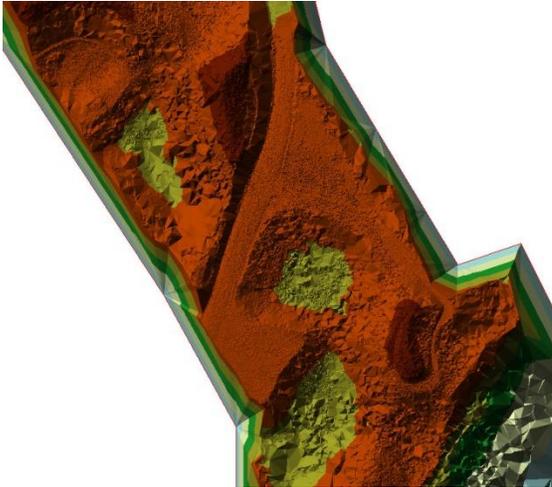
**Figura 4**  
**Topografía en 3D de una Porción del Área de Estudio**  
**(Área Escénica en la PR-10) [10]**

En cuanto a la precisión de las elevaciones obtenidas con el LiDAR, los resultados obtenidos en esta investigación fueron los esperados. Bajo condiciones despejadas y moderadas de vegetación, la precisión obtenida fue de 11 cm. En aquellas áreas clasificadas densas en vegetación, la precisión fue menor y llegó a ser de 45 cm. De los resultados se desprende que las precisiones verticales se mantuvieron menores a un metro en cada una de las áreas las tres áreas. Estos valores concuerdan con estudios de precisión vertical de LiDAR realizados anteriormente [6] [7].

El Departamento de Diseño y Dibujo de la AEE realizó el diseño preliminar de la línea de transmisión eléctrica de su proyecto con los modelos de superficie desarrollados por el consultor a partir del LiDAR ALTM. Entre los

parámetros de diseño para las estructuras de transmisión eléctrica que se emplearon en el área sujeta a estudio se destacaron los siguientes:

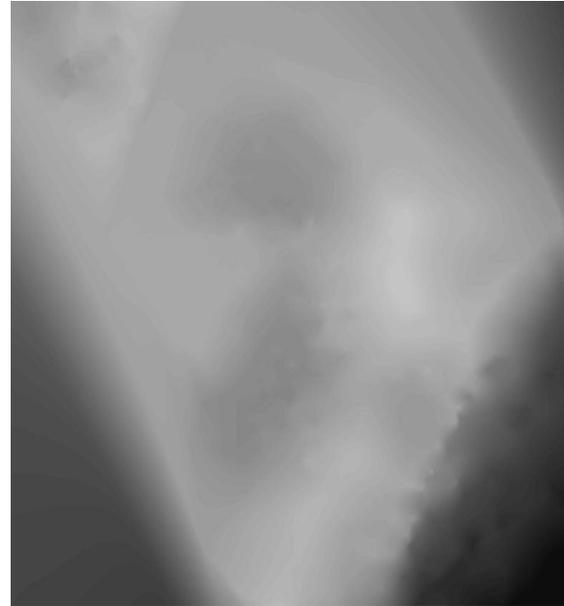
- Se diseñó basado en la capacidad de carga de los helicópteros, los cuales pueden levantar estructuras de 7,000 a 7,500 libras.
- En este proyecto las estructuras se llevaron a su ubicación seccionadas en dos partes, base y tronco. Luego se transportó el restante de la estructura.
- La altura de las estructuras era de 88.5 pies (26.97 m), de los cuales 10 pies (3.04 m) se enterraron bajo tierra (embedment).
- Las tensiones máximas de diseño de las estructuras son de 6,000 libras por conductor en caso de vientos huracanados, aunque cada conductor puede resistir 14,000 libras de



**Figura 5**

*Triangulated Irregular Network* o TIN de una Porción del Área de Estudio (Área Escénica en la PR-10) [10]

- tensión. No se utilizó este último límite, pues el peso de la estructura resultante sobrepasaría la capacidad de carga del helicóptero.
- En condiciones favorables se diseña la ruta lo más recto posible, lo que minimiza la cantidad de estructuras ancladas (definen cambios en dirección de la ruta) y maximiza la cantidad de estructuras pasantes (mantienen la dirección de la ruta). En la topografía kárstica, la proximidad entre los topes y la similitud de elevación en sus cimas, tienden a definir la ruta a seguir. El que estos topes no estén necesariamente alineados provoca una mayor cantidad de cambios de dirección en la ruta. Esto trae como consecuencia inmediata una mayor cantidad de estructuras ancladas.
  - Los DTM y TIN generados con el LiDAR hicieron posible la obtención de modelos de superficie topográfica que se utilizaron para generar los perfiles longitudinales que son parte esencial del diseño preliminar de líneas de transmisión. Al momento del diseño formal se utilizan los modelos de superficie como topografía final, salvo en aquellos casos donde la densidad de la vegetación u otro tipo de obstrucción no haya permitido apreciar la topografía correctamente (diferencias mayores de 2 m). En estos casos y en específico en aquellas áreas donde se construirá la estructura,



**Figura 6**

*Digital Terrain Model* o DTM de una Porción del Área de Estudio (Área Escénica en la PR-10) [10]

es necesario realizar trabajos de topografía (field completion) utilizando instrumentos convencionales de agrimensura para verificar los datos.

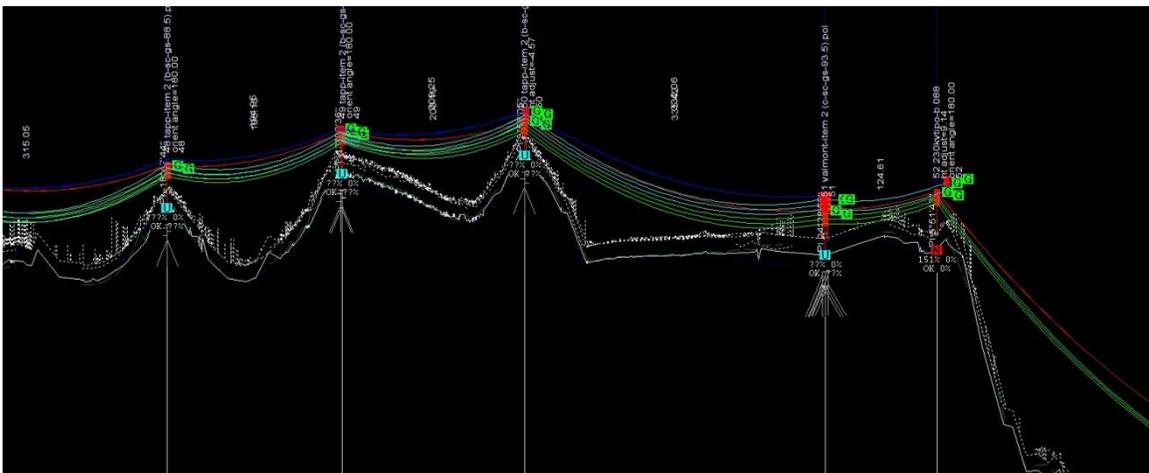
En el área de estudio de esta investigación solo fue necesario verificar la elevación de los puntos donde se construyeron las estructuras. El resultado de este diseño preliminar se incorporó en el diseño final de esta área. Las Figuras 7 y 8 ilustran parte de este diseño.

## CONCLUSIÓN

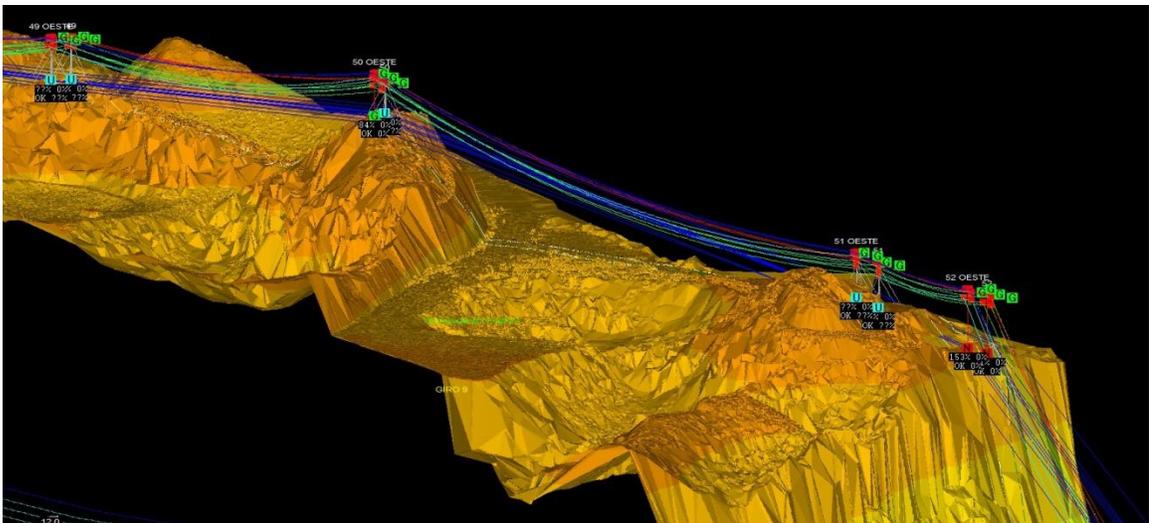
Los resultados de esta investigación demostraron que la precisión de las elevaciones obtenidas por el LiDAR ALTM, al ser menores de un metro, cumplen con los parámetros de precisión vertical para el diseño preliminar de una línea de transmisión eléctrica. Los hallazgos de la comparación de elevaciones evidenciaron que en las áreas con vegetación despejada y en la moderada la precisión fue mayor que la obtenida en el área densa. Esta condición junto a la densidad de datos inciden directamente en la calidad de los modelos de superficie que se desarrollan posteriormente.

Una de las dificultades que presenta actualmente esta tecnología es el manejo de inmensas cantidades de datos. Para el manejo y análisis de éstos es necesario contar con programas específicos y con una gran cantidad de memoria en el componente de hardware. A pesar de ello, los modelos de superficie derivados de esta tecnología son muy detallados y de buena calidad. La confiabilidad de los modelos de superficie generados a partir de los datos del LiDAR será tan buena como la naturaleza del proyecto que así los necesite y especifique.

Esta tecnología puede reemplazar técnicas convencionales de agrimensura en áreas de difícil acceso, siempre y cuando las tolerancias en la precisión horizontal y vertical de los proyectos así lo permitan. La técnica del LiDAR es una opción económicamente viable en proyectos de gran extensión territorial y en donde las técnicas de trabajo convencionales consumirían un tiempo considerable. Igualmente en aquellas áreas de difícil acceso, se puede evitar la exposición a accidentes del personal técnico de campo que realiza estas labores.



**Figura 7**  
**Perfiles Longitudinales de Diseño [10]**



**Figura 8**  
**Triangulated Irregular Network o TIN en 3D con el Diseño [10]**

## AGRADECIMIENTOS

El autor agradece y reconoce el apoyo de la Autoridad de Energía Eléctrica de Puerto Rico, en especial a los ingenieros del Directorado de Transmisión y Distribución: José L. Pérez Rivera, Jefe de Operaciones Técnicas, Omayra González Cains de Construcción de Líneas de Subtransmisión y René Maldonado González del Departamento de Diseño y Dibujo por facilitarme los datos LiDAR y compartir sus conocimientos de diseño del proyecto. A mi mentor para el proyecto de investigación, el Profesor Víctor Romero González por su disponibilidad, entusiasmo y diligente lectura. Quiero además agradecer a mi esposa Mary C. Zapata Acosta por su incalculable ayuda en esta investigación.

## REFERENCIAS

- [1] Bossler, J. D., et al., "An introduction to geospatial science and technology", *Manual of Geospatial Science and Technology*, Second Edition, 2002, pp. 3-4.
- [2] Campbell, J. B., "History and Scope of Remote Sensing", *Introduction to remote sensing*, Third Edition, 2002, pp. 5-6.
- [3] Flood, M., et al., "Commercial Implications of Topographic Terrain Mapping Using Scanning Airborne Laser Radar", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. No. 63(4), 1997, pp. 327-332.
- [4] Uddin, W., "Evaluation of Airborne LiDAR Digital Terrain Mapping for Highway Corridor Planning and Design", *Paper presented at the Pecora 15/Land Satellite Information IV/ISPRS Commission I/FIEOS 2002 Conference Proceedings*, 2002.
- [5] Fugro GeoServices Ltd., "FLI-MAP/LiDAR", Fugro webpage, Recuperado en abril de 2014 de <http://www.fugro.ca/services/aerial-survey/flimap/>.
- [6] Hodgson, M. E., et al., "Accuracy of Airborne Lidar-Derived Elevation: Empirical Assessment and Error Budget", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. No. 70(3), 2004, pp. 331-340.
- [7] Liu, X., et al., "The effect of LiDAR Data Density on DEM Accuracy", *Paper presented at the Proceedings of the International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM07)*, December 2007, pp. 1363-1369.
- [8] Liu, X., "Airborne LiDAR for DEM Generation: Some Critical Issues", *Progress in Physical Geography*, Vol. No. 32(1), 2008, pp. 31-49.
- [9] Zhang, L., et al., "Lidar Application in Selection and Design of Power Line Route", *Paper presented at the Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2007 IEEE International*, July 2007, pp. 3109-3111.
- [10] Autoridad de Energía Eléctrica, "Archivos de Imágenes de LiDAR y Diseño", *230 kV Transmission Line from South Coast Plant to Cambalache Plant Project*, 2003 – 2010.