

## **Módulo experimental de carga útil “SADM-1” para fines de exploración atmosférica**

**Mario Alberto Mendoza Bárcenas**

Centro de Desarrollo Aeroespacial, Instituto Politécnico Nacional  
Belisario Domínguez 22, Centro Histórico, Ciudad de México, México  
mmendozab@ipn.mx

**Rafael Prieto Meléndez**

Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, UNAM  
Circuito exterior s/n, Ciudad Universitaria, México  
rafael.prieto@ccadet.unam.mx

**Lauro Santiago Cruz<sup>1</sup>, Frederic Trillaud<sup>2</sup>**

Instituto de Ingeniería, UNAM  
Circuito exterior s/n, Ciudad Universitaria, México  
<sup>1</sup>lsc@pumas.iingen.unam.mx, <sup>2</sup>frillaudp@ii.unam.mx

**Alejandro Espinosa Calderón**

Centro Regional de Optimización y Desarrollo de Equipo de Celaya, TecNM  
Diego Arenas Guzmán 901, Fracc. Zona de Oro 1, Celaya, Gto.

**Miguel Herraiz Sarachaga**

Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid  
Ciudad Universitaria s/n 28040, Madrid, España  
mherraiz@fis.ucm.es

**Fernando Velázquez Villegas**

Facultad de Ingeniería, UNAM  
Circuito exterior s/n, Ciudad Universitaria, México  
fernvel2@gmail.com

### **RESUMEN**

Actualmente el desarrollo de misiones suborbitales para altitudes estratosféricas, con fines de validación tecnológica e investigación científica, se han comenzado a consolidar como un importante nicho de oportunidades para la validación de sistemas electrónicos en ambiente de espacio cercano, previo a su transferencia hacia modelos de vuelo orbital. Dichas plataformas suborbitales, con arquitectura similar a la de un satélite real (plataforma y carga útil), permiten la verificación operativa de diversas aplicaciones científicas y tecnológicas, guardando un atractivo balance costo-beneficio, adicionando la gran ventaja de su recuperación, luego de cada vuelo.

El SADM-1 (Sistema de Adquisición de Datos Meteorológicos, versión 1) es un módulo de carga útil para su aplicación en misiones suborbitales con fines de investigación científica y demostración tecnológica nacional. A finales de 2016, a bordo de la plataforma suborbital CSM (Carga de Servicio Mexicana), se adquirieron datos de algunas variables físicas en la estratósfera, tales como: temperaturas (interior de la estructura de la sonda, tarjetas electrónicas, y del aire al exterior); campo magnético; variables de navegación inercial, tales como aceleración y velocidad angular. Adicionalmente se incluyó en la

instrumentación una cámara fotográfica. Dichas mediciones, en la primera etapa del proyecto, permitirán la evaluación de factibilidad (técnica y conceptual) en el desarrollo de un esquema de instrumentación electrónica, integrada a partir de elementos de grado comercial (COTS: Commercial Off The Shelf) operando en condiciones ambientales de baja temperatura y baja presión. Estas pruebas servirán para el futuro desarrollo de un módulo de carga útil, el cual será integrado a una plataforma espacial, con fines de investigación sobre perturbaciones atmosféricas.

**PALABRAS CLAVE:** Vuelo suborbital, globo estratosférico, datos meteorológicos, instrumentación aeroespacial, COTS.

## 1 INTRODUCCIÓN

Antes de la llegada de Wernher Von Braun a los Estados Unidos para desarrollar el primer cohete para el programa espacial Apolo, los científicos utilizaban globos de gran altitud para realizar sus investigaciones sobre el ambiente espacial. Dichos vuelos también fueron utilizados para estudiar los efectos del espacio sobre el cuerpo humano y desarrollar métodos para mitigar problemas relacionados, algunos de esos métodos serían después adoptados por la NASA para sus misiones tripuladas.

El papel de los vuelos estratosféricos en globo ha sido tan importante, que previo al lanzamiento de los primeros satélites, los científicos utilizaban globos para obtener datos acerca de ciertos fenómenos de la tierra. En 1967, por ejemplo, la misión estratosférica GHOST (Global Horizontal Sounding Technique, por sus siglas en inglés), fue lanzada desde Nueva Zelanda. Dicha misión permaneció en vuelo por un año, circundando el hemisferio sur 25 veces. A bordo de dicha misión, se encontraba instalado un módulo electrónico que transmitió una señal de radio con objeto de darle seguimiento a la trayectoria del globo, así como obtener datos para pronóstico climatológico global [1].

Adicionalmente a las aplicaciones meteorológicas, en los últimos años se ha incrementado el uso de plataformas suborbitales para el desarrollo de diversos experimentos. Algunas de ellas, lanzadas por usuarios amateurs, las cuales llevan a bordo equipos básicos consistentes principalmente en teléfonos inteligentes, así como cámaras y videocámaras, para la captura de imágenes del espacio cercano. Algunas otras misiones llevan a bordo cargas útiles científicas más complejas, cuyas iniciativas pertenecen a centros de investigación y empresas de desarrollo tecnológico. A modo de presentar un panorama general de algunas de las misiones que se han realizado en algunas partes del mundo, en la tabla 1 se muestra una breve revisión de algunas de ellas, versión extendida de la presentada en [2].

**Tabla 1.** Revisión de algunas misiones suborbitales

Grupo/institución de desarrollo	Lugar de lanzamiento	Año	Altitud (km)	Tiempo de vida de la misión	Masa de la carga útil (kg)	Costo (euros)	Experimentos en la carga útil
R. Harrison	West Yorkshire	2008	35	3 h	0.54	600	Canon Ixus 400
MIT	Boston	2009	28.5	--	0.8	110	Canon A470
L. Geissbuhler	Nueva York	2010	30.5	1 h 42 m	--	--	iPhone4
Google	Berkeley	2010	32	2h 40m	--	--	Nexus S
Estudiantes amateur canadienses	Toronto	2012	24	1h 37m	--	290	Modelo LEGO y cámara

Northwestern University	Chicago	2013	29.5	1h 56m	--	--	Celdas solares y cámara
Polito/OATO/ALTEC	Levaldigi, Italia	2013	29.4	2h 52m	1.47	3000	GoPro, Samsung III mini
Instituto Politécnico Nacional- Universidad Nacional Autónoma de México- Complutense de Madrid- REMTRONIC	León, Guanajuato, México	2016	34.4	2h 19m	1.9	4500	SADM-1, cámara SJ4000

Es importante destacar que en los últimos años, el aprovechamiento de las misiones suborbitales por grupos académicos, tanto en países que cuentan con programas bien establecidos de desarrollo espacial, como aquellos en los cuales se inician y que pretenden incursionar en el desarrollo tecnológico dentro del campo aeroespacial, ha ido en aumento, principalmente impulsado por las grandes ventajas que representan: bajo costo (respecto a una misión espacial), recuperabilidad y reutilización del hardware. Dichas características permiten a los desarrolladores la oportunidad de que, con un presupuesto razonablemente alcanzable, puedan no sólo validar su instrumentación en ambiente de espacio cercano, sino también adquirir la experiencia logística, para el futuro desarrollo de misiones espaciales de mayor complejidad.

En México, desde su creación por decreto en 2010, la Agencia Espacial Mexicana, dio un reimpulso en el desarrollo espacial en nuestro país. Aunque si bien, con un atraso considerable en el campo, respecto a otros países, el uso de plataformas suborbitales representa una opción estratégicamente importante para poder llevar a México al camino del desarrollo espacial internacional.

Si bien, existen algunos grupos académicos nacionales que realizan importantes esfuerzos en el campo del desarrollo de plataformas suborbitales como demostradores tecnológicos y vehículos de validación experimental, aún dichos esfuerzos requieren un mayor trabajo para demostrar efectivamente el verdadero aprovechamiento de este medio de validación tecnológico.

El sistema de adquisición SADM-1 (Sistema de Adquisición de Datos Meteorológicos versión 1) que se describe en este artículo, formó parte de la instrumentación “cliente” que fue alojada dentro de la estructura de la plataforma CSM (Carga de Servicio Mexicana), para una prueba de validación mediante un vuelo a la estratósfera. Mediante dicha experiencia, además de poder validar experimentalmente los componentes comerciales que se utilizaron para la integración de dicho instrumento, se validó el carácter multimisión de la plataforma CSM, proveyendo además de experiencia logística en la integración de las diferentes disciplinas asociadas: diseño mecánico, manufactura, diseño térmico, instrumentación, comunicaciones, etc.

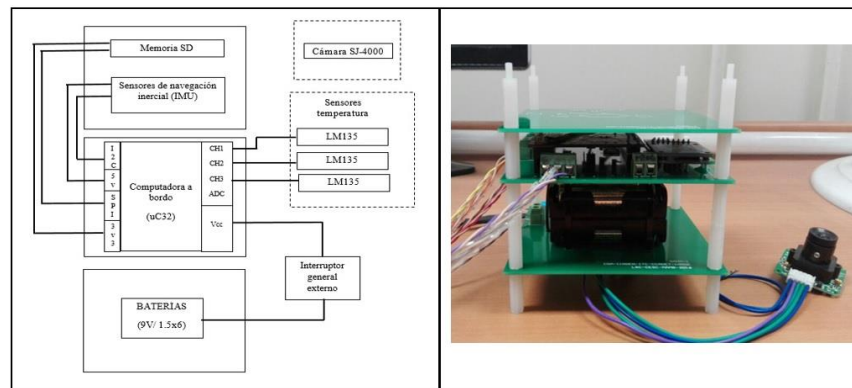
Hay que señalar que el sistema SADM, es una prueba de concepto para el desarrollo posterior de una misión espacial, que integrará un módulo de carga útil que será compatible con el estándar Cubesat y cuya tarea científica será la de coadyuvar, mediante la medición de ciertas variables atmosféricas, con los estudios sobre precursores sísmicos en la ionósfera, temática que se trabaja en conjunto con el departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense de Madrid.

En los siguientes apartados, se describirá de manera general, la arquitectura y algunos de los puntos más relevantes en el diseño del sistema SADM, así como los primeros resultados obtenidos en el vuelo a la estratósfera en noviembre de 2016.

## 2 ARQUITECTURA EN HARDWARE DEL MÓDULO SADM-1

El objetivo del módulo experimental SADM-1, cuya arquitectura se muestra en la figura 1, es la adquisición de variables atmosféricas, tales como temperatura del aire, así como de datos a partir de sensores de navegación inercial, principalmente acelerómetro, magnetómetro y giróscopo, todos en tres

ejes. La computadora a bordo (OBC, acrónimo en inglés) está integrada a partir de un microcontrolador de grado industrial de 32 bits de propósito general. Los datos adquiridos mediante los sensores, son almacenados en una tarjeta SD.



**Figura 1.** Arquitectura del instrumento SADM-1.

El módulo SADM-1, es una prueba de concepto para el desarrollo, a largo plazo, de un módulo de carga útil que será ubicado a bordo de la plataforma de un satélite pequeño de órbita, y que permitirá el estudio de perturbaciones en la ionósfera, principalmente temperatura del aire, campo magnético y resistividad del aire.

El estudio de precursores sísmicos permitirá entender con mayor precisión la relación litósfera-atmósfera, particularmente en términos de anomalías que ocurren en ciertas variables atmosféricas antes de la ocurrencia de un terremoto de gran magnitud ( $>7^{\circ}$  Richter), tales como variaciones en la temperatura del aire, campo magnético, resistividad del aire y TEC.

De manera subyacente, el estudio de perturbaciones en la ionósfera, podría ayudar a diseñar mecanismos para reducir el impacto sobre sistemas de geoposicionamiento (GPS) y otros medios de ubicación global, que utilizan las capas altas de la atmósfera como medio de propagación.

## 2.1 Tarjeta de desarrollo ChipKIT uC32

El componente principal de la OBC, está basado en una tarjeta de desarrollo comercial ChipKIT uC32® de Digilent®, que es una plataforma para desarrollar aplicaciones basadas en microcontrolador. Dicha tarjeta es compatible con el factor de forma del sistema Arduino Uno, y utiliza el núcleo chiKIT-core®, cuyo API está basado en la especificación Arduino 1.6.x, lo que permite que sea compatible con los recursos existente para las plataformas Arduino. La tarjeta ChipKIT uC32 además es compatible con muchos *shields* diseñados para Arduino, los cuales pueden operar a 3.3V.

Algunas de las características relevantes de ChipKIT uC32 se enlistan a continuación:

- Procesador Microchip PIC32MX340F512H
- 512 k memoria FLASH, 32K memoria SRAM
- Frecuencia de operación de 80 MHz
- 43 líneas disponibles de entradas/salidas digitales
- Alimentación vía puerto USB o mediante eliminador
- Dos puertos SPI y un I<sup>2</sup>C
- ADC de 10 bits con entradas de 0 a 3.3 V, 5 salidas PWM
- 12 entradas analógicas
- Voltaje de alimentación de 7 a 15 V
- $\pm 18$  mA DC por cada terminal
- Corriente de operación típica de 75 mA

## 2.2 Unidad de Mediciones Inerciales (IMU) LSM9DS1

El LSM9DS1 es un sistema versátil de medición de movimiento, contenido en un solo chip. Integra en el mismo encapsulado un magnetómetro, giróscopo y acelerómetro, cada uno en tres ejes (9 grados de libertad). Cada uno de los sensores del módulo LSM9DS1 soporta un amplio intervalo de rangos:

- Acelerómetro:  $\pm 2$ , 4, 8 o 16 g
- Giróscopo:  $\pm 245$ , 500 o 2000  $^{\circ}/s$
- Magnetómetro:  $\pm 2$ , 4, 12 o 16 gauss

El esquema de comunicación entre la OBC y el LSM9DS1 se establece mediante el protocolo I2C, aunque también es posible configurarlo para que soporte el protocolo SPI. El voltaje de alimentación del módulo es de 3.3 V, el cual se obtiene a partir de una de las salidas de voltaje de la misma tarjeta ChipKIT que integra la OBC.

## 2.3 Sensor de temperatura LM135

Los sensores de la serie LM135, son de precisión y de fácil calibración. Su principio de operación se basa en un diodo Zener de dos terminales, el cual tiene un voltaje de ruptura directamente proporcional a la temperatura absoluta, a razón de 10 mV/ $^{\circ}K$ . El sensor posee una impedancia dinámica de menos de 1 $\Omega$ , y opera sobre un rango de corriente de 400 $\mu A$  a 5mA. Cuando se calibra el sensor a una temperatura de 25 $^{\circ}C$ , tiene un error típico menor a 1 $^{\circ}C$  en un rango de temperatura de hasta 100 $^{\circ}C$ . En comparación con otros sensores de temperatura, el LM135 posee una salida muy lineal.

Las aplicaciones dentro de las cuales se puede considerar al LM135, incluyen aquellas que requieren medición de temperatura en un rango de entre -55 $^{\circ}C$  a 150 $^{\circ}C$ . Por sus características de baja impedancia y salida lineal, los hacen ideales para poder interactuar con circuitos de control y sistemas de adquisición de datos. Para su conexión con la OBC, la interfaz se realizó mediante uno de los canales de conversión analógico-digital de la tarjeta ChipKIT uC32.

## 3 CÁMARA SJ-4000

Otro de los elementos importantes dentro de la instrumentación del sistema SADM-1 y, aunque en la práctica operó como un dispositivo autónomo, es una cámara fotográfica y de video. Para el caso del sistema que se describe en este artículo, se utilizó la cámara SJ-4000 de SJCAM®. Dentro de las características más destacables de esta cámara, se encuentra su interfaz WIFI, su resolución de 12 megapíxeles y su capacidad de grabar video FullHD 1080p a 30 *frames* por segundo y a 720p a 60 *frames* por segundo.

## 4 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE DE OPERACIONES

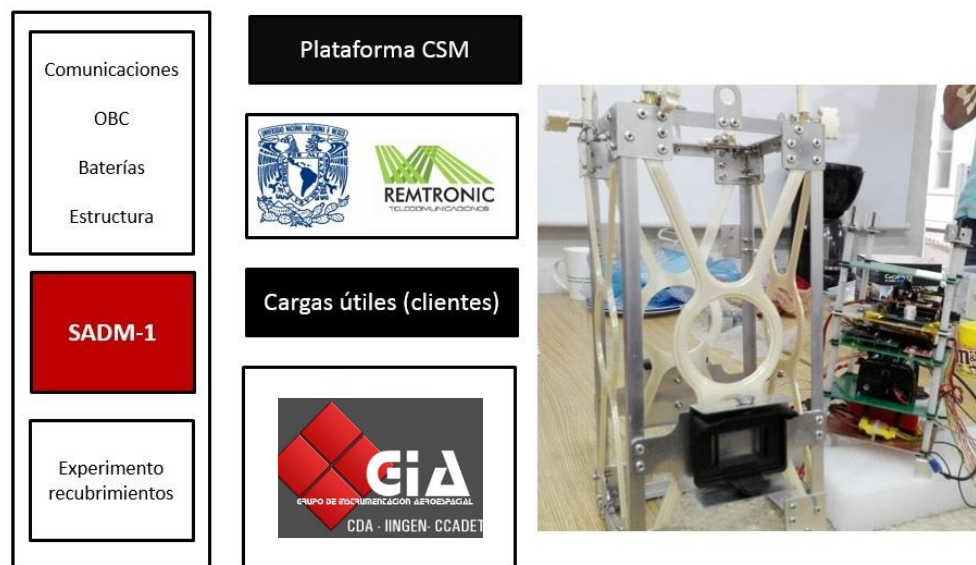
Para el software integrado en el SADM-1, dado que el sistema está construido sobre una tarjeta ChipKIT uC32, y a que este sistema es compatible con el estándar de programación de Arduino, se puede utilizar el amplio conjunto de bibliotecas para el manejo de sensores existente para dicha plataforma, lo que facilita el desarrollo del programa de control. Este programa se encarga de llevar a cabo las funciones de adquisición de datos de los sensores a bordo en tiempos predefinidos, almacenando los datos leídos en una memoria SD.

Para la ejecución de las tareas que realiza el SADM-1, la estructura del programa de control se basa en el uso del administrador de tareas propietario de la plataforma ChipKIT, el cual se encarga de garantizar la ejecución de las tareas de acuerdo al esquema de tiempos programado. Al inicio de la ejecución del programa, se pone a funcionar el reloj de tiempo real (RTCC) contenido en la ChipKIT uC32, permitiendo ajustarse la fecha y hora a través de la consola, a la que se accede vía un puerto USB. Posteriormente se configuran el acceso a los dispositivos (IMU, sensores de temperatura y memoria SD), y se configura una tarea que se ejecuta recurrentemente cada 30 segundos. En esta tarea se hace la lectura de la IMU (aceleración, velocidad angular y campo magnético) y de los tres sensores de temperatura, y se almacena

en la memoria SD junto con la estampa de tiempo en que se hizo la lectura. En caso de que haya algún problema con algún sensor, también se almacena en la memoria dicho evento.

## 5 PLATAFORMA SUBORBITAL CSM (UNAM-REMTRONIC)

La CSM-UNAM está constituida por 3 módulos, como se muestra en la figura 2. El primero de ellos es una estructura híbrida constituida de aluminio con refuerzos poliméricos, fabricados por manufactura aditiva. El segundo módulo es una estructura tipo torre que contiene a la carga útil. Para minimizar el riesgo de daño por impactos, esta estructura es suspendida al interior de la estructura híbrida mediante tensores elásticos que reducen el efecto de fuerzas dinámicas. En cuanto a la protección exterior contra impacto se implementó una base amortiguada compuesta por 2 diferentes tipos de espumados plásticos, formando capas en un arreglo ortogonal lo cual genera una excelente capacidad de amortiguamiento. El tercer módulo corresponde al sistema electrónico; el diseño electrónico de la CSM-UNAM consiste en una computadora a bordo (OBC por sus siglas en inglés), cuya función es recabar información meteorológica y del estado de algunos equipos. Las variables que mide son: aceleración (3 ejes), magnetismo (3 ejes), giróscopo (3 ejes), presión con su temperatura, humedad con su temperatura, altitud, luz, temperatura ambiente, temperatura objeto y contiene 5 termistores para la medición de temperaturas diversas. Con esta información se puede determinar la posición en vuelo de la CSM, obtener información climatológica de las variables mencionadas, determinar la altitud de la carga y medir cinco temperaturas de los experimentos que así lo requieran.



**Figura 2.** Arquitectura general de la plataforma CSM.

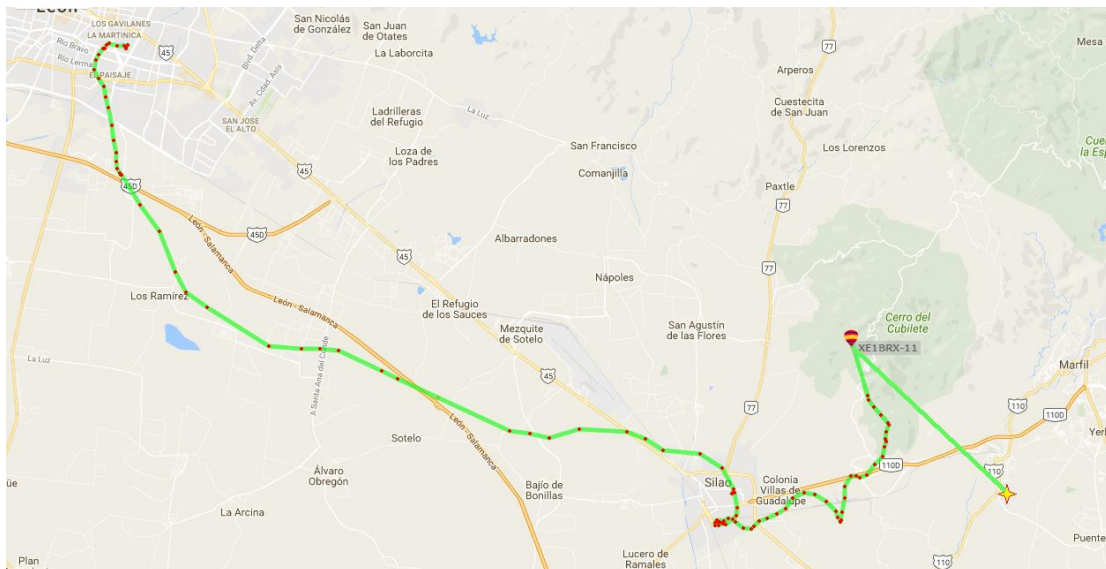
## 6 DESCRIPCIÓN DEL VUELO

Siendo lanzada a las 9:00 horas del 26 de noviembre de 2016, desde el Parque Ecológico Explora de la ciudad de León, Guanajuato, como se muestra en la figura 3, la CSM alcanzó una altura de 34,545 metros, lo cual representa más de 3 veces la altura de aviones comerciales, en un ascenso que duró alrededor de 2 horas 19 minutos.



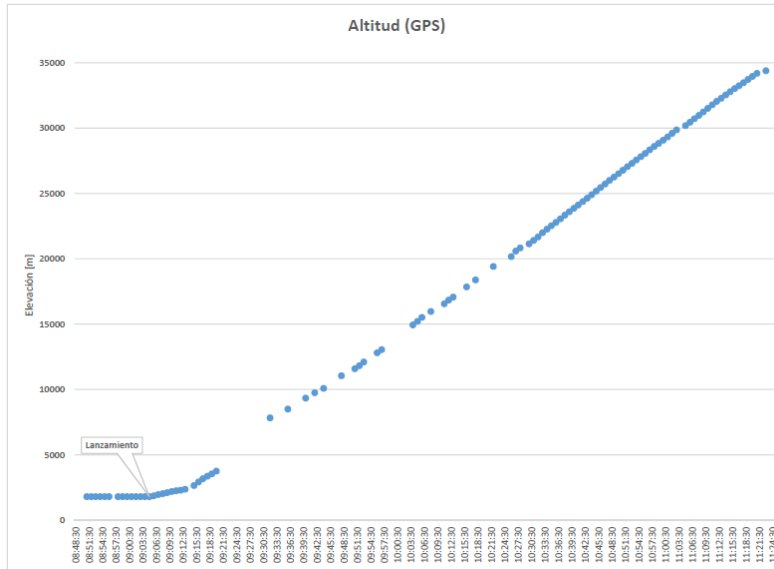
**Figura 3.** Elevación de la plataforma CSM con módulo SADM-1 a bordo.

Gracias a las condiciones climatológicas, la carga útil fue visible desde tierra durante todo el vuelo. Después de alrededor de 90 minutos del lanzamiento, su posición, sin muchas variaciones, se estableció sobre el Cerro del Cubilete. Una vez que explotó el globo de helio, la plataforma CSM realizó su descenso, dirigiéndose hacia la localidad de Santa Teresa, Guanajuato. La trayectoria de la plataforma se muestra con detalle en la figura 4 [3].



**Figura 4.** Trayectoria recorrida por la plataforma CSM con el módulo SADM-1 a bordo.

La altitud máxima registrada alcanzada por la plataforma CSM fue de alrededor de 34.545 km. En la figura 5 es posible con mayor detalle observar la evolución en la altura de ascenso de la sonda.



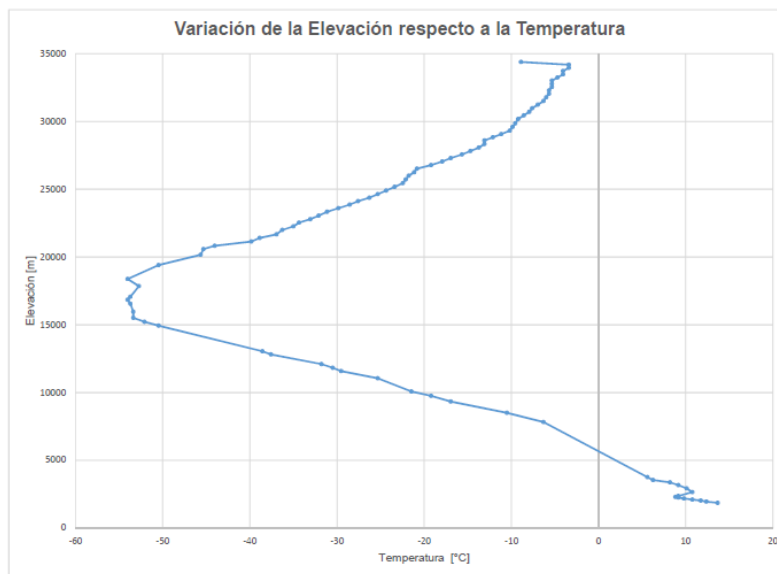
**Figura 5.** Registro de altitud alcanzada durante la misión de la plataforma suborbital CSM.

## 7 RESULTADOS

A bordo de la plataforma CSM, viajó el módulo SADM-1, el cual registró las siguientes variables:

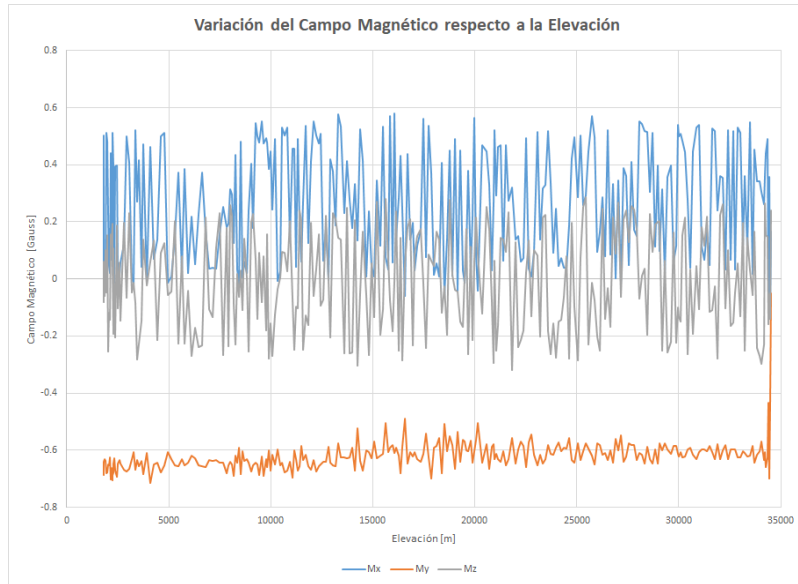
- Temperatura exterior
- Campo magnético (magnetómetro)
- Velocidad angular (giróscopo)
- Aceleración (acelerómetro)

Las gráficas correspondientes a los datos adquiridos para temperatura externa vs altitud y campo magnético vs altitud, que se muestran en las figuras 6 y 7 respectivamente, representan dos de los elementos con posible utilidad en los estudios sobre precursores sísmicos.



**Figura 6.** Gráfica de la variación de la temperatura en función de la altitud.





**Figura 7.** Gráfica de la variación del campo magnético en función de la altitud.

Adicionalmente, el módulo SADM-1 contó con una cámara que registró, para fines de testificación, fotografías de alta definición. En las figuras 8, 9, 10 y 11 se muestran algunas de las imágenes más representativas, donde en cada una de ellas se puede identificar la hora en que fue tomada la imagen y se indica la altura aproximada en que fue tomada.



**Figura 8.** Fotografía capturada durante el despegue de la plataforma.



**Figura 9.** Imagen a una altura aproximada de 13.185 km.



**Figura 10.** Imagen a una altura aproximada de 16.355 km.



**Figura 11.** Imagen a una altura aproximada de 20.658 km.

## **8 CONCLUSIONES**

El vuelo realizado el 26 de noviembre de 2017 representó una experiencia exitosa en varios aspectos. Primero permitió validar el funcionamiento del módulo experimental SAMD-1, con lo que corroboró el adecuado funcionamiento de la instrumentación abordo, en condiciones de presión y temperatura similares a las que se presentarían en un vuelo orbital, convirtiendo a este vuelo en un primer paso hacia el desarrollo de un módulo de carga útil multimisión y multipropósito para ser utilizado en nanosatélites tipo Cubesat. Por otro lado, esta misión representa la primera experiencia de vuelo suborbital en que participa el Instituto Politécnico Nacional. Así mismo, representa el segundo vuelo para la plataforma CSM, logrando la recuperación de la carga intacta, cosa que es poco frecuente en este tipo de vuelos y representa el éxito principal de cualquier misión suborbital.

La experiencia obtenida en esta misión nos permite mejorar y ampliar la instrumentación para exploración atmosférica que se está desarrollando, de tal manera que ya se está preparando la siguiente versión del módulo experimental SADM que será evaluado próximamente en otro vuelo estratosférico.

## **9 AGRADECIMIENTOS**

El presente trabajo de investigación y desarrollo tecnológico, fue financiado parcialmente con recursos del proyecto 262899 del Fondo Sectorial de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación en Actividades Espaciales AEM-CONACYT.

## REFERENCIAS

- [1] worldview.space “High-altitude ballooning history”
- [2] Gai, M. Guglieri, G. et.al. “A Scientific Mission Based on a High Altitude Stratospheric Balloon” International Journal of Aerospace Sciences, 2014, 3(1): 18-29. DOI: 10.5923/j.aerospace.20140301.03.
- [3] Velázquez, F. “Resumen de lanzamiento y recuperación de la Carga de Servicio Mexicana CSM-UNAM” Fondo de Colaboración del Instituto de Ingeniería y Facultad de Ingeniería de la UNAM, 2015. Proyecto sobre Construcción y lanzamiento de cargas útiles para realizar experimentos en ambiente suborbital. México, 2016.