



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

**“IMPLEMENTACIÓN EN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO
DE UN SISTEMA LIDAR PARA TRAZAR CURVAS DE NIVEL”**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL
AGUA, ORIENTACIÓN MECANIZACIÓN AGRÍCOLA**

AUTOR:

JOSUE RIOFRIO CORREA

BAJO LA SUPERVISIÓN DE: **DR. SAMUEL GARCÍA SILVA**



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
ORIGINA DE EXAMENES PROFESIONALES

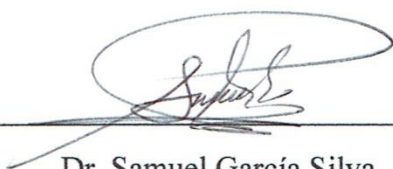
CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO, 09 DE DICIEMBRE DE 2016

**IMPLEMENTACIÓN EN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO DE UN SISTEMA
LIDAR PARA TRAZAR CURVAS DE NIVEL**

Tesis realizada por **Josue Riofrio Correa** bajo la dirección del Comité Asesor indicado,
aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA,
ORIENTACIÓN MECANIZACIÓN AGRÍCOLA**

DIRECTOR: _____


Dr. Samuel García Silva

ASESOR: _____


Dr. Noé Velázquez López

ASESOR: _____


Dr. Agustín Ruiz García

AGRADECIMIENTOS

Por este medio quiero agradecer a todas las personas e instituciones que hicieron posible mi formación y la realización de este proyecto.

Agradezco al Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la Universidad Autónoma Chapingo, por darme la oportunidad de formar parte del programa.

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo para realizar mis estudios.

Al Dr. Samuel García Silva, por todo el apoyo brindado, motivación, por la confianza que puso en mí y en este proyecto, por su disposición y por la dirección durante todo este proceso.

Al Dr, Noé Velázquez López, por la disponibilidad y por su continuo apoyo que permitió la culminación de este trabajo.

Al Dr. Agustín Ruiz García, por su colaboración, por todas sus sugerencias que contribuyeron al desarrollo y mejora de este proyecto.

A todas aquellas personas que directa e indirectamente hicieron posible la realización de este proyecto.

DATOS BIOGRÁFICOS

NOMBRE: JOSUE RIOFRIO CORREA

FECHA DE NACIMIENTO: 11 DE OCTUBRE DE 1989

LUGAR DE NACIMIENTO: HIUCHAPAN HIDALGO

NUMERO DE CARTILLA MILITAR: C-9631155

CURP: RICJ891011HHGFRSR09

PROFESIÓN: INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA

CEDULA PROFESIONAL: 09085568

DESARROLLO ACADÉMICO

BACHILLERATO: COBAEH, PLANTEL NOPALA, HIDALGO

LICENCIATURA: UACH, TEXCOCO ESTADO DE MÉXICO

IMPLEMENTACIÓN EN VEHÍCULO AEREO NO TRIPULADO DE UN SISTEMA LIDAR PARA TRAZAR CURVAS DE NIVEL

EQUIPPING A DRONE WITH AN AIRBORNE LIDAR SYSTEM TO PLOT CONTOURS

Josue Riofrio Correa¹ y Samuel García Silva²

RESUMEN

El objetivo de este proyecto es desarrollar un sistema de bajo costo para trazar curvas de nivel sobre terrenos agrícolas y así poder establecer obras de conservación de suelos, ya que la erosión en terrenos con pendiente representa un grave problema para los agricultores no solamente de nuestro país. El sistema que se desarrolló está basado en el uso de tecnología: Escaneo Laser Aerotransportado, es decir, es un sistema que mientras es aerotransportado por un multirrotor en este caso, realiza un escaneo de la superficie del terreno. El sistema se compone por tres partes imprescindibles se empleó un sensor laser como distanciometro, un sensor GPS para georeferenciar las lecturas del láser y un sensor acelerómetro para determinar la inclinación del sistema. Se seleccionaron tres opciones para los sensores requeridos, se construyó un prototipo del sistema, se calibraron cada uno de los sensores y se desarrolló basado en una plataforma libre un sistema LIDAR. Se realizó un levantamiento para obtener curvas de nivel en un terreno de estudios usando la metodología tradicional y después para el mismo terreno se usó el prototipo de esta investigación, se comparan los resultados obtenidos y se discuten. Así como también se busca investigar las causas de los resultados obtenidos.

Palabras clave: Surcado al contorno, VANT, Modelo Digital de Elevaciones

ABSTRACT

The objective of this project is to develop a low-cost system to plot contour lines on agricultural land and thus be able to establish soil conservation works, because erosion on sloping terrain poses a serious problem for farmers not only in our country. The system developed is based on the use of technology, namely Airborne Laser Scanning, which is a system that while airborne on a multirrotor, in this case, runs a scan of the ground surface. The system is composed of three essential parts: a laser sensor is used as a distance meter; a GPS sensor georeferences the laser readings and an accelerometer sensor determines the system's tilt. Three options for the required sensors were selected, a prototype system was built, each of the sensors was calibrated and a LIDAR system was developed based on a free platform. A survey was conducted to obtain contour lines in a study field using traditional methods and later the prototype developed in this research was used in the same field. This paper compares and discusses the results, and also seeks to investigate their causes.

Keywords: LIDAR, drone, contours, digital elevation model

Autor: Josue Riofrio Correa

Director: Samuel García Silva

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	viii
ABREVIATURAS USADAS.....	x
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
1.1 Degradación de los suelos en México.....	6
1.2 Trazo en campo de curvas de nivel y con pendiente	9
1.3 LIDAR (Light Detection and Ranging).....	10
1.4 LIDAR para la obtención de modelos digitales del terreno	10
1.5 LIDAR vs fotogrametría	13
CAPITULO 2. OBJETIVOS.....	14
2.1 Objetivo General.....	14
CAPITULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS	15
3.1 Características del VANT	15
3.2 Requerimientos del dispositivo	17
3.3 Selección de componentes y materiales para el dispositivo	17
3.3.1 Lidar Lite V2.....	17
3.3.2 GPS u-Blox Neo-6m	18
3.3.3 Acelerómetro MPU6050	19
3.3.4 Tarjeta SD y modulo SD.....	22
3.3.5 Arduino Nano	24
3.4 Construcción del dispositivo para trazar curvas de nivel	25
3.4.1 Algoritmo de control del Sistema LIDAR.....	27
3.4.2 Acoplamiento del dispositivo en el Phantom 3	29
3.5 Calibración y pruebas al dispositivo para trazar curvas de nivel	29

3.5.1 Calibración del sensor Lidar Lite V2	29
3.5.2 Pruebas realizadas al sensor GPS u-Blox Neo 6m	31
3.5.3 Calibración LIDAR Lite V2 y MPU6050	35
3.6 Fase experimental	36
3.6.1 Realización de un levantamiento topográfico usando el dispositivo desarrollado	36
3.6.2 Realización de un levantamiento topográfico mediante la metodología tradicional	37
3.7 Procesamiento de datos obtenidos para trazar curvas de nivel del terreno con Surfer	38
CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
CONCLUSIONES.....	45
RECOMENDACIONES.....	46
BIBLIOGRAFÍA.....	47
ANEXO A: Código del Sistema LIDAR	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Erosión del suelo, (Figura tomada de UNAM Noticias, 2016)	4
Figura 2 Erosión hídrica (Figura tomada de Pacto Global, 2016)	5
Figura 3 Erosión Eólica.....	5
Figura 4 Erosión hídrica potencial en la república Mexicana (Fig. tomada de SEMARNAT, 2016)	7
Figura 5 Erosión eólica potencial en la república Mexicana (Fig. tomada de SEMARNAT, 2016)	7
Figura 6 Principales causas de erosión en México (Fig. tomada de SEMARNAT, 2016)	8
Figura 7 Obtención de Modelos 3D con plataforma aérea (Figura tomada de GeoConnexion, 2016)	11
Figura 8 GPS, (Figura tomada de Eagle Mapping, 2015).....	12
Figura 9 Aplicación de LIDAR en arqueología (Fig. tomada de Lidar Bolivia)	12
Figura 10 Multirrotor utilizado en esta investigación	15
Figura 11 DJI GO app (Fig. tomada de Dronelife, 2016)	16
Figura 12 Lidar Lite V2 (Fig. tomada de RobotShop, 2016).....	18
Figura 13 GPS u-Blox Neo 6m (Fig. tomada de tronixlabs, 2016)	19
Figura 14 IMU MPU6050 (Fig. tomada de Fritzting, 2016).....	20
Figura 15 Ángulos de giro Pitch, Roll y Yaw	20
Figura 16 Error debido a Inclínación del VANT	21
Figura 17 Memoria SD	22
Figura 18 Modulo SD	23
Figura 19 Arduino Nano 328 (Fig. tomada de Arduino.cc, 2016).....	24
Figura 20 Construcción del sistema LIDAR (1)	25

Figura 21 Construcción del sistema LIDAR (2)	26
Figura 22 Diagrama de conexiones del sistema LIDAR.....	26
Figura 23 Prototipo del sistema LIDAR desarrollado.....	27
Figura 24 IDE de Arduino (Fig. tomada de Arduino.cc, 2016)	27
Figura 25 Algoritmo de control del Sistema LIDAR.....	28
Figura 26 Sistema LIDAR acoplado en el Phantom 3	29
Figura 27 Calibración del sensor Lidar Lite V2.....	30
Figura 28 Trayectoria formada por lecturas del sensor GPS u-Blox Neo 6m	31
Figura 29 Estación total Sokkia	32
Figura 30 Grafica de comparación de Longitud	33
Figura 31 Grafica de comparación de Latitud.....	33
Figura 32 Calibración LIDAR+MPU6050	35
Figura 33 Plan de vuelo.....	36
Figura 34 Ejecución de plan de vuelo	37
Figura 35 Cuadrícula realizada para el levantamiento de curvas de nivel	37
Figura 36 Levantamiento de curvas de nivel	38
Figura 37 Surfer 12 (Fig. tomada de Directions Mgazines,2016).....	38
Figura 38 Datalogger.txt	39
Figura 39 Mapa de curvas de nivel A	40
Figura 40 Modelo Digital de Elevaciones A.....	41
Figura 41 Mapa de curvas de nivel B.....	41
Figura 42 Modelo Digital de Elevaciones B	42
Figura 43 Levantamiento en superficie con $p = 0\%$	43
Figura 44 Prueba realizada en cuerda tensada	43
Figura 45 Grafica de comparación entre cotas.....	44

ABREVIATURAS USADAS

VANT: Vehículo Aéreo No Tripulado

LIDAR: Light Detection and Ranging

GPS: Georeferenced Position System

MDE: Modelo Digital de Elevaciones

DOF: Degrees Of Freedom

IMU: Inertial Measurement Unit

IDE: Integrated Development Environment

RADAR: Radio Detection and Ranging

INTRODUCCIÓN

El proceso de pérdida de suelo se ha presentado desde hace más de 35 millones de años en forma natural y 3700 años, al crecer los núcleos de población, practicar la agricultura y deforestar las áreas de bosque en forma irracional. En México la susceptibilidad a la erosión hídrica es elevada debido a que cerca de la mitad de territorio (42.2%) tiene pendientes mayores a tres grados, (Cabrera, 2015).

Las actividades productivas agricultura, ganadería y forestal, así como el crecimiento poblacional han acelerado la erosión del suelo. Las características o condiciones de los elementos ambientales como clima, vegetación, suelo, pendiente, litología, han originado que el suelo se erosione, (Cardona, 2015).

La erosión provoca niveles bajos de fertilidad en el suelo debidos a malas prácticas de manejo por parte de los agricultores, como son: la quema y el sobrepastoreo, principalmente cuando se siembra en terrenos inclinados, que es donde se produce mayor lavado o pérdida de suelo y nutrientes reduciendo la fertilidad y productividad del mismo. Para reducir las pérdidas de suelo es necesario aplicar prácticas de manejo y conservación, que además ayudan a mantener la humedad por más tiempo.

Desde hace más de 2000 años se han aplicado técnicas de conservación de suelo con el fin de controlar la erosión, según Cardona. Las prácticas de conservación de suelo consisten en aplicar técnicas o prácticas que contribuyen a conservar las características físicas, químicas y microbiológicas del suelo, para mantener su capacidad productiva.

Existen muchas técnicas o prácticas de conservación de suelos que son sencillas, de relativo bajo costo, de fácil aplicación y de aceptación por los agricultores; entre ellas tenemos:

* La siembra de plantas de coberturas y abonos verdes

- * El uso de estiércol y aboneras orgánicas
- * La labranza conservacionista o labranza mínima
- * Los sistemas agroforestales
- * La siembra en curvas a nivel o siembra al contorno
- * Las barreras vivas
- * Las barreras o muros de piedra
- * Las terrazas individuales

Existen otras prácticas de conservación que tienen mayor eficiencia en el control de la erosión y por tanto dan mayor protección al suelo, pero son de alto costo y requieren condiciones especiales para su construcción; entre ellas tenemos:

- * Zanjas de ladera
- * Terrazas angostas
- * Terrazas de banco

Este proyecto se centra únicamente en una de las anteriormente mencionadas prácticas de conservación de suelo: Siembra en curvas de nivel o siembra al contorno.

El surcado al contorno es el trazo de los surcos perpendiculares a la pendiente, siguiendo una curva a nivel. El propósito es reducir el escurrimiento superficial y propiciar la infiltración de agua en el perfil del suelo. Los cultivos se establecen de acuerdo con las curvas a nivel siguiendo la configuración del terreno. (SAGARPA, 2015)

Previo al diseño y construcción de infraestructura para el aprovechamiento y conducción hidráulica, así como en obras de conservación de suelo y humedad, es fundamental la realización de estudios topográficos que proporcionen la información de campo para el diseño geométrico de tales estructuras, (COLPOS, 2016)

Un VANT (Vehículo Aéreo No Tripulado), es una aeronave sin un piloto humano a bordo, cuyo vuelo está controlado de forma autónoma, (Duan & Li, 2014). La habilidad y los sentidos del aeronauta han sido reemplazados por sensores electrónicos de gran

precisión, que consiguen una maniobrabilidad prácticamente perfecta, como son acelerómetros y giroscopios, (Ramos, 2014). Hoy día están siendo utilizados en segmentos tan diversos como minería, agricultura, forestal, catastro, SIG (Sistemas de Información Geográfica) y ordenamiento territorial. (Moyano, 2014).

Se pretende desarrollar un dispositivo basado en una plataforma de Software libre que se incorpore a un VANT. El dispositivo se compone de un sensor GPS que proporciona información acerca de la latitud y longitud del terreno en cada punto de medición, un sensor acelerómetro para estimar la actitud de la aeronave, un sensor laser de alta precisión que mide la distancia desde el suelo al VANT, una tarjeta SD que almacena esta información para después ser procesada y una tarjeta Arduino que es programada para obtener las lecturas de los sensores y almacenar esta información en la tarjeta SD.

CAPITULO 1. REVISIÓN DE LITERATURA

Erosión: Es la degradación del suelo debido a procesos inducidos por las actividades humanas que provocan la disminución de su productividad biológica o de su biodiversidad, así como de la capacidad actual y/o futura para sostener la vida humana. Se trata del desgaste de la roca madre por procesos geológicos exógenos. Estos procesos causantes de la erosión pueden ser el viento, las corrientes de agua, los cambios de temperatura o la acción de los seres vivos, Figura 1.



Figura 1 Erosión del suelo, (Figura tomada de UNAM Noticias, 2016)

Erosión Hídrica: Es la remoción del suelo por efecto del agua, sea causada por las gotas de lluvia o por el escurrimiento superficial. Al impactar las gotas de lluvia el suelo, se rompe su estructura superficial salpicando el material sólido que lo compone en todas direcciones

Al disminuir la velocidad del flujo debido a los cambios de pendiente, el material transportado se deposita formando zonas sedimentadas.

El material ya suelto es transportado por el flujo superficial, el cual también produce una fuerza de arrastre sobre el suelo, llegando a formar incluso pequeños canalillos (Figura 2), (Arellano, 2015).



Figura 2 Erosión hídrica (Figura tomada de Pacto Global, 2016)

Erosión eólica: Se define como la remoción del suelo por el efecto del viento, (*Figura 3*). La fuerza de arrastre del viento sobre una partícula de suelo está en función de las fuerzas cortantes (tangenciales) que favorecen la erosión y de las fuerzas normales sobre la superficie del terreno que ayudan a evitar la erosión, la cantidad de material erosionado depende de las características del suelo a ser erosionado, la cobertura vegetal que lo proteja y de las sumas de las fuerzas antes mencionadas, (Arellano, 2015).



Figura 3 Erosión Eólica

1.1 Degradación de los suelos en México

El suelo es una parte fundamental en el funcionamiento de los ecosistemas; en él se realizan funciones tan importantes como los ciclos biogeoquímicos y la captura de agua. Su formación involucra periodos que pueden llegar a miles de años, pero su degradación, algunas veces irreversible, puede realizarse en periodos considerablemente más cortos. Cuando se habla de la degradación del suelo se hace referencia a los procesos inducidos por las actividades humanas que provocan la disminución de su productividad biológica o de su biodiversidad, así como de la capacidad actual y/o futura para sostener la vida humana (Oldeman, 1998).

Debido a la importancia económica, política y social de la degradación del suelo, tanto en México como en el mundo se han realizado diversos estudios para evaluar la magnitud de la superficie afectada, así como el tipo y grado de afectación. En nuestro país el 45 % del territorio mexicano presenta algún tipo de erosión ya sea eólica o hídrica, (Méndez Robles, 2015). En nuestro país se han realizado diversas evaluaciones, pero debido a diferencias metodológicas y a la escala utilizada, sus resultados no son comparables. Los dos más recientes se hicieron en los primeros años del siglo XXI y son la Evaluación de la pérdida de suelos por erosión hídrica y eólica en la República Mexicana y la Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana.

En el primer estudio, se evaluó de manera indirecta la pérdida de suelo por erosión hídrica y eólica a partir de información cartográfica (p. e., de edafología y precipitación) y de modelos paramétricos (Ecuación Universal de Pérdida de Suelos y Ecuación de la Erosión Eólica). Los resultados de este trabajo muestran que 42% de la superficie nacional podría resultar afectada por erosión hídrica, y que 17 entidades federativas mostrarían daño en más de 50% de su territorio, entre ellas Guerrero (79.3%), Puebla (76.6%), Morelos (75.2%), Oaxaca (74.6%) y el estado de México (73.7%). También las regiones montañosas de las Sierras Madre Oriental, Occidental y del Sur, así como vastas regiones de Chiapas y las entidades del centro del país, tendrían riesgo de presentar alta y muy alta pérdida de suelo por erosión hídrica, (SEMARNATa & UACH, 2003), Figura 4.

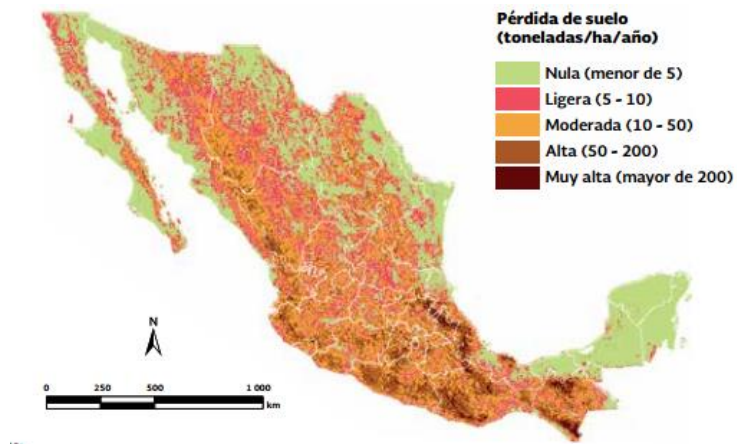


Figura 4 Erosión hídrica potencial en la república Mexicana (Fig. tomada de SEMARNAT, 2016)

Con respecto a la erosión eólica potencial (Figura 5), se estimó que 89% del territorio nacional estaría en riesgo de ser afectado. Prácticamente el 100% del territorio de Aguascalientes, Baja California, Baja California Sur, Sonora, Durango y Zacatecas, tendría alta y muy alta erosión eólica potencial, lo que concuerda con los tipos de vegetación y climas típicos en las zonas áridas y semiáridas del país. Sólo dos entidades mostraron menos de 30% de su territorio con riesgo de presentar erosión eólica: Chiapas (29.3%) y el Distrito Federal (21.8%).

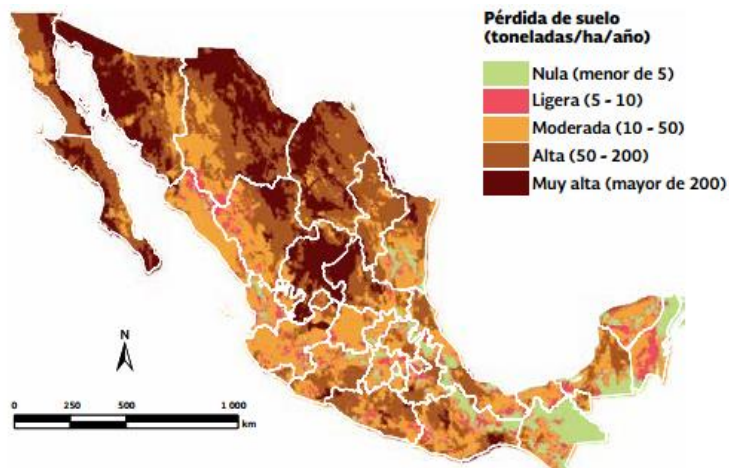


Figura 5 Erosión eólica potencial en la república Mexicana (Fig. tomada de SEMARNAT, 2016)

El segundo estudio reportado en este Informe es la Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre (SEMARNATb & C.P., 2003). Es el más reciente y el de

mayor nivel de resolución que se ha hecho para México, y a diferencia del anterior, se sustenta en un amplio muestreo en campo que permitió determinar de manera directa cuatro procesos de degradación del suelo: erosión hídrica y eólica y degradación física y química, así como sus causas, tipos específicos y niveles de afectación.

La erosión hídrica se define como la remoción laminar o en masa de los materiales del suelo debido a la acción del agua de lluvia, la cual puede deformar el terreno y originar canalillos y cárcavas. En la erosión eólica, el agente erosivo es el viento. La degradación química involucra procesos que conducen a la disminución o eliminación de la productividad biológica del suelo y está fuertemente asociada con la presencia de actividades agrícolas. La degradación física se refiere a un cambio en la estructura del suelo cuya manifestación más conspicua es la pérdida o disminución de su capacidad para absorber y almacenar agua, (SEMARNATc, 2008)

Las causas de la degradación de los suelos en el país (Figura 6), involucran actividades de diversa índole: 35% de la superficie nacional degradada se asocia a las actividades agrícolas y pecuarias (17.5% cada una de ellas) y 7.4% a la pérdida de la cubierta vegetal. El resto se divide entre urbanización, sobreexplotación de la vegetación y actividades industriales.

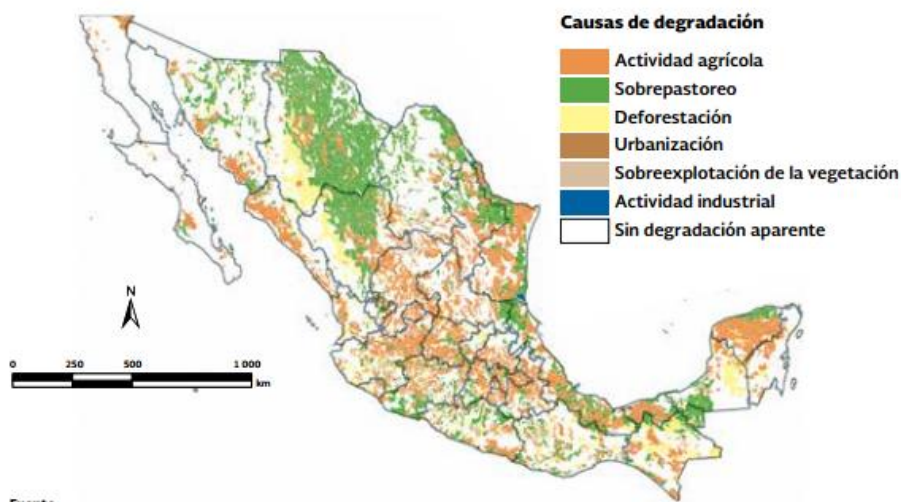


Figura 6 Principales causas de erosión en México (Fig. tomada de SEMARNAT, 2016)

1.2 Trazo en campo de curvas de nivel y con pendiente

El trazo de curvas de nivel e trabajos de conservación de suelos y aguas, es utilizada para la construcción de tinas ciegas, surcado lister, terrazas, zanjas para el control de escurrimiento y, y en caso de terrenos con poca pendiente para el surcado en contorno y cultivo en fajas. De acuerdo a la disponibilidad de aparatos y a la precisión deseada, pueden emplearse diferentes instrumento, como son: nivel de manguera, nivel de mano, nivel montado o tránsito. A continuación se enlistan algunos de los métodos tradicionales para trazar curvas de nivel (Perez Nieto, 1995).

a) Usando manguera de nivel

- ❖ Se coloca un estadal en el inicio de la curva y sobre el, un extremo de la manguera.
- ❖ Con el otro extremo de la manguera colocada en la arista colocada en la arista del estadal, se avanza en el sentido transversal de la pendiente a 5, 10, 15 o 20 m, según la pendiente del terreno y la longitud de la manguera.
- ❖ Una vez alcanzada la distancia definida, el estadal con la manguera adherida a el, se desplaza hacia arriba o hacia abajo del terreno, hasta que l altura del agua en la manguera sea la misma que en el estadal inicial.
- ❖ El proceso se repite hasta que se llegue al otro extremo del terreno.

b) Usando nivel montado y/o con transito

- ❖ El nivel se instala fuera de la línea por donde se trazara la curva y de modo que se domine mayor área posible.
- ❖ Se toma una primera lectura en el estadal colocado en el punto inicial, mismo que se estaca.
- ❖ Se corre el estadal buscando otros puntos consecutivos, separándolos entre sí de 15 a 30 m, en los que se observe la misma lectura inicial y hasta que el punto último se encuentre a no más de 120 m, para evitar visuales largas.
- ❖ Conservando el estadal en el último punto, que se considerara PL, se cambia el aparato hacia adelante y se toma una nueva lectura que será inicial.
- ❖ Se repite el proceso con la nueva lectura hasta la parte final del terreno.

1.3 LIDAR (Light Detection and Ranging)

La tecnología LIDAR (Light Detection and Ranging) proviene de la aplicación de la tecnología láser al principio de funcionamiento del RADAR. Ésta ha resultado ser de utilidad en numerosas aplicaciones de diversos ámbitos, como por ejemplo en la astronomía, geología, robótica y otros. Concretamente, la tecnología LIDAR se ha utilizado ampliamente en el campo de la topografía, (Sanchez Garcia, 2012).

El LIDAR. Cuya esencia reside en que es un dispositivo del tipo de sensores activos que permite determinar la distancia desde un emisor a un objeto o superficie, utilizando un haz láser pulsado; donde la distancia se determina midiendo el tiempo de retraso entre la emisión del pulso y su detección a través de la señal reflejada.

El LIDAR surge en los años 70 en los laboratorios de la NASA, pero no se le encontró uso o aplicación hasta que no se desarrollaron los sistemas de posicionamiento y navegación, ya que sería entonces cuando el LIDAR se instauró como una alternativa más para la Cartografía. El LIDAR se convierte en una alternativa a la cartografía en torno al año 1988, cuando el Profesor Ackerman del Instituto de Stuttgart, lo introdujo en las actividades de investigación de Fotogrametría. Así, durante los años 90 es cuando comienzan a desarrollarse las diferentes técnicas y tecnologías LIDAR, especialmente por los estudios desarrollados para el análisis de la atmosfera mediante sensores LIDAR. Y recientemente utilizando 4 diferentes tipos de LIDAR para la detección de nubes en la atmosfera, (Ackerman, Holz, & Frey, 2008).

1.4 LIDAR para la obtención de modelos digitales del terreno

En los últimos años, el uso de plataformas VANT se ha vuelto más y más interesante y útil para la captura de datos espaciales para una variedad de aplicaciones tales como el monitoreo del medio ambiente, exploración de recursos, así como también aplicaciones LIDAR. Una pequeña plataforma VANT de bajo costo para usos civiles a menudo tiene limitación en componentes que puede llevar consigo así como, el volumen y peso, (Jiazhi, Guoqing, Xhinchén , & Wei , 2011).

LIDAR funciona a través de pulsos de energía láser. Es la integración de tres tecnologías distintas: la telemetría láser, el sistema de posicionamiento global (GPS) y la medición de movimiento inercial (IMU). A la vez que un avión o helicóptero vuela por el aire, el láser emite miles de pulsos de energía por segundo hacia la tierra, creando una franja densa de puntos 3D, Figura 7.

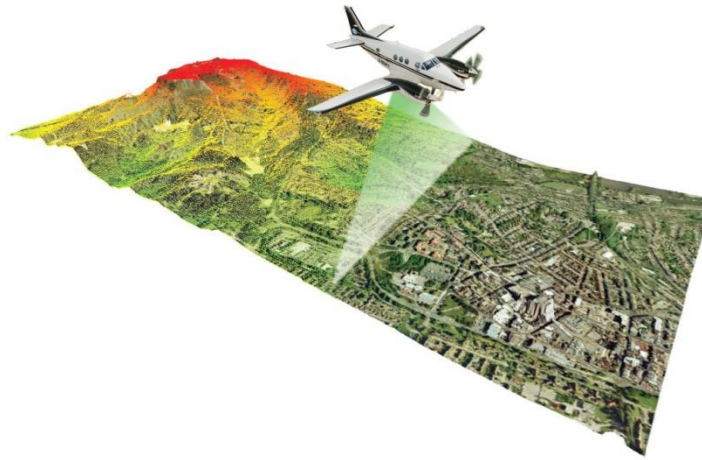


Figura 7 Obtención de Modelos 3D con plataforma aérea (Figura tomada de GeoConnexion, 2016)

Para calcular la distancia, el sistema mide el tiempo que toma cada pulso en viajar del sensor al blanco y volver, multiplica este tiempo por la velocidad de luz y divide el resultado por dos. El ángulo de escaneo también se registra.

El siguiente componente es el GPS, lo cual aprovisiona el posicionamiento en el mundo. Un equipo GPS en la aeronave recibe y registra datos de un conjunto de satélites que giran alrededor de la Tierra. Con un mínimo de cuatro satélites, se puede determinar la posición del láser. Se establecen una o más bases terrestres de GPS sobre puntos de referencia dentro o cerca del área de interés. Estas bases proveen correcciones para el GPS aéreo. Se combinan los datos de GPS terrestre y aéreo después para crear GPS diferencial, lo cual puede mejorar la exactitud de metros a centímetros como se muestra en la Figura 8.



Figura 8 GPS, (Figura tomada de Eagle Mapping, 2015)

Dado que ninguna aeronave está completamente estable y nivelada en el aire, se necesita una manera de medir la orientación del láser en el momento en que se dispara cada pulso de luz. El equipo IMU da esta información. Mide el balanceo, cabeceo y viraje del avión o helicóptero y, por lo tanto, el sensor mientras vuelan. Después del vuelo, estas correcciones angulares se combinan con la información de posicionamiento de GPS y luego con la telemetría y ángulos de escaneado del sensor. Software especializado calcula las coordenadas XYZ de cada dato vuelto. Así, LIDAR es la integración de tres tecnologías avanzadas que hace levantamientos topográficos rápidos con exactitud superior, (Beasy, 2016). También se pueden generar la digitalización en 3D de ciudades arqueológicas para su mayor estudio, (Figura 9).

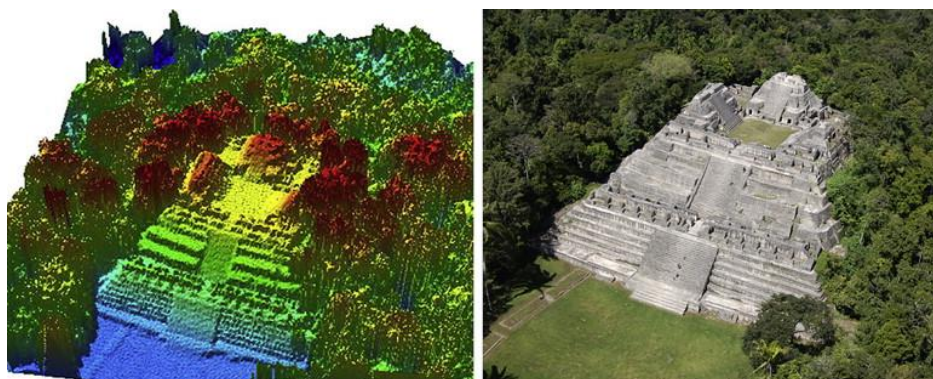


Figura 9 Aplicación de LIDAR en arqueología (Fig. tomada de Lidar Bolivia)

Con la proliferación en los últimos años de LIDAR aerotransportados, y el aumento de la capacidad computacional y de almacenamiento, así como las capacidades gráficas de equipos de cómputo, las nubes de puntos han comenzado a utilizarse tanto para el

análisis como para la recopilación de datos, aunque la mayor utilización operacional de LiDAR probablemente sea crear mallas a partir de nubes de puntos, (Guth, 2016).

1.5 LIDAR vs fotogrametría

El escaneo láser aerotransportado (ALS) y los sistemas de fotogrametría aérea se han convertido en herramientas clave para la recopilación de información sobre la superficie de la Tierra. La información derivada de los datos de LIDAR y las imágenes permite una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo la generación de MDE, (Yang & Chin, 2015).

Los VANT proporcionan una nueva manera de complementar a sistemas standard de adquisición remota, tanto en resoluciones espaciales y temporales ya que pueden obtener información de baja altitud. Mini – UAV equipados con GPS, IMU, escáneres láser de peso ligero, y cámaras presentan varias características interesantes, como la flexibilidad, alta resolución, la eficiencia y posibilidades de personalización, y han dado lugar a soluciones prometedoras para la generación de mapas y para muchas aplicaciones en años recientes, (AJaakkola, y otros, 2015).

LIDAR es una tecnología que ofrece mejores capacidades. En definitiva, que proporciona modelos digitales del terreno más precisos que los que obtiene la generación de estos modelos por técnicas de fotogrametría, para una misma escala de vuelo; y, además, permite disponer de información del suelo debajo de la vegetación, aspecto que para las técnicas de fotogrametría es imposible, (Rodriguez Rico, 2009).

CAPITULO 2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Desarrollar un dispositivo ligero que pueda acoplarse a un VANT, dispositivo que a partir de la incorporación una placa Arduino, un módulo SD, un sensor laser, sensor acelerómetro y un sensor GPS, sea útil para calcular y obtener curvas de nivel en un terreno.

2.2 Objetivos particulares

- ❖ Construir el dispositivo basado en una plataforma abierta
- ❖ Calibrar el dispositivo construido
- ❖ Instalar el dispositivo en el VANT para la adquisición de datos
- ❖ Definir un terreno para el estudio y realizar un plan de vuelo del VANT para éste
- ❖ Obtener datos de interés a partir de las lecturas obtenidas de los sensores del dispositivo, estos valores son principalmente: Longitud (X), Latitud (Y) y Altitud (Z)
- ❖ Procesar los datos de los puntos, mediante el uso de un programa apropiado (Surfer)
- ❖ Elaborar un mapa de curvas de nivel y un modelo digital de elevaciones (MDE) del terreno
- ❖ Validar el mapa de curvas de nivel y el MDE obtenidos tanto con el sistema LIDAR, como con un levantamiento topográfico convencional

CAPITULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación se detalla cada uno de los materiales utilizados en este proyecto, así como el proceso que se llevó a cabo a lo largo de la investigación.

3.1 Características del VANT

En primer lugar hablaremos del VANT utilizado, en el cual se implemento el dispositivo para trazar curvas de nivel. Se trata de un multirotor, el cuadricoptero Phantom 3 standard, el cual se muestra en la Figura 10.



Figura 10 Multirotor utilizado en esta investigación

Algunas de las especificaciones técnicas de este VANT que pueden ser resaltadas de entre todas las que el fabricante proporciona y que son de importancia para este proyecto son las siguientes:

- ❖ Máxima duración de Vuelo: Aproximadamente 25 minutos

- ❖ Distancia Máxima FCC: 1000 m; CE: 500 m (En el exterior y sin obstáculos, altitud de vuelo 120m)
- ❖ Vuelo estacionario: Cuando se deja de enviar órdenes el Phantom 3 Standard flota estático en su lugar, manteniendo tanto la altitud como la posición,
- ❖ Localización GPS: El Phantom 3 Standard envía su posición GPS en el mapa a un dispositivo móvil. Utiliza este mapa para saber dónde se encuentra exactamente, en qué dirección se orienta y para guiarlo de vuelta a casa si se requiere.

La empresa DJI desarrolló la aplicación DJI GO la cual es una interfaz entre el usuario y el VANT y facilita la interacción y operación del drone. Así como también se enlaza con un dispositivo móvil para observar en primera persona (FPV), lo que transmite la cámara desde el drone, ya sea video o imágenes. No se abundara demasiado en el uso de la aplicación ya que no es el tema de estudio. Solo se hará hincapié brevemente en algunas de las posibilidades que ofrece esta aplicación por ejemplo: modo de vuelo seleccionado, señal de GPS, status del aeronave, señal del radiocontrol, porcentaje de batería, botones de auto-take-off/landing, return to home, altura de vuelo, distancia al punto de despegue, velocidad horizontal y vertical, entre otras. En la siguiente captura de pantalla (Figura 11) se muestra algunos de los status que se muestran en todo momento durante el manejo de la aeronave y que sirven como indicadores visuales y notificaciones que se deben de tomar en cuenta para el correcto y seguro uso del drone.

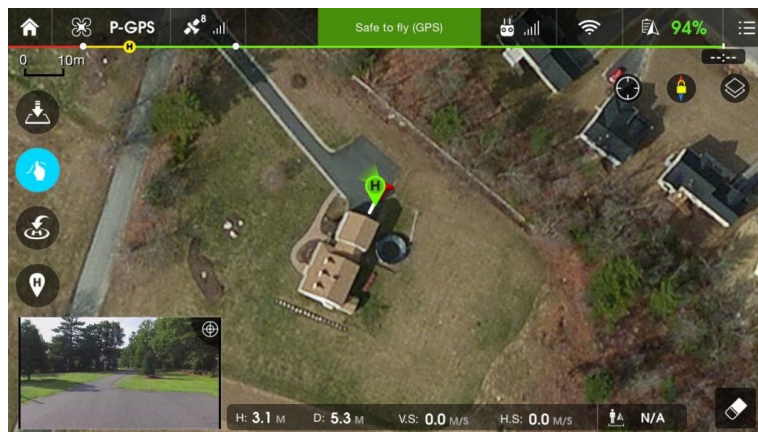


Figura 11 DJI GO app (Fig. tomada de Dronelife, 2016)

3.2 Requerimientos del dispositivo

En base a la problemática planteada anteriormente se conceptualiza el desarrollo de un dispositivo de bajo costo, para ser aerotransportado por un VANT y que mediante su implementación sea útil para obtener información acerca de la topografía de un terreno,

Se requiere que el dispositivo obtenga datos de la altitud (Z) del terreno, mientras este es aerotransportado a lo largo de un plan de vuelo previamente programado. Se requiere que el dispositivo, proporcione información para poder geoposicionar los datos correspondientes a las altitudes del terreno en cuestión (Z), es decir sus coordenadas. Latitud (Y) y longitud (X). No se pretende realizar una nube de puntos sino más bien obtener puntos suficientes para poder interpolar las curvas de nivel de un terreno. Se requiere que el dispositivo pueda almacenar en forma análoga a un datalogger las variables mencionadas anteriormente (X, Y y Z). Para que una vez en tierra se extraiga y se procese esta información.

3.3 Selección de componentes y materiales para el dispositivo

En este apartado se describen cada uno de los componentes que fueron seleccionados para la construcción del dispositivo, en base a los requerimientos que debe de cumplir este, así como algunas de sus especificaciones técnicas y su función correspondiente al integrarse al dispositivo.

3.3.1 Lidar Lite V2

El LIDAR Lite 2 es un telémetro láser, es una solución de medición basado esencialmente en un láser, potente, escalable y económico que soporta una amplia variedad de aplicaciones (Aviones no tripulados, robótica, sensores industriales y más). Mide la distancia, la velocidad y la intensidad de la señal de objetivos cooperativos y no cooperativos a distancias de cero a más de 40 metros. Que ofrece el más alto rendimiento disponible en sensores de su clase.

Opera a una velocidad de medición de hasta 500 lecturas por segundo que ofrecen una mayor resolución para aplicaciones de escaneo. Es compatible con el más básico de los conductores e I2C, con el cual cuenta la mayoría de las placas micro - controlador. En la siguiente imagen e muestra la apariencia del sensor, Figura 12.



Figura 12 Lidar Lite V2 (Fig. tomada de RobotShop, 2016)

La combinación de atributos que se encuentran en el LIDAR Lite v2 son: alto rendimiento, bajo coste, tamaño pequeño, ligero, bajo consumo de energía y capacidad de configuración dinámica junto con las comunicaciones I2C. Se vuelve práctico para instalar múltiples sensores en un proyecto con peso y potencia reducidos. El ancho del haz del LIDAR - Lite como se entrega es 0,5 °. Este haz estrecho proporciona un rendimiento a largo plazo y también permite una mejor selectividad de destino en comparación con un sensor ultrasónico.

3.3.2 GPS u-Blox Neo-6m

El módulo NEO 6M de la empresa suiza u-Blox es una excelente alternativa de precisión y costo beneficio. Es de un tamaño reducido por lo que es fácilmente portable, (Figura 13). Se comunica a través de puerto serial UART. Esta presentación viene en modo modular para usarla en cualquier plataforma como Arduino, RaspberryPi, pcDuino o con una Laptop. Mide parámetros Latitud, Longitud, Velocidad, Altitud. A continuación se muestra en la, el sensor GPS.



Figura 13 GPS u-Blox Neo 6m (Fig. tomada de tronixlabs, 2016)

Características:

- Ultra sensibilidad: -165dBm
- 22 tracking/66 acquisition-channel receiver
- Soporta estándares WAAS/EGNOS/MSAS/GAGAN
- Frecuencia de actualización 5Hz
- Velocidad de desplazamiento máxima: 500m/seg
- Protocolo NMEA (a 9600bps)
- 01 puerto serial
- Antena incorporada de 18.2 x 18.2 x 4.0 mm
- Rango de temperatura: -40 to 85 C
- Tamaño reducido 30mm x20mm x 11.4mm

3.3.3 Acelerómetro MPU6050

Con objeto de medir la inclinación del LIDAR se instrumenta una IMU (Acelerómetro y giroscopio de 6 grados de libertad), la posición espacial del sistema LIDAR se puede determinar si se conoce el ángulo de inclinación que se forma con respecto a la horizontal de los ejes X, Y y Z.

El MPU-6050 es una IMU de 6DOF (se lee “6 Degrees Of Freedom“). Esto significa que lleva un acelerómetro y un giroscopio, ambos de 3 ejes ($3+3 = 6DOF$), (ROBOLOGS, 2014).

Posee ADC internos de 16Bit y se maneja por I2C desde cualquier microcontrolador. Cuenta con conversores analógicos digitales por cada uno de los ejes de cada uno de los sensores para obtener los valores en simultaneo con un rango de hasta 2000°/s para el

giroscopio y hasta $\pm 16g$ para el acelerómetro. A continuación se muestra la apariencia del sensor MPU6050, Figura 14.

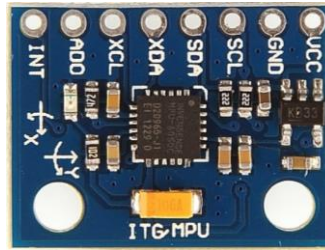


Figura 14 IMU MPU6050 (Fig. tomada de Fritzing, 2016)

La definición de ángulos de Euler que se utiliza es equivalente a los ángulos Roll (ϕ), Pitch (θ) y Yaw (Ψ). Estos ángulos se definen con respecto a los ejes coordenados del vehículo. Si se considera el plano del horizonte como el definido por las alas de un avión cuando éste realiza un vuelo horizontal, podemos definir los signos de estos ángulos de la siguiente manera: el ángulo Roll (ϕ) es positivo cuando el ala derecha se mueve por debajo del plano del horizonte, el ángulo de Pitch (θ) es positivo cuando el morro del avión cae por debajo de la línea del horizonte y el ángulo de Yaw (Ψ) se define positivo cuando el morro está rotando desde el norte hacia el oeste, (Sanchez Garcia, 2012).

En la siguiente imagen (Figura 15), se muestra como se definen los ángulos de giro (pitch, roll y yaw), en el sensor laser utilizado. se utiliza esta configuración debido a que el sensor se montara apuntando hacia el terreno.



Figura 15 Ángulos de giro Pitch, Roll y Yaw

El objetivo de colocar un acelerómetro en el dispositivo es conocer el ángulo de inclinación del sensor laser durante la recolección de datos, esto con el fin de poder corregir errores en las mediciones debidos a la inclinación de la aeronave.

En la Figura 16, se muestra la forma de calcular la distancia ortogonal al plano tomando en cuenta inclinaciones debidas a la posición del VANT.

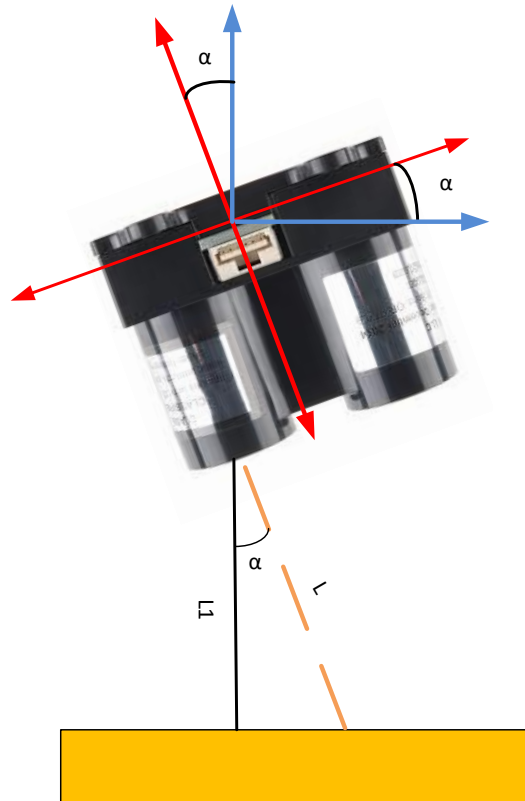


Figura 16 Error debido a Inclinación del VANT

De las lecturas del Lidar conocemos a L y debido también a las lecturas del acelerómetro podemos calcular el ángulo alpha, para calcular la distancia L1 empleamos:

$$L1 = L * \cos \alpha \quad (1)$$

De la misma forma con seguridad existirá una inclinación en beta y gama, para calcular la distancia ortogonal debida a una inclinación en alpha y beta se emplea:

$$L2 = L1 * \cos\beta \quad (2)$$

Para este proyecto en particular no es necesario conocer la inclinación en el eje z, ya que el movimiento de cabeceo no se traduce en un error a diferencia del movimiento de guiñada y alabeo del VANT.

3.3.4 Tarjeta SD y modulo SD

En los últimos años, las tarjetas SD y microSD se han popularizado mucho, debido al auge de la fotografía digital y la telefonía móvil. No es fácil encontrar un teléfono móvil o Tablet, a quien no se le pueda ampliar la memoria con una de estas tarjetas, (Figura 17).



Figura 17 Memoria SD

Basadas en la tecnología de memoria FLASH, permiten escribir con buena velocidad (Relativamente) y además no pierden el contenido cuando las desconectamos, lo que las ha convertido en una solución de primera para intercambiar información.

Desde cámaras de fotos, Teléfonos digitales y Memorias USBs, la tecnología FLASH ha tenido un gran éxito y una aceptación masiva.

Para la realización de este proyecto se utilizara una memoria SD para almacenar los datos adquiridos por el sistema LIDAR. Debemos tomar en cuenta las ventajas y desventajas que esto conlleva. La primera es que Arduino puede leer y escribir en estas tarjetas, pero no formatearlas. Esto debe hacerse desde una PC. No es grave, pero es así.

Lo segundo es que las PCs pueden manejar varios formatos de sistema de archivos, pero la librería SD por ahora solo soporta FAT16 y FAT32. Ambos formatos son una herencia de los viejos tiempos y de algún modo determinan el máximo tamaño de disco (O de tarjeta) que puedes usar. En principio se usa FAT32 se puede usar una tarjeta de hasta 32Gb.

Otra desventaja se tiene con los nombres de archivos que quedan limitados al viejo formato 8.3, con nombre de 8 caracteres y extensiones de tres. Y nada de acentos en los nombres ni Ñs ni espacios en blanco. Nada que no sean letras y números.

El módulo MicroSD (TF) compatible con tarjetas SD TF (comúnmente utilizado en teléfonos móviles), que es la tarjeta más pequeña en el mercado. El módulo SD tiene diversas aplicaciones tales como registrador de datos, audio, vídeo, gráficos. Este módulo ampliará enormemente la capacidad de memoria del Arduino.

Este módulo tiene una interfaz SPI y su alimentación es de 5V que lo hace compatible con Arduino.

A continuación se muestra en la Figura 18 el modulo SD para Arduino usado en el sistema



Figura 18 Modulo SD

El modulo SD se utilizara para guardar las variables X, Y, Z y las lecturas de las aceleraciones en los ejes x, y, z; en una memoria SD, a través de Arduino Nano 328 mediante la interfaz SPI

3.3.5 Arduino Nano

El Arduino Nano es una pequeña, completa y amigable tarjeta basada en el ATmega328 (Arduino Nano 3.x) o ATmega168 (Arduino Nano 2.x). Carece de una sola toma de corriente continua, y funciona con un cable USB Mini-B en lugar de una normal.

El Arduino Nano puede ser alimentado a través de la conexión USB Mini-B, o a través de 6-20 V de una fuente de alimentación externa (pin 30), o 5V de una fuente regulada externa (pin 27). La fuente de alimentación se selecciona automáticamente en base al voltaje más alto.

El ATmega168 tiene 16 KB de memoria flash para almacenar el código (de los cuales se utiliza 2 KB para el gestor de arranque); el ATmega328 tiene 32 KB, (también con 2 KB utilizado por el gestor de arranque). El ATmega168 tiene 1 KB de SRAM y 512 bytes de EEPROM (que pueden ser leídos y escritos con la librería EEPROM); el ATmega328 tiene 2 KB de SRAM y 1 KB de EEPROM.

En el anexo A se presentan de manera detallada todas las especificaciones técnicas dadas por el fabricante. En la Figura 19 se muestra el Arduino Nano 328 utilizado en este proyecto, será el encargado de leer los datos recabados por los sensores y escribirlos en la tarjeta SD.



Figura 19 Arduino Nano 328 (Fig. tomada de Arduino.cc, 2016)

Cada uno de los 14 pines digitales en el Nano se puede utilizar como una entrada o salida, utilizando las funciones `pinMode()`, `digitalWrite()`, y `digitalRead()`. Operan a 5 voltios. Cada pin puede proporcionar o recibir un máximo de 40 mA y tiene una resistencia de pull-up (desconectada por defecto) de 20-50 kOhms. Además, algunos pines tienen funciones especializadas:

- **Serial: 0 (RX) y 1 (TX).** Se utiliza para recibir (RX) y transmitir datos en serie (TX) TTL. Estos pines están conectados a los pines correspondientes del chip de serie FTDI USB-a-TTL.
- **Las interrupciones externas: 2 y 3.** Estos pines pueden ser configurados para desencadenar una interrupción en un valor bajo, o un cambio en el valor.
- **PWM: 3, 5, 6, 9, 10, y 11.** proporciona una salida de PWM de 8 bits con la función `analogWrite()`.
- **SPI: 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK).** Estos pines soportan la comunicación SPI, que, aunque proporcionada por el hardware subyacente, no está incluido en el lenguaje de Arduino.

3.4 Construcción del dispositivo para trazar curvas de nivel

Se realiza la conexión de los elementos electrónicos antes mencionados para la construcción del sistema LIDAR. Dentro de una caja de plástico se colocaron los elementos electrónicos y sensores antes mencionados como se muestra a continuación en la Figura 20.

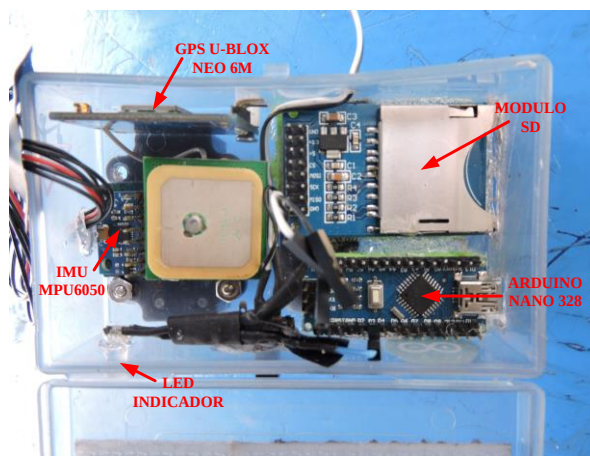


Figura 20 Construcción del sistema LIDAR (1)

Se utilizaron tornillos para fijar los sensores a la caja para evitar que estos se movieran como se muestra en la Figura 21.

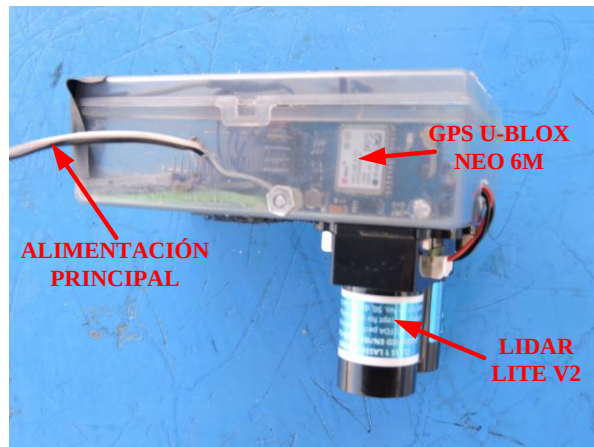


Figura 21 Construcción del sistema LIDAR (2)

A continuación se muestran las conexiones realizadas en el sistema LIDAR, así como también cada uno de los componentes mencionados, (Figura 22).

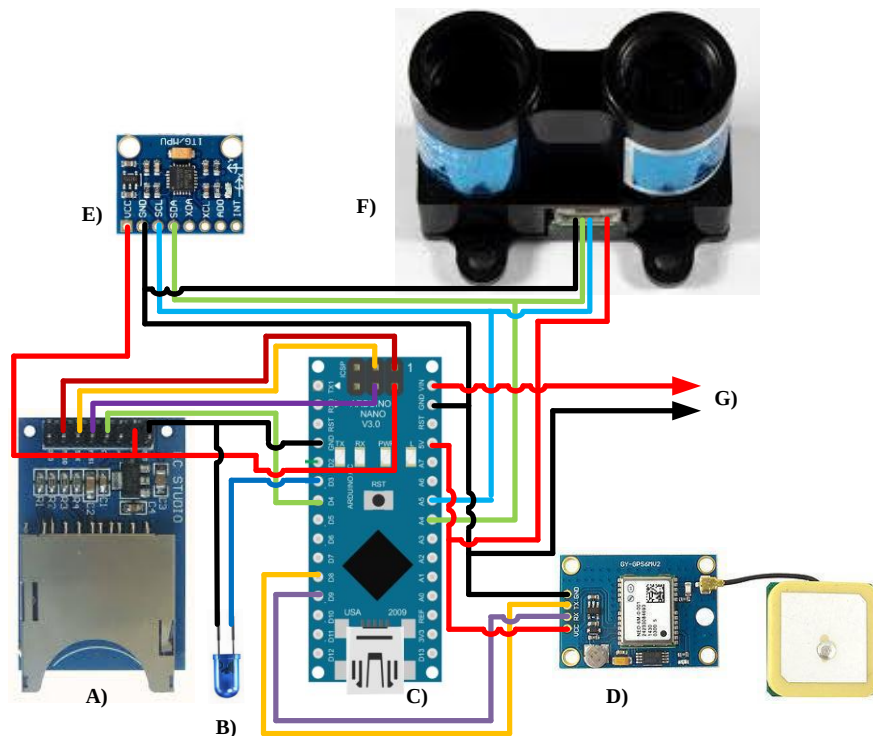


Figura 22 Diagrama de conexiones del sistema LIDAR

A) Modulo SD, B) Led indicador de SD, C) Arduino Nano 384, D) Modulo GPS Neo u-Blox 6m, E) Acelerometro+giroscopio MPU6050, F) LIDAR lite v2, G) Alimentación general.

El peso final del dispositivo, (Figura 23) es de 110 gramos, sin batería. Como se mencionó se necesita una batería de 9 Volts la cual pesa alrededor de 35 gramos, dando un total de 145 gramos, lo que significa que el VANT debe soportar este peso.



Figura 23 Prototipo del sistema LIDAR desarrollado

3.4.1 Algoritmo de control del Sistema LIDAR

El algoritmo de control programado en el sistema LIDAR se compone por una serie de instrucciones que deben realizarse por el hardware compuesto por sensores y demás componentes. El algoritmo de control fue programado utilizando el IDE de Arduino, (Figura 24).



Figura 24 IDE de Arduino (Fig. tomada de Arduino.cc, 2016)

El dispositivo se enciende mediante un switch general que interrumpe la alimentación del sistema, una vez esta se enciende se inicia la comunicación SPI para comprobar el estado de la tarjeta SD, lo siguiente es esperar a que el modulo GPS obtenga un número mayor a seis satélites disponibles lo cual se puede observar cuando un led incluido en el módulo empieza a encender. Una vez que el modulo GPS y la tarjeta SD están listos para usarse se procede a obtener lecturas de los sensores, en primer lugar se obtiene la posición del GPS, luego la lectura de distancia y por último la lectura de aceleraciones para pitch, roll y yaw dadas por el acelerómetro.

Una vez se han obtenido todas las mediciones se almacenan en la tarjeta SD y se escriben en un archivo de texto DATALOG.txt, y por último se enciende un led indicador de que los valores han sido guardados correctamente, led que al iniciar una nueva medición se apaga. En el Anexo A se incluye el código del sistema LIDAR.

Todo ese proceso esta descrito en la Figura 25.

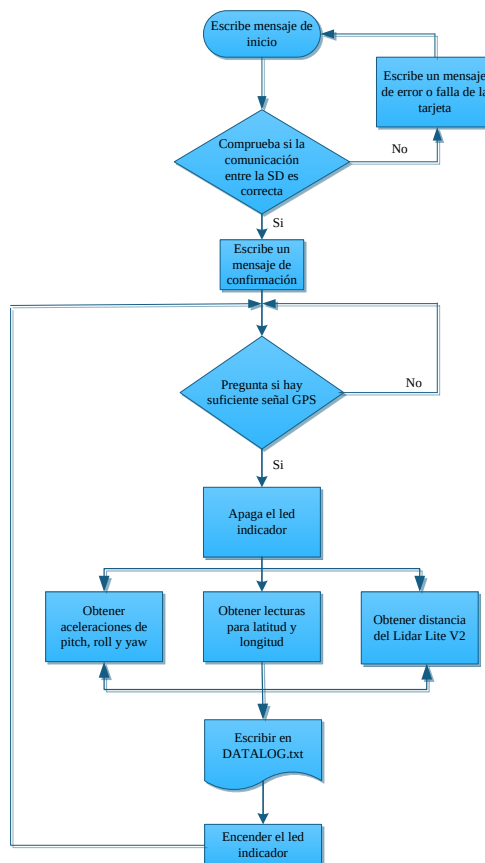


Figura 25 Algoritmo de control del Sistema LIDAR

3.4.2 Acoplamiento del dispositivo en el Phantom 3

Con el fin de poder aerotransportar el dispositivo construido se optó por una unión rápida que es muy común en aeromodelismo, se utilizaron dos tiras adhesivas de velcro, una en la parte inferior del VANT y la otra en la parte superior del dispositivo a continuación se muestra la forma en que se acopla el dispositivo, Figura 26.



Figura 26 Sistema LIDAR acoplado en el Phantom 3

Otro aspecto importante es la alimentación necesaria para el dispositivo (5 a 9 VDC), esta se es suministrada por una batería de 9 Volts que se adiciona al dispositivo como una alimentación independiente a la alimentación propia del drone.

3.5 Calibración y pruebas al dispositivo para trazar curvas de nivel

En este apartado se describe los resultados obtenidos a pruebas y calibraciones realizadas a cada uno de los sensores utilizados en el dispositivo.

3.5.1 Calibración del sensor Lidar Lite V2

A fin de calibrar las mediciones obtenidas con este sensor se estableció un pequeño experimento el cual consistió en:

1. Usando una cinta métrica se colocaron marcas en el piso a cada 10 cm a partir de una pared, comenzando desde 21 cm hasta 401 cm.

2. Se colocó el sensor Lidar Lite V2 en cada una de las marcas correspondientes a distancias mencionadas.
3. Se tomaron 10 mediciones para cada una de las marcas y se registraron.
4. Por último se comparan las distancias medidas por el sensor con las distancias marcadas y que corresponden a las mediciones reales.

En la siguiente grafica (Figura 27), se muestran la mitad de los resultados obtenidos del procedimiento descrito, esto a fin de poder apreciar de mejor forma y hacer la comparación respectiva.

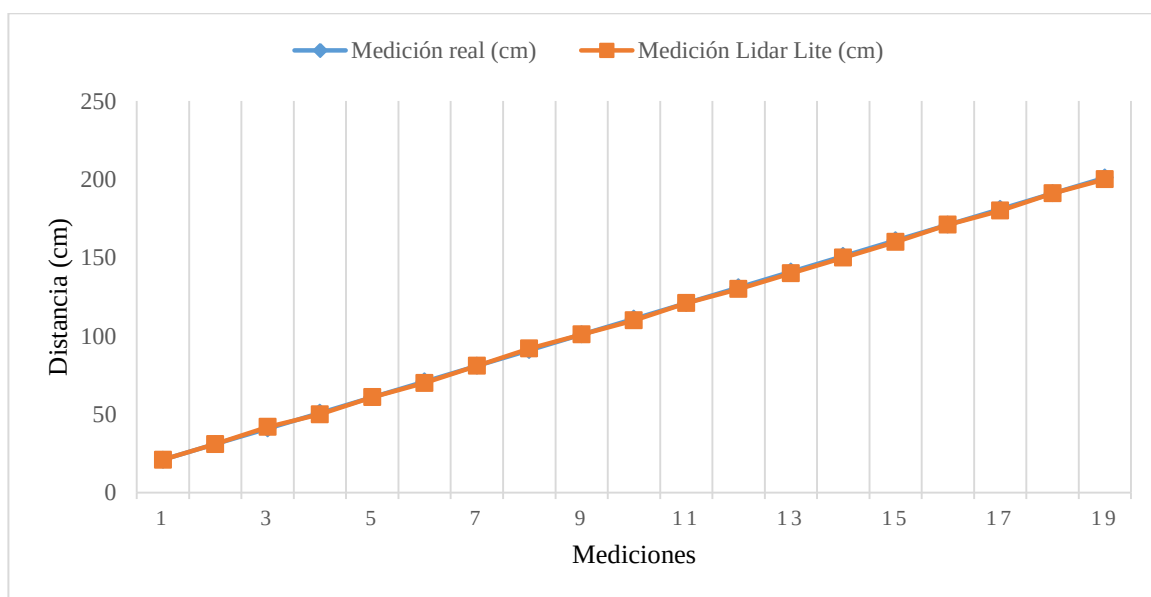


Figura 27 Calibración del sensor Lidar Lite V2

En el eje de las abscisas se coloca el número de mediciones consecutivas y en el eje de las ordenadas se muestran intervalos correspondientes a cm. Como se observa en la gráfica la línea correspondiente a las mediciones reales es muy similar a la línea recta formada por las mediciones del sensor, no existe una diferencia significativa entre valores obtenidos por el sensor en relación a los valores reales, de los datos obtenidos se puede mencionar que las distancias medidas tenían un error de ± 1 cm. También podemos mencionar que este comportamiento es constante para 15 metros y distancias mayores.

3.5.2 Pruebas realizadas al sensor GPS u-Blox Neo 6m

Se realizaron algunas pruebas al sensor GPS, con la finalidad de conocer sus niveles de sensibilidad y funcionamiento sometido a ciertas condiciones y variables externas.

Este sensor cuenta con un led indicador de recepción de señales satelitales a partir de las cuales proporciona una estimación para la posición geográfica, altitud, y zona horaria. Este led se enciende una vez que el GPS ha recibido señal de al menos 6 satélites, esto ocurre en un tiempo promedio de 30 a 40 segundos siempre y cuando la antena del sensor GPS se encuentra a cielo abierto. A partir de algunas pruebas se comprobó que el error de la estimación de la posición aumenta cuando las lecturas se hacen debajo de un techo o de árboles.

Otra prueba realizada a este sensor fue someterlo a una velocidad de avance de aproximadamente 2 m / s, sobre una trayectoria conocida (una línea recta), mientras se conectaba y se guardaban en una tarjeta SD lecturas de la posición geográfica en coordenadas (latitud y longitud).

Usando Google Earth se ubicaron los datos con marcas en los sitios correspondientes, la trayectoria formada por las coordenadas se muestra en la Figura 28.



Figura 28 Trayectoria formada por lecturas del sensor GPS u-Blox Neo 6m

De esta prueba se resuelven un par de incógnitas, la primera es que el sensor Neo u-Blox 6m es capaz de tomar lecturas mientras esta en movimiento es decir que resulta útil para aplicaciones dinámicas como lo es este proyecto. Y la segunda es que la trayectoria o ruta generada si se unen los puntos con una línea recta es muy similar a la trayectoria real conocida que como se menciona es una línea recta.

Otra prueba realizada a este sensor consistió en comparar los datos obtenidos del sensor GPS con datos obtenidos de una estación total Sokkia modelo SET63ORK3, Figura 29.



Figura 29 Estación total Sokkia

Esta prueba consistió en lo siguiente:

- a) Usando la estación total se tomaron lecturas de X y Y para 22 puntos en línea recta con una separación de 10 metros entre cada punto, es decir una línea recta de 220 metros.
- b) Se realizó un vuelo usando el dispositivo desarrollado sobre los puntos marcados en el terreno

A continuación se muestran la comparación de los resultados obtenidos de estas pruebas en las siguientes figuras: Figura 30 y Figura 31.

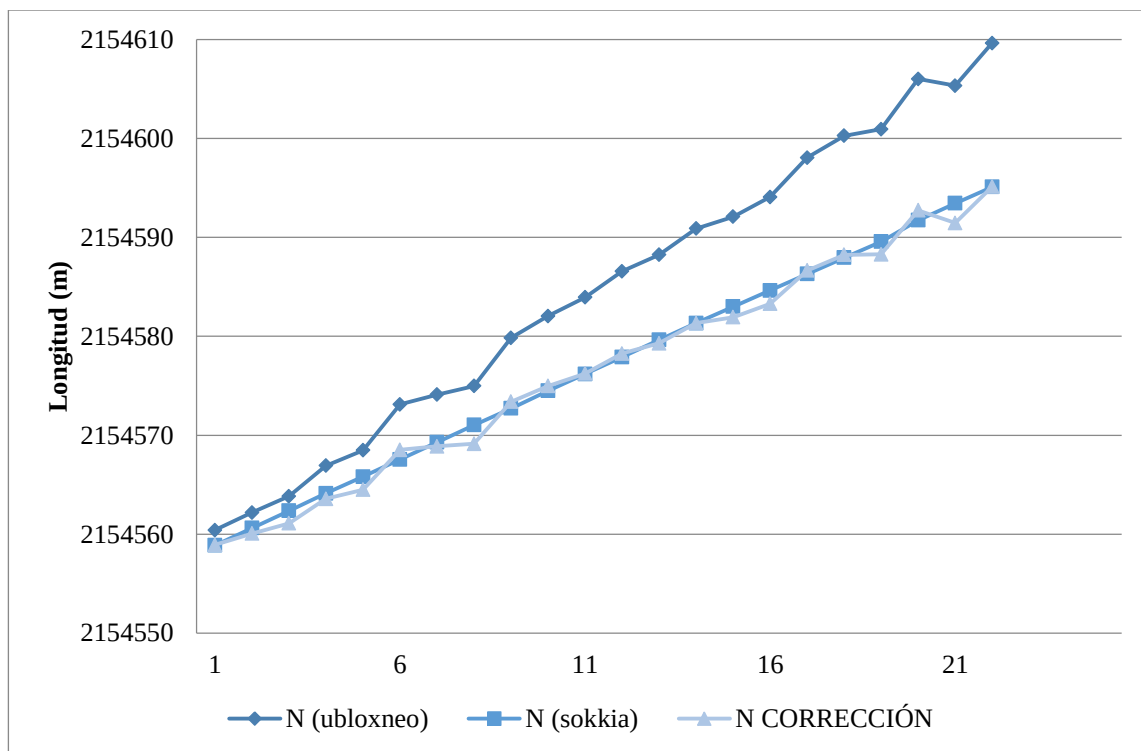


Figura 30 Grafica de comparación de Longitud

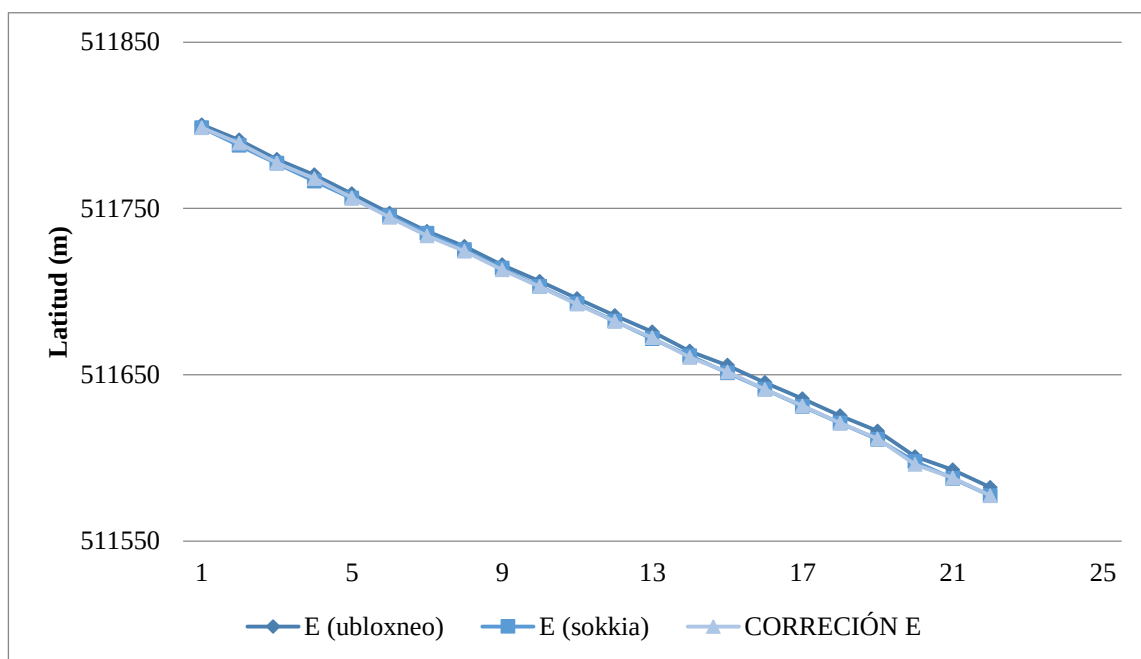


Figura 31 Grafica de comparación de Latitud

Como se puede observar en las gráficas anteriores existen tres líneas de tendencia, de igual forma para latitud como para longitud; la primera es la lectura del sensor GPS, la

segunda es la lectura de la estación total (es el patrón de comparación por su precisión), y la tercera se trata de una corrección realizada. Se observó que a medida que se alejaban del primer punto en las mediciones se incrementaba el error, esto es más evidente en la Figura 30, ya que el error es as notorio a medida que la distancia aumenta, ocurrió lo mismo para la Figura 31, solo que en menor cantidad.

Las variables denotadas como CORRECION E y CORRECION N se obtienen de la misma forma. En primer lugar se observa que las gráficas de sokkia y Ubloxneo pueden aproximar su comportamiento mediante rectas de la forma: Ecuación (3).

$$y = mx + b \quad (3)$$

A continuación se muestra la gráfica de tendencia de N (Sokkia) y la gráfica de tendencia de N (ubloxneo)

$$y_1 = 2.3393 x_1 + 2154558.08 \quad (4)$$

Dónde: $m_1 = 2.3393$

$$y_2 = 1.7202 x_2 + 2154557.1498 \quad (5)$$

Dónde: $m_2 = 1.7202$

Como se puede observar la pendiente de Ecuación (4) y Ecuación (5) no es la misma

$$m_1 \neq m_2 \quad (6)$$

Se observa que el error de N (ubloxneo) es creciente conforme aumenta la distancia, se emplea Ecuación (7), la cual corresponde a una interpolación lineal para determinar el error,

$$y_x = y_0 + \frac{x-x_0}{x_1-x_0}(y_1 - y_0) \quad (7)$$

Después de obtener y_x se procede a restar el error a las mediciones de N (ubloxneo), y de esta forma se obtiene la gráfica de CORRECIÓN N, y como se observa en las Figuras 30 y 31:

$$m_2 \approx m_3 \quad (8)$$

3.5.3 Calibración LIDAR Lite V2 y MPU6050

Otra prueba realizada en el dispositivo construido consistió en colocarlo sobre una superficie relativamente nivelada ($\alpha \approx 1^\circ, \beta \approx 1^\circ$ y $\gamma \approx 1^\circ$) y a una distancia conocida ($L=175.5$ cm), esto con el objetivo de verificar la estabilidad de las lecturas de ambos sensores, así como también analizar los datos con el uso de medidas de tendencia central, los resultados obtenidos se muestran a continuación, Figura 32.

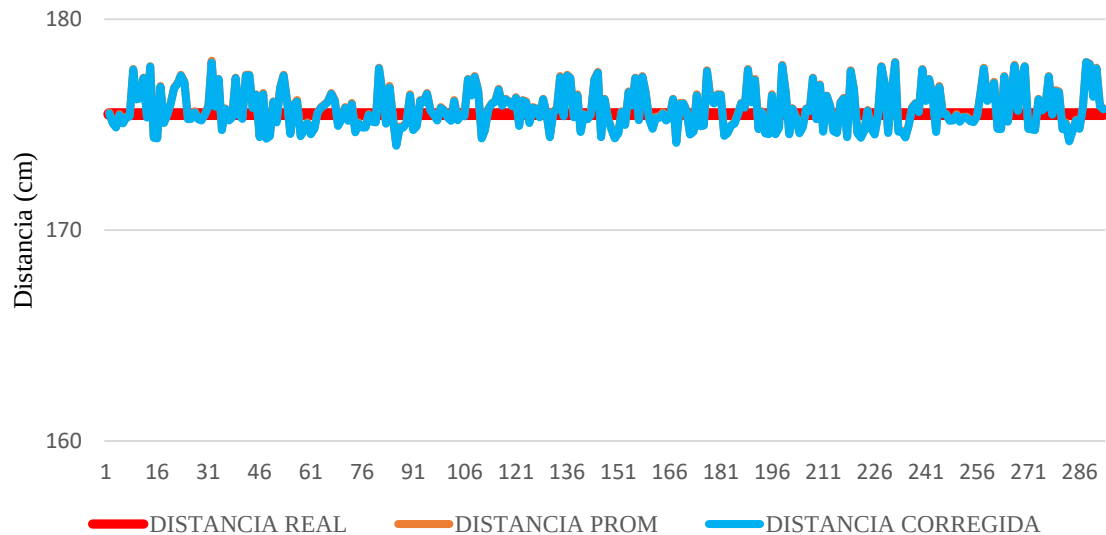


Figura 32 Calibración LIDAR+MPU6050

En el eje vertical se observa la distancia en cm, y en el eje horizontal la cantidad de mediciones realizadas, la línea roja denominada “DISTANCIA REAL” corresponde a la distancia conocida antes mencionada, la línea “DISTANCIA PROM” corresponde a los datos leídos directamente del sensor LIDAR, la línea denotada como “DISTANCIA CORREGIDA” corresponde a los datos de distancia corregidos mediante el ángulo obtenido del sensor MPU6050.

Nótese que debido a la inclinación muy pequeña que se tiene “DIST PROM” y “DISTANCIA CORREGIDA” coinciden.

Se observó una media de 175.7 cm, 2 mm por encima del valor real, y una desviación estándar de 0.94 cm.

3.6 Fase experimental

Una vez calibrados los sensores del sistema LIDAR se procede a la realización de la fase experimental la cual consistió en una prueba en campo sobre un terreno, usando el dispositivo desarrollado y usando la metodología tradicional empleada para trazar curvas de nivel (Nivel topográfico). Estos levantamientos serán empleados para obtener información sobre las cotas del terreno y realizar un mapa de curvas de nivel del terreno con ambos métodos. Se comparan ambos mapas entre si. en “El estadio Jose Palomo Ruiz Tapia”. Se realizó un plan de vuelo con el dispositivo LIDAR montado en el drone Phantom 3. Se utilizó la aplicación Pix4dCapture para realizar la planeación del vuelo.

3.6.1 Realización de un levantamiento topográfico usando el dispositivo desarrollado

Se realizó un levantamiento usando el dispositivo desarrollado en este proyecto en “El estadio José Palomo Ruiz Tapia” ubicado en UACH, Texcoco Estado de México. Se utilizó la aplicación Pix4dCapture para realizar la planeación del vuelo para el drone Phantom 3 encargado de aerotransportar el dispositivo, Figura 33.



Figura 33 Plan de vuelo

Se ejecutó el plan de vuelo (Figura 34), sobre la superficie antes mencionada para este experimento, los datos se almacenaron en la memoria SD del dispositivo para posteriormente ser procesados en tierra y obtener curvas de nivel.



Figura 34 Ejecución de plan de vuelo

3.6.2 Realización de un levantamiento topográfico mediante la metodología tradicional

Se realizó un levantamiento de altimetría utilizando un nivel topográfico modelo ZAL124, se realizó una cuadrícula de 10 m x12.5 m como se muestra en la siguiente imagen, Figura 35.



Figura 35 Cuadrícula realizada para el levantamiento de curvas de nivel

Se empleó una altura del aparato de 1.63 m para este levantamiento como se muestra en la Figura 36.



Figura 36 Levantamiento de curvas de nivel

Para los datos obtenidos de las curvas de nivel se utilizó una cota de 2000 m.

3.7 Procesamiento de datos obtenidos para trazar curvas de nivel del terreno con Surfer

A fin de visualizar y representar de una forma gráfica la superficie del terreno se emplea el software especializado en la creación de isolineas y modelos digitales de superficie, Surfer, Figura 37. Es una potente herramienta de interpolación la cual puede a crear mapas del terreno a partir de datos X, Y y Z.

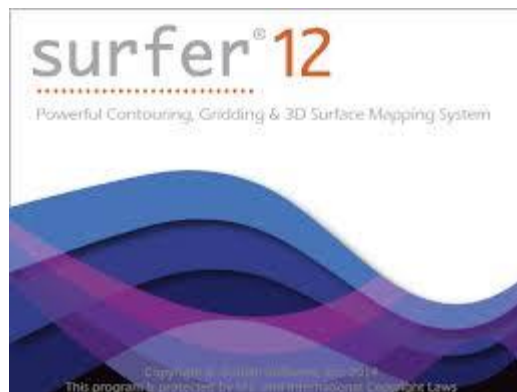
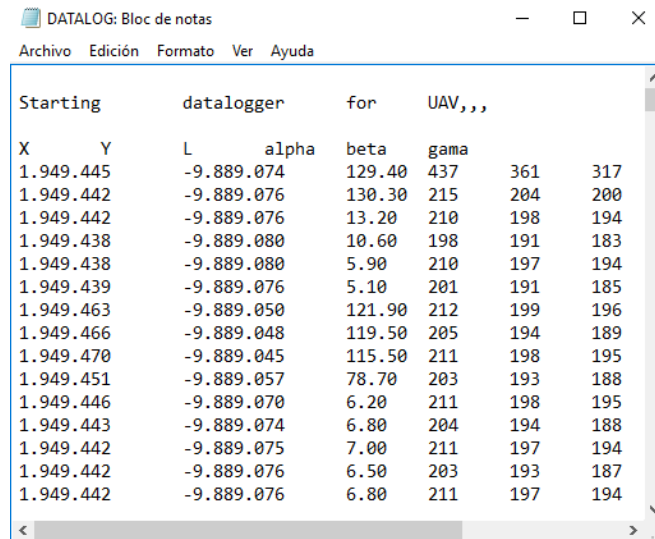


Figura 37 Surfer 12 (Fig. tomada de Directions Magazines, 2016)

Los datos recopilados en ambos levantamientos antes mencionados son procesados en Surfer12 para obtener mapas de curvas de nivel y Modelos Digitales de Elevación. En el caso del levantamiento realizado con la metodología tradicional los datos se registraron

en una libreta de campo, y para el caso del levantamiento realizado con el dispositivo desarrollado se almacenaron en un archivo .txt (Figura 38), en columnas como se muestra en la siguiente imagen. Las 3 últimas columnas denotadas como alpha, beta y gama, corresponden a los valores de las aceleraciones para pitch, roll y yaw del dispositivo dados en g. Una vez en Excel se aplican las formulas mencionadas para calcular la distancia ortogonal al terreno.



Starting		datalogger		for		UAV,,,	
X	Y	L	alpha	beta	gama		
1.949.445		-9.889.074		129.40	437	361	317
1.949.442		-9.889.076		130.30	215	204	200
1.949.442		-9.889.076		13.20	210	198	194
1.949.438		-9.889.080		10.60	198	191	183
1.949.438		-9.889.080		5.90	210	197	194
1.949.439		-9.889.076		5.10	201	191	185
1.949.463		-9.889.050		121.90	212	199	196
1.949.466		-9.889.048		119.50	205	194	189
1.949.470		-9.889.045		115.50	211	198	195
1.949.451		-9.889.057		78.70	203	193	188
1.949.446		-9.889.070		6.20	211	198	195
1.949.443		-9.889.074		6.80	204	194	188
1.949.442		-9.889.075		7.00	211	197	194
1.949.442		-9.889.076		6.50	203	193	187
1.949.442		-9.889.076		6.80	211	197	194

Figura 38 Datalogger.txt

Los datos posteriormente son enviados a Excel para ser ordenados y preprocesados para después pasar a Surfer y obtener curvas de nivel y MDE. Posteriormente los datos se agrupan en únicamente tres columnas correspondientes a X, Y y Z listos para ser interpolados con Surfer. Y a continuación se muestran los mapas obtenidos con ambos casos y se discute acerca de los resultados obtenidos.

CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De los datos obtenidos del levantamiento tradicional se elabora un mapa de curvas de nivel que se muestra a continuación en la Figura 39, se utilizó el método de interpolación de Kriging, se muestran curvas de nivel cada 2 cm, en el mapa. Se observa que la curva de nivel mínima que se genera tiene una cota de 1999.96m y la cota máxima que el programa muestra es 2000.44 m.

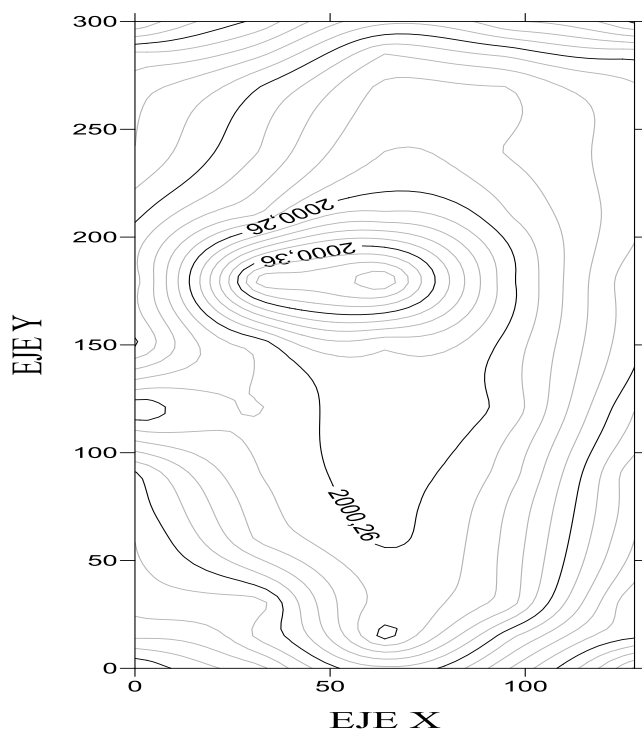


Figura 39 Mapa de curvas de nivel A

De igual forma se construye el Modelo Digital de Elevaciones del terreno y se muestra a continuación como complemento de este trabajo, Figura 40. Las cotas obtenidas con la metodología tradicional servirán como patrón de comparación.

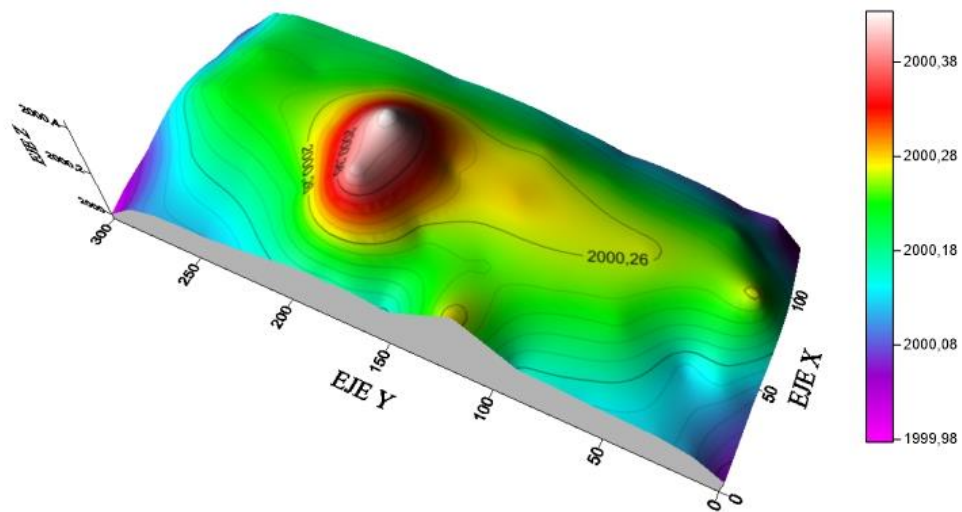


Figura 40 Modelo Digital de Elevaciones A

A continuación se muestra el mapa de curvas de nivel realizado con el sistema LIDAR en el mismo terreno de estudio, (Figura 41). Las curvas de nivel se muestran cada 1 cm en este caso, la curva nivel más pequeña generada tiene una cota de 1999.98 m y la curva de cota mayor es de 2000.15 m.

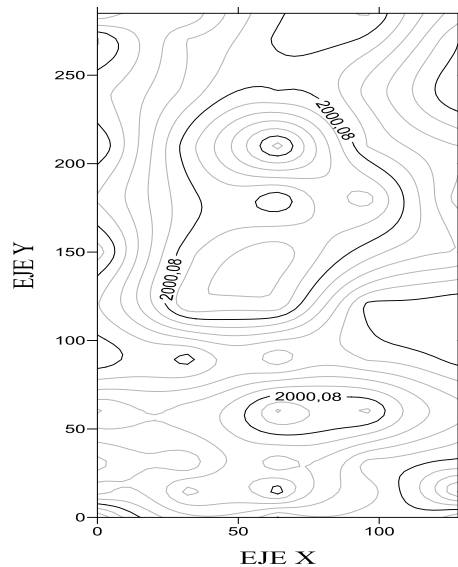


Figura 41 Mapa de curvas de nivel B

De igual manera se genera un Modelo Digital de Elevaciones para estos datos obtenidos a partir del levantamiento utilizando el Dispositivo LIDAR, Figura 42.

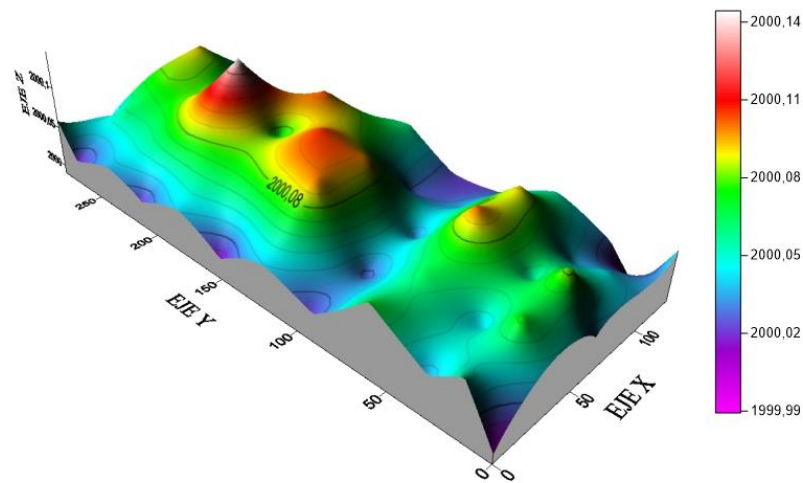


Figura 42 Modelo Digital de Elevaciones B

En base a los datos, mapas y modelos obtenidos se observa que no coinciden entre sí. Los patrones presentados en las curvas de nivel de ambos levantamientos difieren entre si demasiado, y esto se observa incluso desde que los datos se empiezan a ordenar para ser procesados, como se mencionó la cota más baja para el mapa A es 1999.96 m mientras que en el mapa B es 1999.98 m y la más alta para A es 2000.44 m mientras que para B es 2000.18 m. El intervalo en el que se encuentran las cotas en el mapa A es más grande que el intervalo de cotas de B y por ende tampoco coinciden las representaciones de nuestros Modelos Digitales de Elevaciones.

A fin de investigar las causas de los resultados obtenidos en las pruebas anteriores se realiza un levantamiento sobrevolando a lo largo de una línea de puntos en una superficie con pendiente cero.

Teóricamente el resultado tendría que ser un perfil de suelo con una pendiente muy cercana al 0%. En la Figura 43 se muestra los resultados de esta prueba.

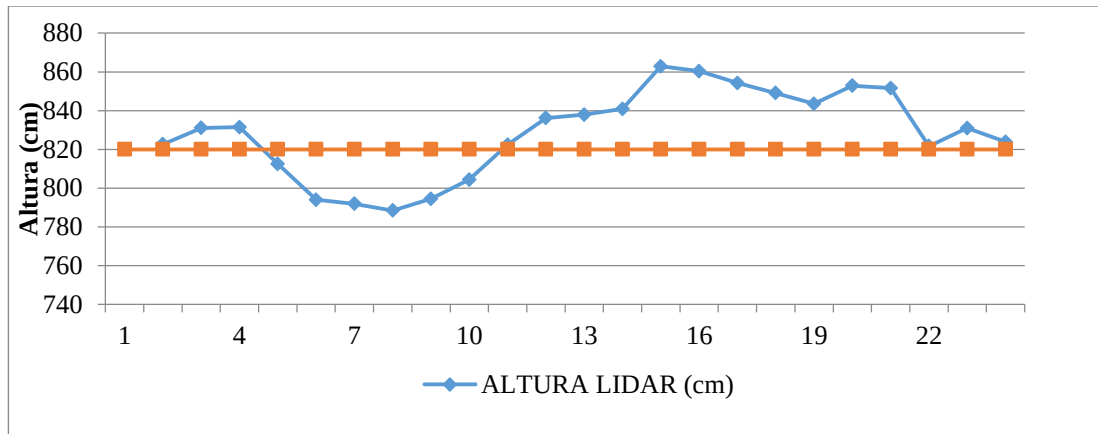


Figura 43 Levantamiento en superficie con $p = 0\%$

El vuelo fue realizado a una altura de 8.20 metros sobre la superficie, como se muestra en la gráfica anterior existe una variación en el eje Z, como se mencionó anteriormente es imposible que una aeronave pueda volar de forma estable y además nivelada en el espacio. El dispositivo es de tipo strapdown, es decir que esta fijo en el VANT, lo cual implica que el dispositivo también es afectado por los movimientos que realiza el aeronave durante su trayectoria.

Se realizó una prueba más con el objeto de precisar la información. Esta prueba consistió en colocar una cuerda tensada, nivelada y a una altura conocida sobre una superficie con cotas irregulares, (Figura 44). En primer lugar se obtuvo un perfil de suelo usando nivel topográfico, y se realizaron lecturas de distancias con el dispositivo desarrollado colocado en la cuerda tensada.



Figura 44 Prueba realizada en cuerda tensada

En la siguiente grafica (Figura 45), se muestran los resultados de las lecturas obtenidas con el nivel, comparadas con las lecturas del dispositivo.

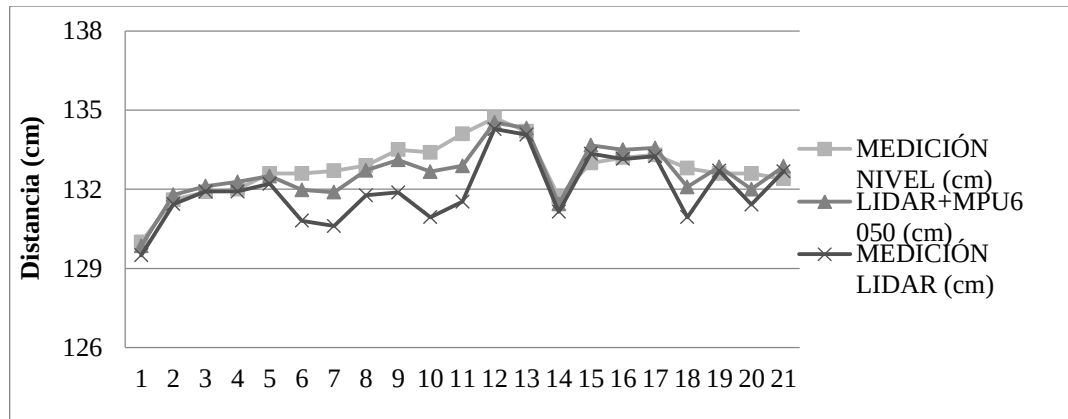


Figura 45 Grafica de comparación entre cotas

En esta figura se realiza una comparación entre tres gráficas, se toma como patrón de comparación la gráfica de MEDICION NIVEL, y esta grafica describe las cotas del perfil de suelo que está debajo del cable tensado. Se puede observar que las mediciones tienen la misma tendencia en torno a las obtenidas con el nivel. La grafica denotada como MEDICION LIDAR se observa que se encuentra por debajo de las demás gráficas, esto se debe a que solo se trata de lecturas directamente del láser, mas sin embargo conserva el mismo comportamiento que la gráfica de MEDICION NIVEL. El caso de la gráfica LIDAR+MPU6050 es la que además de tomar la lectura del láser realiza una corrección en base a la inclinación en pitch y roll, se observa que se acerca más a la gráfica de MEDICION NIVEL.

CONCLUSIONES

Se construyó el dispositivo para trazar curvas de nivel, ligero (130 gramos), para acoplarse a un VANT, mediante la implementación e instrumentación de sensores. Consta de una placa Arduino, un módulo SD, un sensor laser, sensor acelerómetro y un sensor GPS. Se construyó el dispositivo basado en una plataforma de hardware y software libre, con el uso de diversas librerías, así como la programación en el lenguaje Arduino. Se realizó la calibración de los sensores que componen al dispositivo, cada uno de ellos de forma independiente comparando sus mediciones con valores reales, a fin de obtener lecturas confiables.

El dispositivo fue instalado en el VANT para la adquisición de datos y se obtuvo una configuración de los componentes integrados con un peso reducido (gramos), que puede acoplarse incluso en los llamados mini-UAV sin problema.

El dispositivo desarrollado es capaz de obtener a través de los sensores incorporados, las variables (X, Y y Z): Longitud (X), Latitud (Y) y Altitud (Z), necesarias para hacer un mapa de curvas de nivel y un MDE. Los datos extraídos de la SD del sistema LIDAR, se exportaron y procesaron con el programa Surfer para obtener una representación digitalizada del terreno estudiado.

Se elaboraron mapas de curvas de nivel con los datos obtenidos a partir de las lecturas obtenidas del sistema desarrollado. Se elaboraron Modelos Digitales de Elevaciones (MDE), utilizando los datos obtenidos a partir de las lecturas realizadas con el dispositivo desarrollado

El dispositivo desarrollado es útil para obtener curvas de nivel con las precisiones mencionadas anteriormente, el resultado de los mapas y modelos se ve afectado por el tipo de VANT utilizado y la precisión mencionada de los sensores utilizados. Esto da como resultado que los mapas y modelos no se validen entre ellos, sin embargo del experimento realizado con la cuerda se puede afirmar que el dispositivo es funcional.

RECOMENDACIONES

En un trabajo tan ambicioso como es este en el que se busca la mejora continua, se recomienda la utilización de un VANT de uso industrial, ya que en este caso se utilizó una aeronave la cual es una plataforma mayormente dedicada a la obtención de fotografías, es decir que no es un drone de carga. Durante las pruebas se observó una notable disminución en el tiempo de vuelo debido al peso extra montado en el VANT.

Se recomienda realizar más pruebas con estación total para evaluar si la ecuación que se menciona en el apartado de pruebas realizadas al sensor GPS continua siendo válida para otros casos, ya que como se mencionó la prueba realizada fue en una línea recta, debido que al construir una cuadrícula para hacer curvas de nivel es lo que básicamente se requiere.

Se recomienda realizar un algoritmo de predicción o estimación de posición del vehículo que porta el sistema LIDAR. Esto con el fin de fusionar esta información con los datos recopilados por el sistema LIDAR y poder generar MDEs con mayor cantidad de información y por consecuencia con mayor precisión.

BIBLIOGRAFÍA

- Ackerman, S., Holz, R., & Frey, R. (2008). Cloud Detection with MODIS, part II: Validation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1073-1086.
- AJaakkola, A., Hyypä, J., Kukko, A., Yu, X., Kaartinen, H., Lethomäki, M., & Lin, Y. (2015). A low-cost multi-sensoral mobile mapping system and its feasibility for three measurements. *ISPRS J. Photogrammetry Remote Sensing*, 514-522.
- Arellano, A. (05 de Septiembre de 2015). *Erosion en México*. Recuperado el 2016 de Abril de 27, de Erosión en México:
<http://es.slideshare.net/arizarellano370/erosion-en-mxico>
- Beasy, C. (05 de Abril de 2016). *Mapas Topográficos de LiDAR*. Recuperado el 05 de Abril de 2016, de Mapas Topográficos de LiDAR::
http://www.eaglemapping.com/_white_papers/ESP%20Lidar%20white%20paper%20Mar08.pdf
- Cabrera, C. A. (25 de Julio de 2015). *Coservación de suelo y agua*. Obtenido de Coservación de suelo y agua: <https://prezi.com/q8lr1s1dkzrm/copy-of-surcos-al-contorno-curvas-de-nivel-a-surcado-de-contorno/>
- Cardona, M. A. (27 de julio de 2015). *Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios*. Obtenido de Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios:
<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/impactos/mexicon/R-0025.pdf>

- Duan, H., & Li, P. (2014). Bio-inspired Computation in Unmanned Aerial Vehicles. En H. Duan, & P. Li, *Bio-inspired Computation in Unmanned Aerial Vehicles* (págs. 1-13). Berlin: Springer.
- Duan, H., & Li, P. (2014). Bio-inspired Computation in Unmanned Aerial Vehicles. En H. Duan, & P. Li, *Bio-inspired Computation in Unmanned Aerial Vehicle* (págs. 1-13). Berlin: Springer.
- Guth, P. L. (2016). Digital Elevation Models to Support Desert Warfare. *Springer Science+ Bussines New York*, 259-272.
- Jiazhi, J., Guoqing, Z., Xhinchén, Y., & Wei, S. (2011). Design and implementation of power supply high power diode laser of LIDAR onboard UAV. *Simulation and Vision*.
- Jiazhi, J., Guoqing, Z., Xhinchén, Y., & Wei, S. (2011). Design and implementation of power supply high power diode laser of LIDAR onboard UAV. *Simulation and Vision*.
- Méndez Robles, R. (24 de DICIEMBRE de 2015). *NACIONALES MVS*. Recuperado el 23 de MARZO de 2016, de NACIONALES MVS:
<http://www.noticiasmvs.com/#!/noticias/el-45-del-suelo-en-mexico-presenta-erosion-o-degradacion-unam-118>
- Moreno Baños, I., Ruiz García, A., Marturria i Alavedra, J., Oller i Figueras, P., Piña Iglesias, J., Martínez i Figueras, P., & Talaya López, J. (2011). Assessment of airborne LIDAR for snowpack depth modeling. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 95-107.
- Moyano, S. (2014). *Diseño y construcción de un Quadcopter*. España.
- Moyano, S. (2014). *Diseño y construcción de un Quadcopter*. España.
- Oldeman, L. (1998). *Soil degradation: A Threat to Food Security?* Netherlands: International Soil Reference and Information Centre.

- Perez Nieto, S. (1995). Topografía Aplicada. En S. Perez Nieto, *Topografía Aplicada* (págs. 155-163). México: UCh.
- Posgraduados, C. d. (Enero de 2016). Topografía aplicada a obras COUSSA. México, Estado de México, México.
- Ramos, V. (2014). *Diseño e implementacion de un Quadcopter basado en microcontrolador Arduino*. Valencia.
- ROBOLOGS. (14 de Octubre de 2014). *Tutorial de Arduino y MPU-6050*. Recuperado el 3 de Mayo de 2016, de Tutorial de Arduino y MPU-6050: <http://robologs.net/2014/10/15/tutorial-de-arduino-y-mpu-6050/>
- Rodriguez Rico, O. O. (2009). *Lidar Vs. Fotogrametria en la Obtención de Modelos Digitales de Elevaciones par Estudios Hidrologicos*. España.
- SAGARPA. (5 de Noviembre de 2015). *Surcado al contorno*. Obtenido de Surcado al contorno: <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasCOUSSA/12%20Surcado%20al%20contorno.pdf>
- Sanchez Garcia, J. (2012). Sistema LIDAR integrado en un UAV para la generación de Modelos Digitales del Terreno. En J. Sanchez Garcia, *Sistema LIDAR integrado en un UAV para la generación de Modelos Digitales del Terren*. Sevilla.
- Sanchez Lopera, J., & Lerma Garcia, J. (2012). Actualización de la cartografía catastral urbana mediante LIDAR y SIG. *revista Internacional de Ciencia y Tecnologia de la Informacion Geografica*, 53-70.
- SEMARNATa, & UCh. (2003). *Evaluación de la Perdida de Suelos por Erosión hidrica y Eolica en la Republica Mexicana*. México.
- SEMARNATb, & C.P. (2003). *Evaluación de la Degradación del Suelo Causada por el Hombre en la Republica Mexicana*. México.

- SEMARNATc. (2008). Informe de la Situación del Medio Ambiente en Mexico. En SEMARNAT, *Informe de la Situación del Medio Ambiente en Mexico* (págs. 120-152). México.
- Wang, J. (2015). Integrating BIM and LIDAR for real-time construction quality control. *Springer*, 417-432.
- Yang, B., & Chin, C. (2015). Automatic registration of UAV-borne sequent images and LIDAR data. *ELSEVIER*, 262-275.
- Yepéz, F. D. (2014). Mapeo del arbolado urbano con LIDAR aereo. *Revista Mexicana Ciencias Forestales*, 58-75.

ANEXO A: Código del Sistema LIDAR

//ESTE PROGRAMA FUE REALIZADO DE LA RECOPIACION DE VARIAS
LIBRERIAS

//Y PROGRAMAS, EL OBJETIVO ES REALIZAR UN DATTALOGGER DE
VARIABLES PARA

//HACER UN LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO A TRAVES DE UN SISTEMA
LIDAR/////

#include <SoftwareSerial.h>

#include <TinyGPS.h>

#include <Wire.h>

#include <SPI.h>

#include <SD.h>

#include <LIDARLite.h>

#include "I2Cdev.h"

#include "MPU6050.h"

#include "Wire.h"

////////////////// VARIABLES GLOBALES PARA MPU6050//////////////////

MPU6050 accelgyro;

int16_t ax, ay, az, gx, gy, gz;

```

//double timeStep, time, timePrev;

double arx, ary, arz;

double gyroScale = 131;

////////// Variables para SD y definicion de chip select//////////

File dataFile;

const int chipSelect = 4;

////////// Definicion de pines para transmision de GPS//////////

SoftwareSerial mySerial(8, 9); // RX, TX

TinyGPS gps;

void gpstdump(TinyGPS &gps);

void printFloat(double f, int digits = 2);

////////// DEFINICION DE VARIABLES USADAS CON LIDAR LITE V2//////

int distancia, O=10, K=0, sumdist=0, distprom=0;

LIDARLite myLidarLite;

void setup()

{

    //////////DEFINICION DE PUERTO PARA EL LED INDICADOR DE TARJETA
    SD//////////

    pinMode(3, OUTPUT);

    digitalWrite (3, LOW);

    Wire.begin();

    //////////// INICIO DE COMUNICACIÓN DEL PUERTO SERIAL ////////////

    Serial.begin(9600);

```

```

/////////////////INICIO DE MPU6050/////////////////

accelgyro.initialize();

// set the data rate for the SoftwareSerial port

mySerial.begin(9600);

///////////////// INICIO DE VARIABLES LIDAR LITE V2/////////////////

myLidarLite.begin();

/////////////////MENSAJE DE MNITOR SERIAL INICIO DE GPS/////////////////

Serial.println("uBlox Neo 6M");

/////////////////MENSAJE DE INICIO DE SD CARD/////////////////

Serial.print("Iniciando SD card...");

if (!SD.begin(chipSelect)) {

Serial.println("La tarjeta falla, o no esta presente,,,,");

return;

}

Serial.println("Tarjeta SD iniciada");

Serial.println();

///////////////// ENCABEZADO DE ARCHIVO .TXT/////////////////

File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);

dataFile.println("Starting datalogger for UAV,,, ");

dataFile.println();

dataFile.println("X Y I ax ay az");

dataFile.close();

```

```

    delay(200);
}

void loop() // run over and over
{
    bool newdata = false;

    unsigned long start = millis();
    while (millis() - start < 1000) {
        if (mySerial.available()) {
            char c = mySerial.read();

            // Serial.print(c); // uncomment to see raw GPS data

            if (gps.encode(c)) {
                newdata = true;

                // break; // uncomment to print new data immediately!
            }
        }
    }

    if (newdata) {
        digitalWrite(3, LOW); // LED INDICADOR DE SD

        gpsdump(gps);

        digitalWrite(3, HIGH);

        Serial.println();
    }
}

```



```

void gpsdump(TinyGPS &gps)
{
    ///////////////////////////////////////////////////DEFINICION DE VARIABLES PARA MEDICIONES DE X,Y e
    Z/////////////////////////////////////////////////

    long lat, lon;

    float flat, flon, totalat =0, totalon=0,latprom, lonprom;

    unsigned long age, date, time, chars;

    unsigned short sentences, failed;

    int i=0, n=10, m=10, j=0, o=2, dist, a=0, b=10;

    int sumdist=0;

    ///////////////////////////////////MEDICION DE X,Y (GPS)/////////////////////////////////

    gps.get_position(&lat, &lon, &age);

    Serial.print("Lat/Long(10^-5 deg): "); Serial.print(lat);

    Serial.print(", "); Serial.println(lon);

    // Serial.print(" Fix age: "); Serial.print(age); Serial.println("ms.");

    // On Arduino, GPS characters may be lost during lengthy Serial.print()

    // On Teensy, Serial prints to USB, which has large output buffering and

    // runs very fast, so it's not necessary to worry about missing 4800

    // baud GPS characters.

    for(i=0; i <n; i++){

        gps.f_get_position(&flat, &flon, &age);

        totalat = totalat + flat,5;

        totalon=totalon+flon,5;
    }
}

```

```

}

latprom=totalat/n;

lonprom=totalon/m;

Serial.print("Lat/Long(float): ");

Serial.print(latprom,5); Serial.print(", ");

Serial.print(lonprom,5);Serial.println();

//Serial.print(" Fix age: "); Serial.print(age); Serial.println("ms.");

//////////lectura de altura de referencia/////

//for(a=0; a <b; a++){

// alt=gps.f_altitude();

//totalalt=totalalt+alt;

//}

//altprom=totalalt/b;

//Serial.print("Altitud=");Serial.println(altprom);

/////////////////////////////////MEDICIÓN DE Z (LIDAR LITE V2)/////////////////////////////////

Serial.print("Dato Lidar= ");

Serial.println(myLidarLite.distance());

for(K=0; K <O; K++){

distancia= ((myLidarLite.distance())-8);

sumdist+=distancia;

//Serial.println(sumdist);

}

distprom=(sumdist/K);

```

```

Serial.print("Distancia= ");

Serial.println(distprom);

File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);

dataFile.print(latprom,5);dataFile.print(" ");

dataFile.print(lonprom,5); dataFile.print(" ");

dataFile.print(distprom);

//////////////////MPU6050 LECTURA//////////////////

// collect readings

accelgyro.getMotion6(&ax, &ay, &az, &gx, &gy, &gz);

// calculate accelerometer angles

// arx = (180/3.141592) * atan(ax / sqrt(square(ay) + square(az)));

// ary = (180/3.141592) * atan(ay / sqrt(square(ax) + square(az)));

// arz = (180/3.141592) * atan(sqrt(square(ay) + square(ax)) / az);

// // print result

Serial.print(ax); Serial.print("\t");

Serial.print(ay); Serial.print("\t");

Serial.print(az); Serial.print("\t\t");

//Serial.print(arx); Serial.print("\t");

//Serial.print(ary); Serial.print("\t");

//Serial.print(arz); Serial.println("\t\t");

delay(300);

////////////////// ESCRITURA EN EL ARCHIVO .TXT ////////////////////

```

```

dataFile.print(" ");dataFile.print(ax);dataFile.print("
");dataFile.print(ay);dataFile.print(" ");dataFile.print(az);

dataFile.println();

dataFile.close();

delay(500);

}

void printFloat(double number, int digits)
{
    // Handle negative numbers
    if (number < 0.0) {
        Serial.print('-');
        number = -number;
    }

    // Round correctly so that print(1.999, 2) prints as "2.00"
    double rounding = 0.5;
    for (uint8_t i=0; i<digits; ++i)
        rounding /= 10.0;

    number += rounding;

    // Extract the integer part of the number and print it
    unsigned long int_part = (unsigned long)number;
    double remainder = number - (double)int_part;
    Serial.print(int_part);

    // Print the decimal point, but only if there are digits beyond

```

```
if (digits > 0)

    Serial.print(".");

// Extract digits from the remainder one at a time
while (digits-- > 0) {

    remainder *= 10.0;

    int toPrint = int(remainder);

    Serial.print(toPrint);

    remainder -= toPrint;

}

}
```