

Implementación de una infraestructura de procesamiento satelital con software libre en el Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra, México

Implementation of a satellite processing infrastructure with free software at the National Earth Observation Laboratory, Mexico

Alejandro Aguilar Sierra* y Víctor Manuel Jiménez Escudero**

Recibido: 31/01/2025. Aceptado: 10/06/2025. Publicado: 03/07/2025.

Resumen. El Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT) ha transitado, durante los últimos años, hacia un sistema de procesamiento y distribución de datos satelitales basado en software libre, con el objetivo de eliminar la dependencia de plataformas comerciales, mejorar la precisión geoespacial y asegurar la sostenibilidad tecnológica en el acceso y manejo de imágenes satelitales. La metodología se basó en la adopción de software libre cuidadosamente seleccionado, respaldado por instituciones de reconocido prestigio y con amplia validación operativa. Se emplearon herramientas como GDAL, CSPP, IPOPP y AAPP, que permiten el procesamiento integral de datos provenientes de satélites geoestacionarios (GOES-East) y de órbita polar (NOAA-20, Suomi-NPP, Terra, Aqua, entre otros), generando productos en formatos interoperables como NetCDF, HDF5 y GeoTIFF. Entre los principales resultados destaca la generación automatizada de productos satelitales de nivel 1 y 2, imágenes RGB, composiciones nocturnas, índices de vegetación, temperatura superficial, detección de aerosoles, e incendios activos. Esta experiencia, aquí descrita, permite concluir que el uso de software libre constituye una alternativa robusta y escalable para centros de observación terrestre, alineada con principios de autonomía tecnológica, colaboración interinstitucional y ciencia abierta.

Palabras clave: productos ambientales, código abierto, percepción remota, satélite geoestacionario, satélites polares, datos geoespaciales.

Abstract. Over the last few years, the National Earth Observation Laboratory (LANOT) has transitioned to a satellite data processing and distribution system based on free software, with the aim of eliminating dependence on commercial platforms, improving geospatial accuracy, and ensuring technological sustainability in the access and management of satellite images. The methodology was based on the adoption of carefully selected free software, backed by renowned institutions and with extensive operational validation. Tools such as GDAL, CSPP, IPOPP, and AAPP were used, which allow for the comprehensive processing of data from geostationary satellites (GOES-East) and polar orbit satellites (NOAA-20, Suomi-NPP, Terra, Aqua, among others), generating products in interoperable formats such as NetCDF, HDF5, and GeoTIFF. Among the main results are the automated generation of level 1 and 2 satellite products, RGB images, nighttime compositions, vegetation indices, surface temperature, aerosol detection, and active fires. This experience, described here, leads to the conclusion that the use of free software is a robust and scalable alternative

* Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT). Circuito de la investigación científica s/n, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, Coyoacán, 04510, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1018-8521>. Email: asierra@unam.mx

** Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT). Circuito de la investigación científica s/n, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, Coyoacán, 04510, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7521-7551>. Email: vescudero@geografia.unam.mx

for Earth observation centers, aligned with principles of technological autonomy, inter-institutional collaboration, and open science.

Keywords: environmental products, open source, remote sensing, geostationary satellite, polar satellites, geospatial data.

INTRODUCCIÓN

El Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT) (Aguirre, 2018), cuya sede se encuentra en el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), cuenta con tres sistemas de adquisición satelital: GOES East Re-broadcast, GeonetCast y Polar (satélites Suomi-SNPP, NOAA-20, Aqua, Terra, MetOp-1 y 2, NOAA-16, 18 y 19).¹ Los datos recibidos son sometidos a distintos niveles de procesamiento y se ponen a disposición de los usuarios del LANOT, entre ellos dependencias federales como el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), la Secretaría de Marina (SEMAR), el Servicio Meteorológico Nacional y educativas como la Universidad Autónoma del Estado de México y la misma UNAM.

Hasta mediados de 2018, el LANOT realizaba todo su procesamiento de datos con los programas de TeraScan y el formato de datos cerrado TDF de la empresa Sea Space, misma que mantiene los sistemas de adquisición. El uso de dichos programas implica, además de un costo considerable en licencias, el uso de código cerrado imposible de modificar y corregir. Sin acceso al código fuente, no es posible controlar la calidad de los productos generados. Un defecto notable de este software comercial es que no permite ajustar todos los parámetros necesarios, por lo que los resultados que arroja son menos precisos y es imposible agregar ciertos tipos de proyecciones útiles para México, lo cual es grave para aplicaciones que requieren precisión geográfica. Para resolver este problema, desde julio de 2018 se han implementado y desarrollando en el LANOT alternativas con base en código abierto (Aguilar, 2019).

¹ Consúltense al final del artículo el Glosario de acrónimos y términos técnicos.

La principal ventaja del uso de software libre no es que la licencia sea gratuita, pues los costos ocultos pueden ser altos, como la necesidad de contar con personal más capacitado. Es la libertad de uso y el acceso al código fuente, lo cual abre las puertas a la colaboración. El conocimiento compartido y abierto va más acorde con los objetivos de una universidad, como se documenta en los *Principios del software libre y código abierto de la UNAM* (CATIC, 2024). Además, es más seguro, ya que cuando se identifica un problema, una amplia comunidad puede trabajar en su solución y corregirlo rápidamente, como ocurre con el *kernel* del sistema operativo Linux usado en servidores. Otra ventaja muy importante es la independencia ante una empresa privada que, por cualquier razón, abandone un software vital para una organización.

METODOLOGÍA

Cada una de las tareas que lleva a cabo el LANOT, como adquisición, procesamiento y almacenamiento, requieren el uso intensivo de programas computacionales muy especializados y de alta calidad, producidos por agencias gubernamentales o universidades, publicados bajo una licencia de código abierto. Elegimos rigurosamente el software que usamos en nuestros procesos, con el siguiente criterio:

1. Debe estar respaldado por una institución académica o una organización gubernamental o internacional muy reconocida.
2. Debe tener varios años de funcionamiento satisfactorio. Nunca arriesgamos nuestros procesos con versiones inmaduras o de prueba.
3. Debe haber sido recomendado por expertos reconocidos en su uso.

En la mayoría de los casos usamos código y datos de las agencias NOAA y NASA, de la Universidad de Wisconsin en Madison y de institutos de investigación científica de la UNAM.

Sistema geoestacionario

A finales de 2017, el satélite geoestacionario GOES-16 (desde entonces GOES-East) se colocó en la lon-

gitud 75.2 O latitud 0 N. Su instrumento primario es el Advanced Baseline Imager (ABI), que aportó notables mejoras respecto a la generación anterior: cuadruplicó la resolución espacial, quintuplicó la temporal y triplicó la espectral (Tabla 1). Hace un barrido de la mayor parte del hemisferio occidental (disco completo) cada diez minutos, de la región continental de los EUA (CONUS, por sus siglas en inglés) cada cinco minutos y dos regiones móviles de mesoescala cada minuto (NOAA y NASA, 2019). Una muestra de ello puede observarse en la Figura 1, donde los anillos indican la resolución espacial por pixel que disminuye conforme se alejan del centro de observación del satélite. Nótese que la resolución espacial es excelente para México y que el sector CONUS abarca casi todo su territorio. Los sectores móviles de mesoescala monitorean oportunamente eventos como tormentas y huracanes, y en este caso, el mapa muestra la posición que tuvieron

durante los huracanes Otis (24 de octubre de 2023) y Milton (8 de octubre de 2024).

Valga mencionar que, en abril de 2025, el satélite GOES-19 reemplazó al GOES-16 en la misma posición y con el mismo sensor ABI y es ahora el nuevo GOES-East.

La estación receptora del satélite GOES-East utiliza el sistema GOES Re-broadcast (GRB), con el que recibe datos de nivel L1b, calibrados en resolución completa y georreferenciados, de las 16 bandas del sensor ABI en tiempo real, en formato NetCDF (Tabla 1).

Para conveniencia de los usuarios del consorcio LANOT se realizan los siguientes procesos:

1. Se recortan distintas regiones geográficas de las 16 bandas de manera precisa con las herramientas de la Geospatial Data Abstraction Library (Rouault *et al.*, 2024) de la fundación

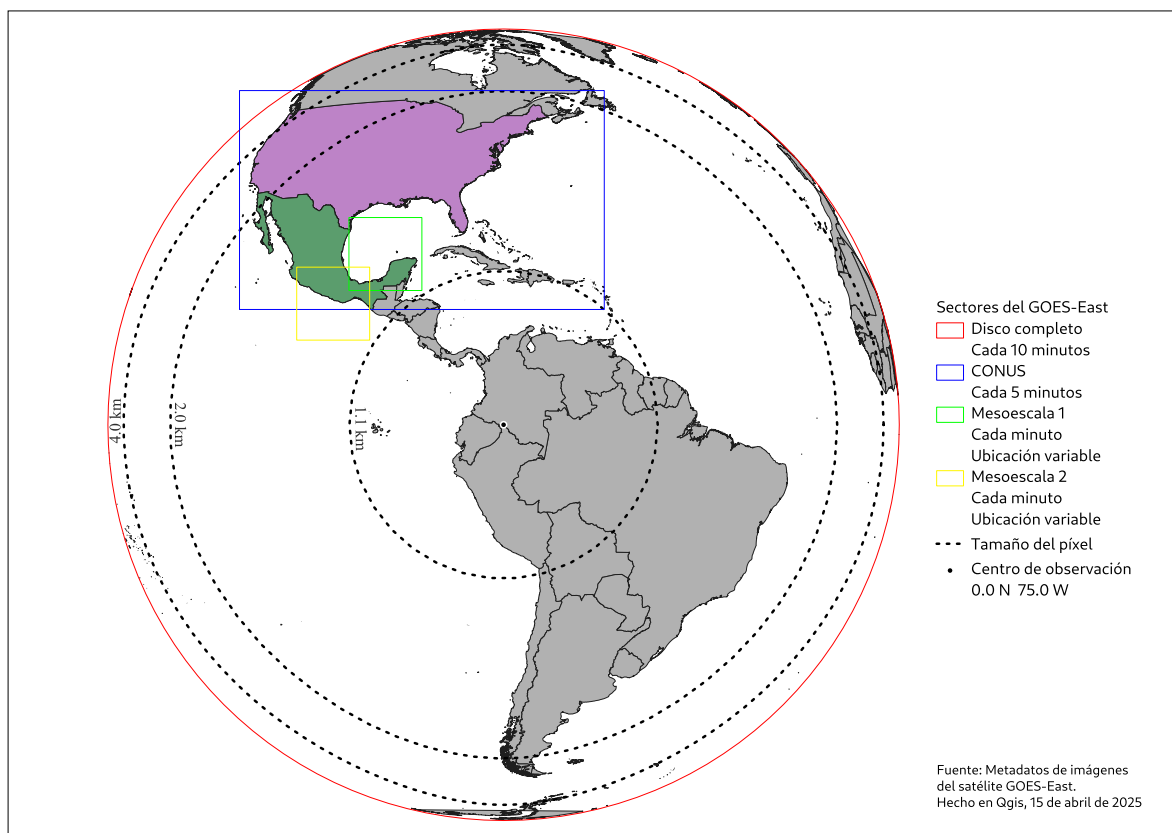


Figura 1. Mapa de cobertura espacial del satélite GOES East.

Tabla 1. Bandas del sensor ABI con su resolución espacial.

Banda	Longitud de onda (μm)	Tipo	Nombre	Resolución espacial (km)
1	0.47	Visible	Azul	1
2	0.64	Visible	Rojo	0.5
3	0.86	Infrarrojo cercano	Vegetación	1
4	1.37	Infrarrojo cercano	Cirrus	2
5	1.6	Infrarrojo cercano	Nieve/Hielo	1
6	2.2	Infrarrojo cercano	Tamaño de partículas de nube	2
7	3.9	Infrarrojo	Ventana de onda corta	2
8	6.2	Infrarrojo	Vapor de agua nivel alto	2
9	6.9	Infrarrojo	Vapor de agua nivel medio	2
10	7.3	Infrarrojo	Vapor de agua nivel bajo	2
11	8.4	Infrarrojo	Fase de tope de nube	2
12	9.6	Infrarrojo	Ozono	2
13	10.3	Infrarrojo	Ventana "limpia" de onda larga	2
14	11.2	Infrarrojo	Ventana de onda larga	2
15	12.3	Infrarrojo	Ventana "sucia" de onda larga	2
16	13.3	Infrarrojo	Onda larga de CO ₂	2

de Código Abierto Geoespacial (OSGEO, 2025). Las herramientas de GDAL usan la información y los metadatos incluidos en los NetCDF para hacer sus operaciones con georreferenciación precisa.

2. Se convierten los datos al formato Cloud Optimized GeoTIFF (COG), más conveniente para su distribución en redes y compatible con los sistemas de información geográfica (Pollack, 2024).

Con los datos de nivel L1b en unidades de radiancia, se aplican algoritmos para generar productos de mayor nivel con el programa ejecutable *aitf* (Algorithm Integration Team Framework) versión 2.3.0 que forma parte del paquete Community Satellite Processing Package for Geostationary Data Geo (CSPP Geo, 2024). Los productos derivados son muy útiles para el análisis ulterior y la toma de decisiones (Tabla 2).

Sistema Polar

El sistema de recepción de satélites de órbita polar del LANOT emplea el software TeraScan 4.5 para captar, decodificar y preparar los datos provenientes de satélites de observación ambiental. Este programa es compatible con diferentes configuraciones antena-receptor y captura datos automáticamente según las especificaciones del usuario, con ajustes menores según la telemetría del satélite (SeaSpace, 2021). Actualmente, el sistema recibe información de los satélites NOAA-20, Suomi-NPP, Terra, Aqua, Metop-1, Metop-3, NOAA-15, NOAA-18 y NOAA-19.

El procesamiento posterior de los datos se realiza exclusivamente con programas de código abierto, lo que permite acceso y mayor flexibilidad en el análisis. Dependiendo del satélite y del tipo de información, se emplean distintas herramientas especializadas.

Para los satélites NOAA-20 y Suomi-NPP, los datos recibidos, conocidos como crudos, son procesados mediante el sistema RT-STPS 7.0 (Real-

time Software Telemetry Processing System), el cual convierte la información original en paquetes denominados RDR (Registro de Datos Crudos, por sus siglas en inglés). Estos paquetes contienen datos provenientes de los sensores VIIRS, ATMS, CrIS y OMPS (DRL, 2022).

Los archivos RDR se procesan con el software IPOPP 4.0 (International Polar Orbiter Processing Package), que genera productos llamados SDR (Registros de Datos del Sensor) y EDR (Registros de Datos Ambientales) para ambos satélites. IPOPP permite procesar tanto datos en tiempo real como históricos provenientes de los sensores mencionados (DRL, 2023). Los productos SDR del sensor VIIRS incluyen datos calibrados en radiancia, reflectancia y temperatura de brillo, dependiendo de la longitud de onda, así como imágenes de la banda día/noche y datos de geolocalización. Estos productos se generan con resoluciones espaciales de 375 y 750 metros, en formato HDF5 (Hierarchical Data Format, versión 5).

A partir de los SDR, los productos EDR incluyen variables ambientales de interés, como propiedades de las nubes, detección de aerosoles, temperatura de

la superficie terrestre y oceánica, incendios activos, índices de vegetación y color del océano (Figura 2). Además, se emplean programas adicionales desarrollados por el proyecto CSPP. Por ejemplo, el CSPP VIIRS Flood Detection, versión 1.1, permite identificar inundaciones a nivel global utilizando los productos SDR de VIIRS (CSPP, 2018), basado en el algoritmo propuesto por Sanmei *et al.* (2018).

En el caso de los satélites Terra y Aqua, que transportan el sensor MODIS, se utiliza también el sistema RT-STPS 7.0. Sin embargo, en estos casos los datos se convierten en archivos con formato PDS (Production Data Set). Posteriormente, estos archivos se integran en IPOPP 4.0 para generar productos de nivel 1 y nivel 2 (DRL, 2023).

Finalmente, los datos de los satélites NOAA-18 y NOAA-19 se procesan mediante el software AAPP 8.12 (ATOVS and AVHRR Pre-processing Package), desarrollado por el programa NWP SAF de EUMETSAT. Esta herramienta procesa datos provenientes de los sensores HIRS, AVHRR, AMSU y MHS, que forman parte de la antigua serie de satélites POES de NOAA, así como de sensores equivalentes a los satélites Metop. Los productos generados incluyen

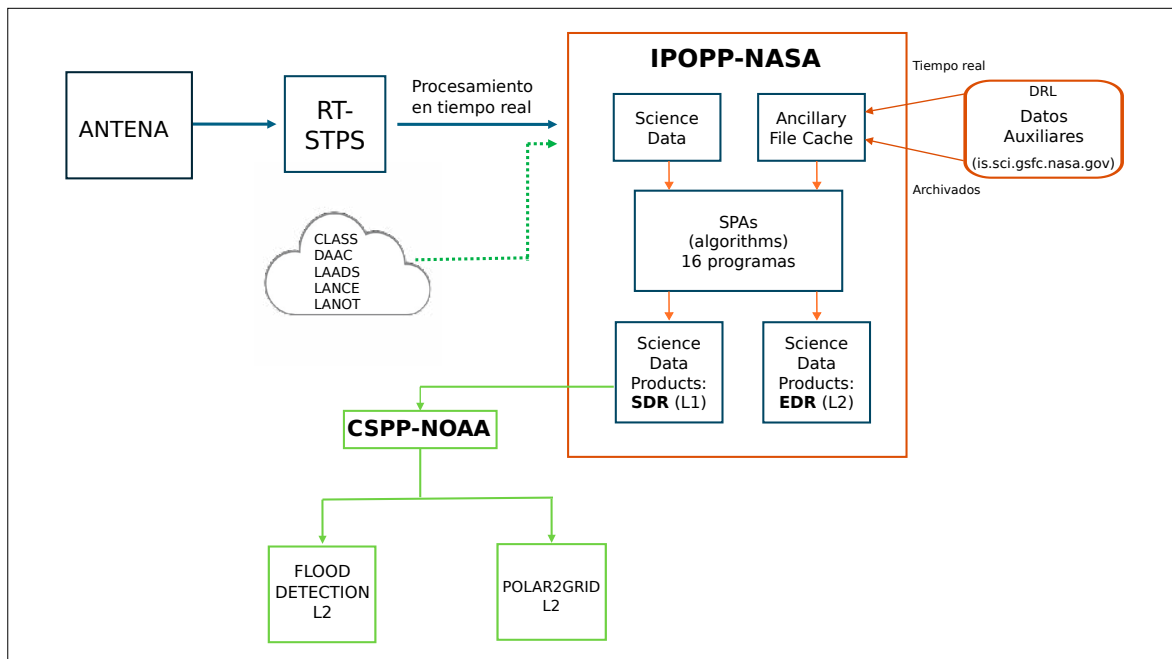


Figura 2. Diagrama de procesamiento para la obtención de datos SDR y EDR de los satélites Suomi-NPP y NOAA-20.

mediciones de radiancia, reflectancia y temperatura de brillo (Atkinson, 2020).

Visualización

En LANOT se han desarrollado algoritmos propios para la visualización en tiempo real de imágenes de satélite. El proceso para obtener un producto visible y comprensible para el ojo humano a partir de un conjunto de datos se llama *visualización*. Un realce RGB (por los colores primarios rojo, verde y azul, en inglés) se obtiene por una combinación numérica de diferentes bandas. Un ejemplo común es el Color Verdadero (*True Color*) que se aproxima a la imagen a color que un ojo humano vería desde el espacio. Como el sensor ABI del GOES-East no cuenta con una banda en el verde, se construye un verde sintético con base en una combinación lineal de las primeras tres bandas (Bah *et al.*, 2018), ya que la banda 3 en el infrarrojo cercano es muy sensible a la vegetación.

Una imagen *pseudocolor* se basa en asignar una tabla de colores específica según lo que se quiera resaltar, a una banda o combinación de bandas. En la noche no se cuenta con las bandas visibles, pero la banda 13 del sensor ABI en infrarrojo térmico permite obtener un registro de la temperatura y una

buen aproximación de la altura de las nubes. Por razones estéticas se suele combinar con la imagen de fondo en superficie de las luces de las ciudades desde el espacio (Simmon, 2012). A los píxeles con temperatura menor a 263.15 K se les asigna una escala de grises inversa a la temperatura de brillo y una paleta meteorológica para las nubes más altas.

Finalmente se combinan ambas imágenes usando un factor de transparencia dependiente de la posición del cenit solar para cada píxel, para distinguir la noche (opaco), el día (transparente) y la penumbra (semitransparente) y así obtener un producto de monitoreo continuo del hemisferio occidental de la Tierra. En la Figura 3 se muestran los procesos de construcción del realce RGB color verdadero para el día, el pseudocolor de temperatura de brillo para la noche y la combinación de ambos, que en adelante llamaremos Truecolor+Nocturno.

Para la visualización de algunos de los productos generados a partir de los satélites polares, se utilizan las herramientas Polar2Grid versión 2.3 y el complemento H2G integrado en IPOPP. Estas herramientas permiten convertir archivos en formato HDF al formato GeoTIFF, lo que facilita la creación de imágenes georreferenciadas. También es posible generar imágenes en formatos más comunes como

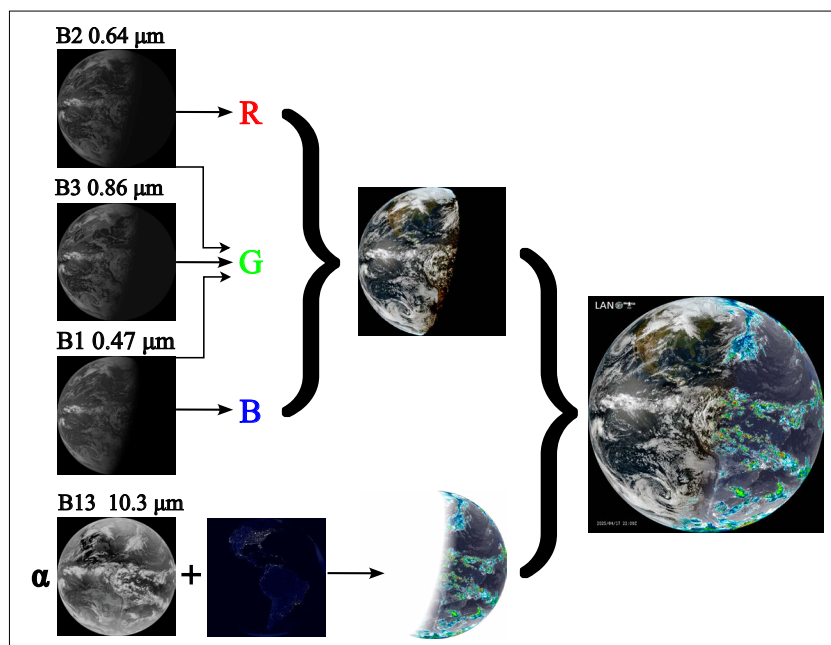


Figura 3. Proceso de generación del compuesto Truecolor+Nocturno, con bandas del sensor ABI del satélite GOES.

JPEG y PNG, a partir de datos provenientes de diversos sensores satelitales (CSPP, 2020; DRL, 2023).

RESULTADOS

Estos resultados son públicos y se pueden consultar en la página oficial del LANOT, www.lanot.unam.mx, que también usa exclusivamente componentes de código abierto, como Apache 2, Django, PostGIS y GeoServer. Tanto los datos obtenidos como los derivados se guardan en el Sistema de Almacenamiento Masivo (Aguilar, 2020) para su consulta posterior.

Productos del sistema geostacionario

El programa airtf genera 36 archivos en formato NetCDF-4: 16 archivos (uno por banda) de imágenes de nubes y humedad (CMI) en unidades de albedo para las bandas reflejantes (1 a 6) y en temperatura de brillo para las emisoras (7 a 16); seis de vientos derivados; uno con información

sobre navegación (coordenadas de cada pixel) y otros productos, como temperatura y presión de la cima de las nubes, temperatura terrestre superficial, aerosoles, etc. En ocasiones es posible que se omitan algunos productos, como cuando no hay suficiente información para calcular los vientos. Como se puede ver en el siguiente cuadro (Tabla 2), algunos archivos contienen más de un producto, como es el caso de la detección de aerosoles.

Productos del sistema Polar

En el caso de Suomi-NPP y NOAA-20, los productos de nivel 1 se corresponden con los SDR y los de nivel 2 con los EDR.

Para el sensor VIIRS, los productos SDR se generan mediante el algoritmo denominado C-SDR-SPA (Common Sensor Data Record Science Processing Algorithm), el cual produce archivos de nivel 1A y 1B no solo para VIIRS, sino también para los sensores ATMS, CrIS y OMPS. Este proceso incluye además la creación de archivos de geocalización, todos en formato HDF5 (DRL, 2023).

Tabla 2. Productos L2 generados con el programa AITF de CSPP GEO derivados de los productos L1B del sensor GOES-16 ABI.

Producto	Identificación	Variables	Descripción	Unidades
Detección de aerosoles	ADP	Aerosol	Máscara binaria de aerosol	
Detección de aerosoles	ADP	Polvo	Máscara binaria polvo	
Detección de aerosoles	ADP	Humo	Máscara binaria de humo	
Profundidad óptica del aerosol	AOD	AOD	Profundidad óptica del aerosol a 550 nm	
Máscaras de cielo despejado	ACM	BCM/ACM	Máscara binaria de nubes	
Imágenes de nubes y humedad (bandas 1 a 6)	CMIP	CMI	Albedo equivalente lambertiano multiplicado por el coseno del ángulo cenital solar	
Imágenes de nubes y humedad (bandas 7 a 16)	CMIP	CMI	Temperatura de brillo	K
Profundidad óptica de las nubes (día)	CODD	COD	Profundidad óptica de las nubes a 640 nm	

Tabla 2. Continuación.

Producto	Identificación	Variables	Descripción	Unidades
Profundidad óptica de las nubes (noche)	CODN	COD	Profundidad óptica de las nubes a 640 nm	
Distribución del tamaño de las partículas en las nubes (día)	CPSD	PSD	Radio efectivo de las partículas de agua condensada en las nubes en la cima	um
Distribución del tamaño de las partículas en las nubes (noche)	CPSN	PSD	Radio efectivo de las partículas de agua condensada en las nubes en la cima	um
Altura de la cima de la nube	ACHA	alta	Altura geopotencial en la cima de las nubes	m
Fase superior de la nube	ACTP	Fase	Categoría de fase de la nube	
Presión en la cima de las nubes	CTP	PRES	Presión del aire en la cima de las nubes	hPa
Temperatura en la cima de las nubes	ACT	TEMPERATURA	Temperatura del aire en la cima de las nubes	K
Movimiento del viento Tope de nube Bandas 2, 7, 8, 14	DMW	Dirección Velocidad Presión Temperatura	Positivo en sentido horario hacia el norte	Grados m/s Hpa K
Movimiento del viento Cielo despejado Bandas 9, 8, 10	DMWV	Dirección Velocidad Presión Temperatura	Positivo en sentido horario hacia el norte	Grados m/s Hpa K
Temperatura de la superficie terrestre (piel)	LST	LST	Temperatura de la superficie terrestre	K
Nubes bajas y niebla	AVIATION_FOG_EN	Fog_Depth	Espesor de la capa de niebla/nubes bajas	m
		IFR_FOG_Prob	Probabilidad de condiciones IFR	%
		LIFR_Fog_Prob	Probabilidad de condiciones LIFR	%
		MVFR_Fog_Prob	Probabilidad de condiciones MVFR	%

Es importante mencionar que los SPA funcionan como complementos (*plug-in*) en la plataforma de procesamiento IPOPP.

En la Tabla 3 se enlistan los productos SDR de VIIRS, que cuenta con 22 bandas espectrales que abarcan el espectro electromagnético desde 0.402 μm y 12.49 μm . Esta cobertura incluye 16 bandas de resolución moderada (bandas M) con una re-

solución espacial en el nadir de 750 metros, cinco bandas definidas como de resolución de imagen (bandas I), con una resolución espacial de 375 metros en el nadir, y una única banda pancromática Día- Noche (DNB) con una resolución espacial de 750 metros a lo largo todo el barrido.

Las bandas M comprenden 11 Bandas Solares Reflectivas (BSR) y 5 Bandas Emisivas Térmicas

Tabla 3. Resolución espectral y espacial del sensor VIIRS.

	Banda	Longitud de Onda (μm)	Resolución Espacial al Nadir (m)
Bandas de resolución Image			
BSR	I1	0.600 – 0.680	375
	I2	0.846 – 0.885	375
	I3	1.580 – 1.640	375
BET	I4	3.550 – 3.930	375
	I5	10.50 – 12.40	375
Bandas de resolución Moderada			
BSR	M1	0.402 – 0.422	750
	M2	0.436 – 0.454	750
	M3	0.478 – 0.498	750
	M4	0.545 – 0.565	750
	M5	0.662 – 0.682	750
	M6	0.739 – 0.754	750
	M7	0.846 – 0.885	750
	M8	1.230 – 1.250	750
	M9	1.371 – 1.386	750
	M10	1.580 – 1.640	750
	M11	2.225 – 2.275	750
BET	M12	3.660 – 3.840	750
	M13	3.973 – 4.128	750
	M14	8.400 – 8.700	750
	M15	10.263 – 11.263	750
	M16	11.538 – 12.488	750
BSR	Banda Día/Noche	0.500 – 0.900	750 (En todo el escaneo)

Fuente: adaptado de Bhaskar *et al.* (2021).

(BET), mientras que las bandas I comprenden 3 BSR y 2 BET (Bhaskar *et al.*, 2021).

Para la generación de productos EDR a partir de los datos del sensor VIIRS, la plataforma IPOPP incorpora once complementos de procesamiento conocidos como SPA (Science Processing Algorithms). Cada uno de estos paquetes está diseñado para generar distintos productos relacionados con

la atmósfera, la superficie terrestre y los océanos. Entre los productos que se obtienen se incluyen el espesor óptico de aerosoles, máscaras de nubes, propiedades ópticas de las nubes, reflectancia corregida por Rayleigh, temperatura de la superficie terrestre, índices de vegetación, fracción de nieve, detección de incendios activos y temperatura de la superficie del mar, entre otros (Tabla 4).

Los productos de nivel 1B del instrumento ATMS consisten en 22 bandas que cubren la frecuencia entre 23.8GHz a 183.3 GHz, calibradas a temperatura de brillo. Estos datos permiten realizar mediciones de temperatura y humedad atmosférica, con una resolución espacial en el nadir que varía entre 15.8 y 74.8 km (Liu, 2022). En el caso del sensor CrIS, se generan tres bandas espectrales: la banda infrarroja de onda larga (LWIR, 650-1095 cm^{-1}), la banda infrarroja de onda media (MWIR, 1210-1750 cm^{-1}) y la banda infrarroja de onda corta (SWIR, 2155-2550 cm^{-1}), calibradas a radiancia con una resolución espacial de 14 km en el nadir (Han, 2018).

En el caso de los satélites que llevan a bordo el sensor MODIS, los productos de nivel 1 están calibrados en radiancia, reflectancia o temperatura de brillo, dependiendo de la longitud de onda de cada canal, generados a diferentes resoluciones espaciales de 250 m, 500 m y 1000 m. El procesamiento se realiza mediante el algoritmo MODISL1DB-SPA (MODIS Level-1 Science Processing Algorithm), que produce los datos nivel 1A, nivel 1B y de geolocalización. A partir de estos, se generan los productos de nivel 2, que incluyen información atmosférica, terrestre y oceánica (DRL, 2021).

Para generar los productos de nivel 2, la plataforma IPOPP emplea seis complementos SPA que permiten obtener información como la reflectancia corregida por Rayleigh, propiedades ópticas de las nubes, aerosoles, temperatura de la superficie terrestre y oceánica, incendios activos, índices de vegetación y color del océano, entre otros (Tabla 5).

Los productos obtenidos a partir de los satélites de la serie POES y METOP, por el momento, se limitan a los datos de nivel 1 de los sensores AVHRR, AMSU, MHS y HIRS. El sensor AVHRR cuenta con cinco bandas espectrales calibradas, que cubren longitudes de onda entre 0.63 y 12.0 μm .

Tabla 4. Paqueterías que utiliza IPOPP 4.0 y productos generados a diferente resolución espacial del sensor VIIRS.

Complemento de IPOPP	Producto	Resolución espacial al Nadir (m)
AEROSOL SPA	Espesor óptico de los aerosoles	750
	Índice del modelo de aerosoles	750
	Profundidad óptica de los aerosoles	750
CLOUDMASK SPA	Máscara de nubes	750
COP SPA	Propiedades ópticas de las nubes	750
	Temperatura del Tope de las nubes de hielo y agua	750
CVIIRS SPA	Reflectancia corregida en resolución moderada	750
	Reflectancia corregida en resolución Image	375
L2GEN SPA	Color del océano	750
	Temperatura de la superficie del océano	750
LST SPA	Temperatura de la superficie de la Tierra	750
SNOWCOV SPA	Mapa binario de nieve	750
	Fracción de nieve	750
SURFREFLECT SPA	Reflectancia de la superficie	750
VEGINDEX SPA	Índices de vegetación (NDVI/EVI)	375
VFIRE375 SPA	Incendios activos	375
VIIRS-AF SPA	Incendios activos	750

Tabla 5. Paqueterías que utiliza IPOPP 4.0 y productos generados a diferentes resoluciones espaciales del sensor MODIS.

Software	Producto	Resolución espacial al Nadir (m)
IMAPP	Máscara de nubes	1000
	Propiedades del tope de las nubes	1000
	Propiedades ópticas de las nubes	1000
	Perfiles atmosféricos	1000
	Aerosoles	1000
L2GEN	Color del océano	1000
	Temperatura de la superficie del océano	1000
MOD14	Incendios activos	1000
CREFL	Reflectancia corregida	1000
NDVIEVI	Índices de vegetación (NDVI/EVI)	1000
MODLST	Temperatura de la superficie de la Tierra	1000

El sensor AMSU dispone de 15 bandas en el rango de frecuencia entre 23.8 y 89 GHz, mientras que el sensor MHS abarca cinco bandas entre 89 y 190.31 GHz. Por su parte, el sensor HIRS ofrece 20 bandas que cubren el espectro entre 668.5 y 2660 cm^{-1} (Atkinson, 2017).

Visualización

En la Figura 4 se muestra el compuesto truecolor+nocturno en recortes derivados del disco completo cada diez minutos, en proyección geográfica y del sector CONUS cada cinco minutos, que incluye casi todo México con excepción de una parte del sur de Chiapas, en su proyección original geostacionaria.

Otros compuestos RGB y pseudocolor que producimos en el LANOT, permiten observar diferentes variables físicas, como las masas de aire, que ayudan a distinguir entre masas de aire polar y tropical; la ceniza, útil para el monitoreo de ceniza volcánica; el óxido de azufre, para detectar grandes

emisiones volcánicas de ese gas y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación (Figura 5).

El producto Movimiento derivado de vientos (DMW) contiene una lista de vectores de viento que identifican su ubicación, velocidad, dirección y presión. El nombre del producto incluye la palabra “derivado” porque los vectores de viento se derivan por seguimiento de características ambientales, específicamente nubes y vapor de agua en múltiples observaciones. En la Figura 6 mostramos un ejemplo de visualización de este producto para marzo de 2025.

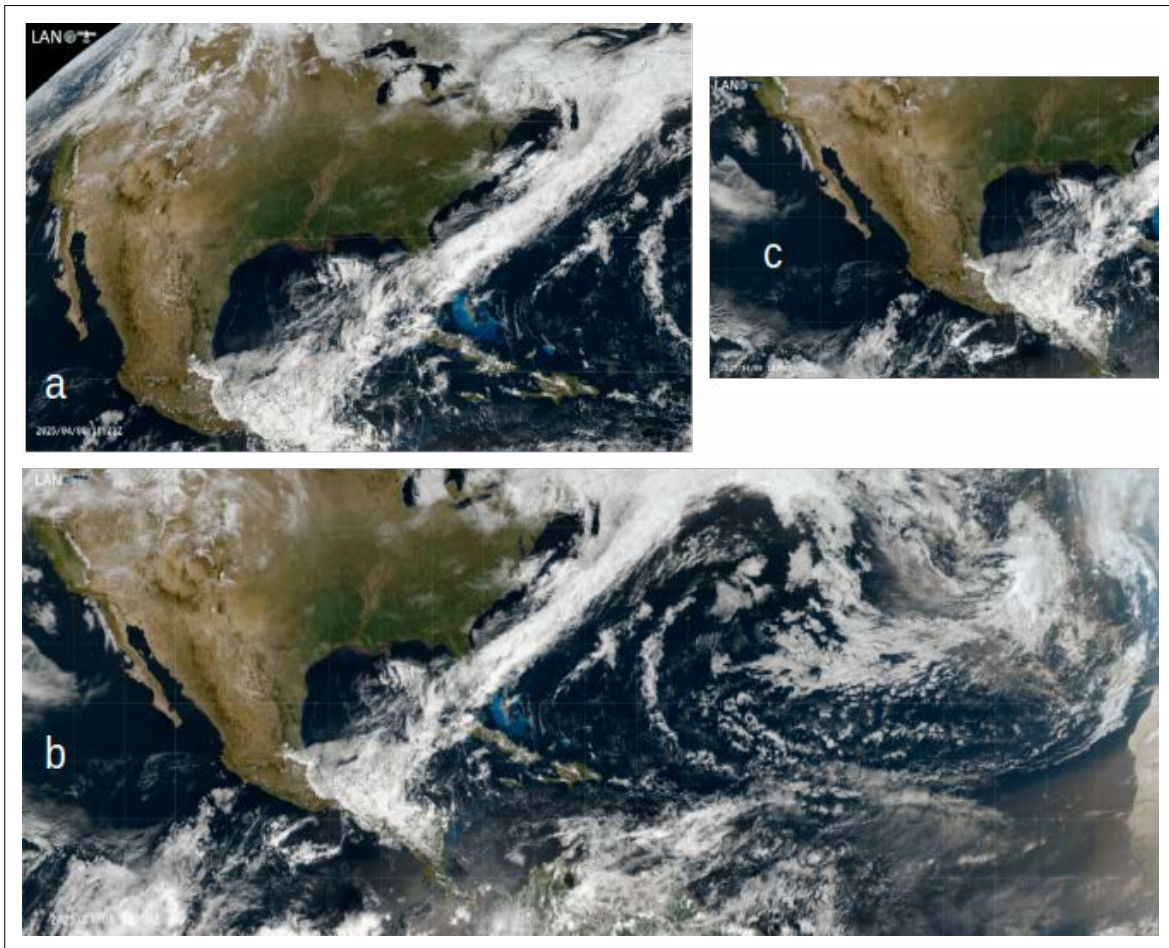


Figura 4. Recortes del compuesto truecolor+nocturno en el sector CONUS (a), (b) en el sector Atlántico, donde se aprecian las tolváneras de arena del Sahara que llegan desde África a América, (c) el sector A2 de la SEMAR, con el que se pueden monitorear las aguas territoriales de México.

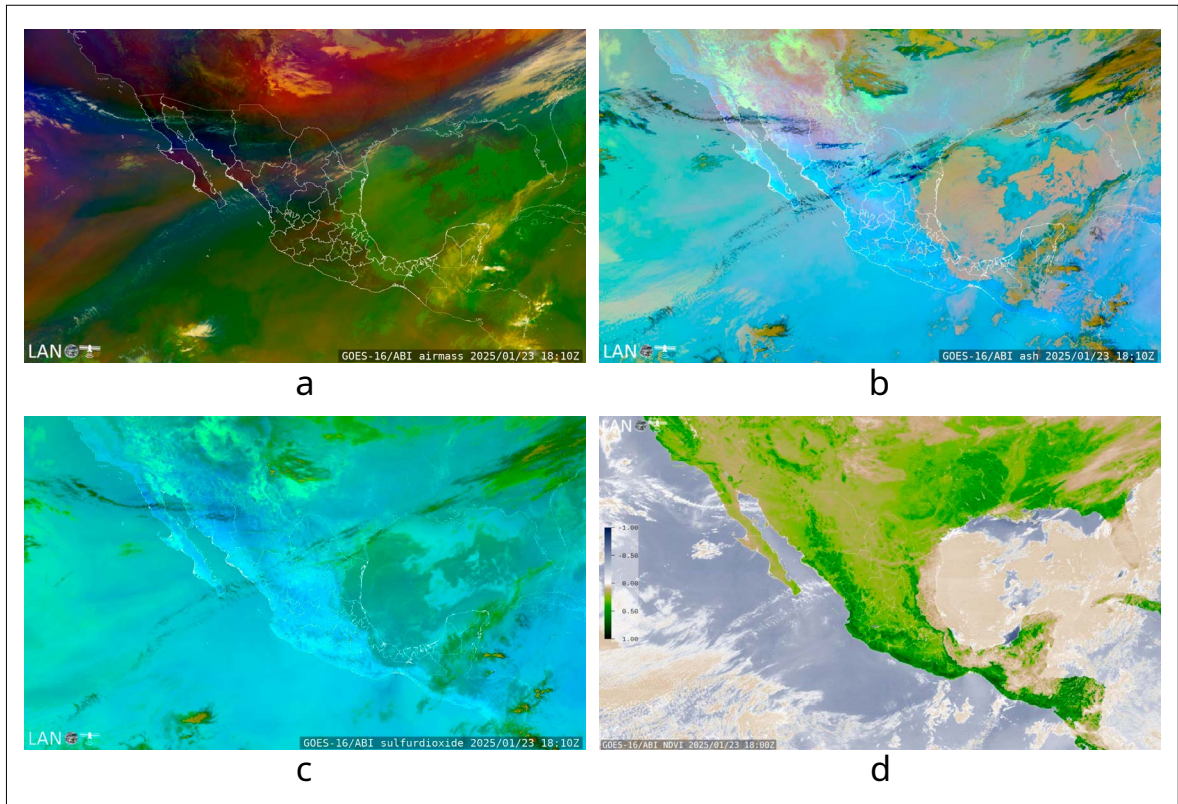


Figura 5. Imágenes RGB y pseudocolor de distintas variables físicas: a) masas de aire, b) ceniza, c) óxido de azufre, d) Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

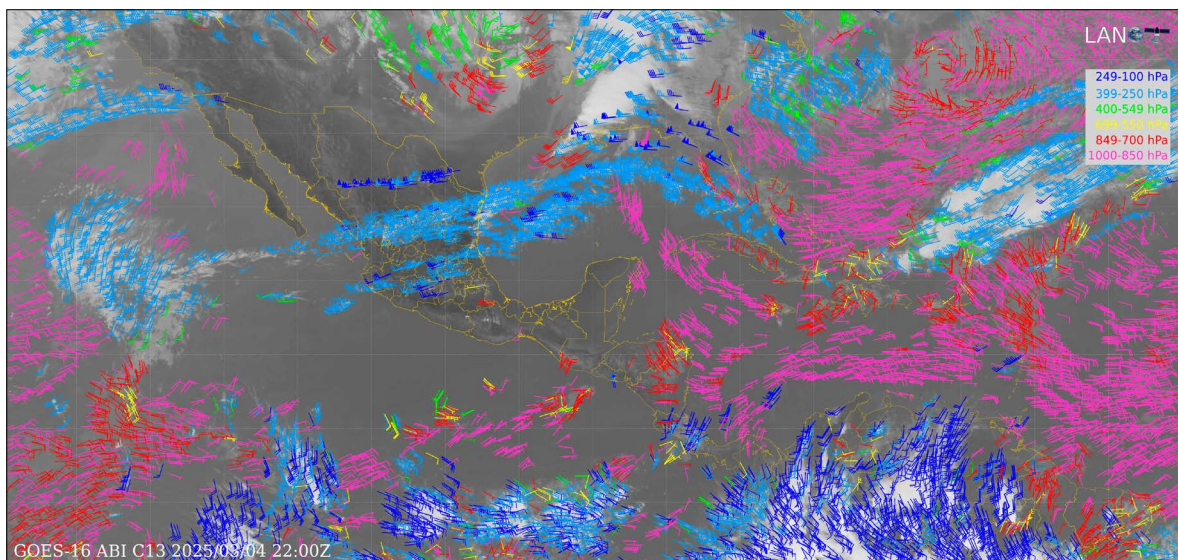


Figura 6. Vientos derivados y sus alturas indicadas en hectopascales. El ángulo de las líneas indica la dirección local del viento y las barbas la intensidad, según la convención meteorológica.

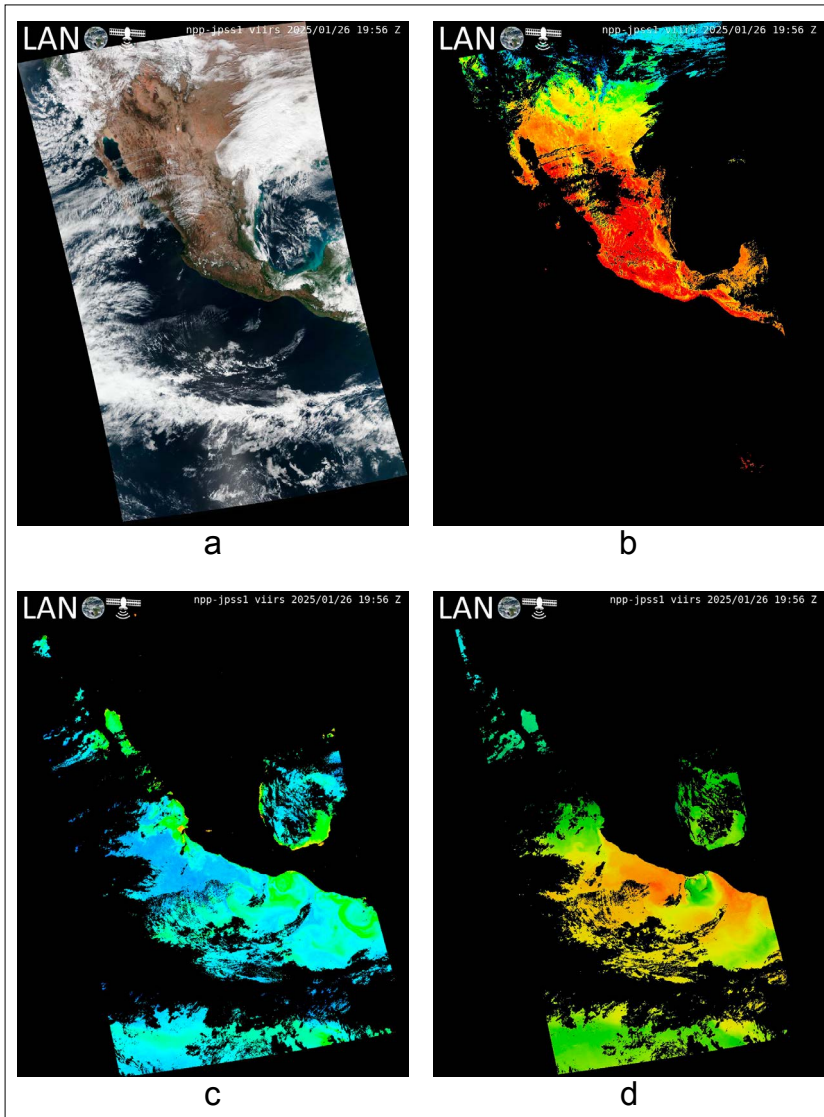


Figura 7. Vista de una imagen del sensor VIIRS del día 26 de enero de 2025 a las 19:56 UTC. a) Color verdadero, b) temperatura de la superficie de la tierra, c) color del océano, d) temperatura de la superficie del océano.

En las Figuras 7 y 8 se presentan algunos ejemplos de los productos generados por los procesos polares, los cuales fueron exportados en formato GeoTIFF de 8 bits para facilitar su interpretación visual. Entre estos productos se incluyen compuestos RGB de color verdadero, mapas de temperatura de la superficie terrestre, oceánica, color del océano, temperatura del tope de las nubes, índices de vegetación, detección de zonas inundables y estimaciones del tipo de material suspendido en la atmósfera, entre otros.

RECOMENDACIONES

Gracias a la existencia de herramientas de código abierto disponibles en Internet y provenientes de fuentes confiables, como la Universidad de Wisconsin en Madison y las agencias NOAA y NASA, así como la propia UNAM, fue posible implementar un sistema a la medida de las necesidades del LANOT y sus socios, de alta calidad y sin incurrir en gastos onerosos de licencias. Este sistema está en continua actualización para adaptarse a las nuevas

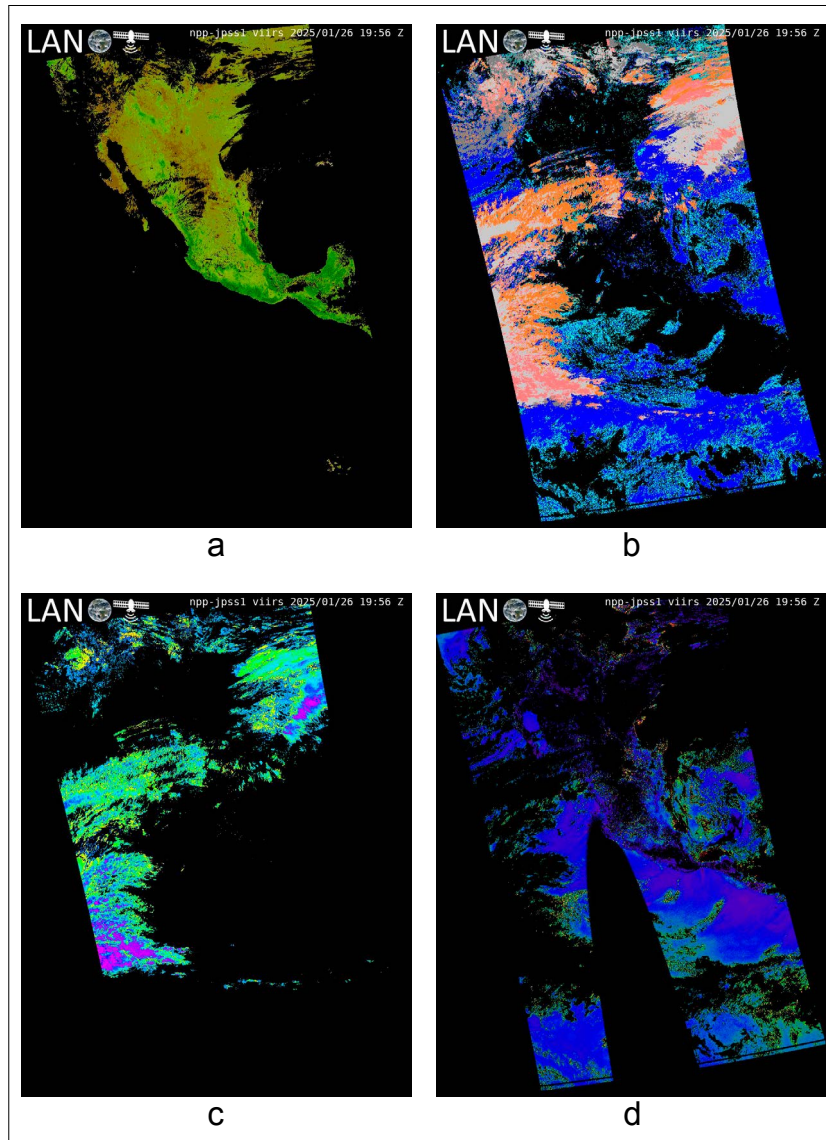


Figura 8. Vistas de una imagen del sensor VIIRS del día 26 de enero de 2025 a las 19:56 UTC. a) Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, b) fase de las nubes, c) temperatura del tope de las nubes, d) espesor óptico de los aerosoles.

tecnologías de satélites y de cómputo que surgen constantemente.

De acuerdo con los resultados de este texto, el software libre es totalmente recomendable y las ventajas son considerables. Este trabajo cumple con los objetivos de los Principios de Software libre y Código Abierto en la UNAM (CATIC, 2024).

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los académicos y servicios sociales del LANOT por su colaboración para hacer posible los proyectos reportados en este trabajo, en especial a Jorge Prado, Gabriela Gómez y Uriel Mendoza. Por otro lado, se extiende un agradecimiento al proyecto de laboratorios nacionales del CONAHCyT LANOT-LN 2018-2024 por el recurso financiero proporcionado para poder llevar a cabo el desarrollo de estas nuevas tecnologías.

REFERENCIAS

- Aguilar, A. (2019, 25-27 June). *CSPP GEO and LEO use at the National Laboratory for Earth Observation (LANOT)*, Mexico. CSPP Meeting, Chengdu.
- Aguilar, A. (2020). *Sistema de Almacenamiento Masivo para el Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT)*. [Tesis de Especialidad en Cómputo de Alto Rendimiento, Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas]. UNAM. <http://132.248.9.195/ptd2020/agosto/0802512/Index.html>
- Aguirre, G. R. (2018). Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT). *Investigaciones Geográficas*, (96). <https://doi.org/10.14350/ig.59730>
- Atkinson, N. C. (2017). *AAPP Version 8 Product Specification Version 1.1*. NWP SAF. NWPSAF-MO-DS-033. EUMETSAT. https://nwp-saf.eumetsat.int/site/download/documentation/aapp/NWPSAF-MO-DS-033-AAPPv8_ProductSpecification.pdf
- Atkinson, N. C. (2020). *AAPP v8.5 User Guide*. NWP SAF. NWPSAF-MO-UD-036. EUMETSAT. https://nwp-saf.eumetsat.int/site/download/documentation/aapp/NWPSAF-MO-UD-036_Userguide.pdf
- Bah, M. K, Gunshor, M. M. y Schmit, T. J. (2018). Generation of GOES-16 True Color Imagery without a Green Band. *Earth and Space Science*, 5(9), 549-558. <https://doi.org/10.1029/2018EA000379>
- Bhaskar, R., Kwofu, C. y Guoqing, L. (2021). *NASA Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Level-1B Product User Guide Version 3.0*. NASA Goddard Space Flight Center. https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/archive/Document%20Archive/Science%20Data%20Product%20Documentation/NASA_VIIRS_L1B_UG_August_2021.pdf
- Community Satellite Processing Package (CSPP). (2018). *Installation Instructions for the Community Satellite Processing Package (CSPP) VIIRS Flood Detection Software Version 1.1*. University of Wisconsin-Madison, Space Science and Engineering Center (SSEC). <https://cimss.ssec.wisc.edu/cspp/>
- Community Satellite Processing Package (CSPP). (2020). *Polar2Grid Documentation. Release 2.3*. University of Wisconsin-Madison, Space Science and Engineering Center (SSEC). <https://cimss.ssec.wisc.edu/cspp/>
- Community Satellite Processing Package Geo (CSPP Geo). (2024). *CSPP Geo AIT Framework Level 2 Package Software User's Guide Version 2.1.0*. University of Wisconsin-Madison, Space Science and Engineering Center (SSEC). <https://cimss.ssec.wisc.edu/csppgeo/>
- Consejo Asesor en Tecnologías de Información y Comunicación (CATIC). (2024). *Principios del software libre y código abierto en la UNAM*. Universidad Nacional Autónoma de México. https://www.red-tic.unam.mx/recursos/2024/2024_Principios_SWLibre.pdf
- Direct Readout Laboratory (DRL). (2021). *MODIS Level-1 Science Processing Algorithm (MODISL1DB_SPA) User's Guide Version 1.9*. NASA Goddard Space Flight Center. https://directreadout.sci.gsfc.nasa.gov/users_guides.html
- Direct Readout Laboratory (DRL). (2022). *Real-time Software Telemetry Processing System (RT-STPS) User's Guide Version 7.0*. NASA Goddard Space Flight Center. https://directreadout.sci.gsfc.nasa.gov/users_guides.html
- Direct Readout Laboratory (DRL). (2023). *International Planetary Observation Processing Package (IPOP) User's Guide, Version 4.0*. NASA Goddard Space Flight Center. https://directreadout.sci.gsfc.nasa.gov/users_guides.html
- Han, Y. (2018). *Joint Polar Satellite System (JPSS) Cross Track Infrared Sounder (CrIS) Sensor Data Records (SDR) Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for Full Spectral Resolution*. NOAA Center for Satellite Applications and Research. https://www.star.nesdis.noaa.gov/jpss/documents/ATBD/D0001-M01-S01-002_JPSS_ATBD_CRIS-SDR_nsr_20180614.pdf
- Liu, Q. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2022). *Joint Polar Satellite System (JPSS) Advanced Technology Microwave Sounder (ATMS) SDR Calibration Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD)*. NOAA Center for Satellite Applications and Research. https://www.star.nesdis.noaa.gov/jpss/documents/ATBD/D0001-M01-S01-001_JPSS_ATBD_ATMS-SDR_B.pdf
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) & National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2019). *GOES-R Series Data Book*. NASA Goddard Space Flight Center. <https://www.goes-r.gov/downloads/resources/documents/GOES-RSeriesDataBook.pdf>
- Pollack, N. (2024). *Cloud Optimized GeoTIFF (COG) File Format*. NASA Earth Science Data and Information System Standards Coordination Office. <https://doi.org/10.5067/DOC/ESCO/ESDS-RFC-049v1>
- Rouault, E., Warmerdam, F., Schwehr, K., Kiselev, A., Butler, H., Łoskot, M., Szekeres, T., Tourigny, E., Landa, M., Miara, I., Elliston, B., Chaitanya, K., Plesea, L., Morissette, D., Jolma, A., Dawson, N., Baston, D., de Stigter, C. y Miura, H. (2024). *Geospatial Data Abstraction Library versión 3.9.3*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13929593>
- Sanmei L., D. Sun, M. Goldberg, B. Sjoberg, D. Santek, J. P. Hoffman, M. DeWeese, P. Restrepo, S. Lindsey, E. Holloway (2018). *Automatic near realtime flood detection using Suomi-NPP/VIIRS data*. *Remote Sen-*

sing of Environment, (204), 672-689. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.09.032>
 SeaSpace. (2021). *Terascan User's Manual software*. SeaSpace Corporation.
 Simmon, R. (2012). *Night Lights 2012 Map*. NASA Earth Observatory. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/79765/night-lights-2012-map>

GLOSARIO DE ACRÓNIMOS Y TÉRMINOS TÉCNICOS

AAPP–ATOVS and AVHRR Pre-processing Package: conjunto de herramientas para procesar datos de sensores a bordo de satélites polares de NOAA y Metop, como HIRS, AVHRR, AMSU y otros.

AMSU–Advanced Microwave Sounding Unit: sensor que mide radiación de microondas emitida por la atmósfera terrestre, útil para estudios meteorológicos.

ATMS–Advanced Technology Microwave Sounder: sensor que recoge datos de temperatura y humedad atmosférica mediante microondas.

AVHRR–Advanced Very High Resolution Radiometer: radiómetro multispectral a bordo de satélites NOAA y Metop, utilizado para monitoreo ambiental.

Bandas BET–Bandas Emisivas Térmicas: canales espectrales sensibles a la radiación térmica, útiles para medir temperaturas superficiales y atmosféricas.

Bandas BSR–Bandas Solares Reflectivas: canales espectrales que captan la radiación solar reflejada por la superficie terrestre, vegetación, cuerpos de agua o nubes.

Bandas I / M–Bandas de Imagen / Bandas Moderadas: subconjuntos de bandas del sensor VIIRS. Las bandas I tienen mayor resolución espacial (375 m), mientras que las M tienen resolución moderada (750 m).

CCSDS–Consultative Committee for Space Data Systems: estándares internacionales para la transmisión y el almacenamiento de datos espaciales.

CSPP–Community Satellite Processing Package: conjunto de programas de código abierto para procesar datos de satélites meteorológicos de órbita polar.

C-SDR-SPA–Common Sensor Data Record Science Processing Algorithm: algoritmo común para procesar datos SDR de sensores como VIIRS, ATMS y CrIS.

CrIS–Cross-track Infrared Sounder: sensor que mide perfiles de temperatura y humedad en la atmósfera mediante radiación infrarroja.

DRL–Direct Readout Laboratory (NOAA): laboratorio que desarrolla herramientas para la recepción y procesamiento de datos satelitales en tiempo real.

DNB–Day/Night Band: banda pancromática del sensor VIIRS que permite observaciones tanto diurnas como nocturnas mediante luz reflejada o emitida.

EDR–Environmental Data Records: productos derivados que contienen variables ambientales procesadas, como temperatura de la superficie, aerosoles o vegetación.

EUMETSAT–European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites: agencia europea responsable de satélites meteorológicos operacionales.

GeoTIFF–Georeferenced Tagged Image File Format: formato de imagen raster que incluye información de georreferenciación, lo cual permite ubicar las imágenes dentro de un sistema de coordenadas espaciales.

HDF5–Hierarchical Data Format version 5: formato de archivo diseñado para el almacenamiento y organización eficiente de grandes volúmenes de datos científicos.

HIRS–High-resolution Infrared Radiation Sounder: sensor infrarrojo que mide radiación terrestre para análisis climático y meteorológico.

H2G–HDF to GeoTIFF: complemento del software IPOPP que convierte archivos en formato HDF a imágenes georreferenciadas en formato GeoTIFF.

IPOPP–International Polar Orbiter Processing Package: software que genera productos satelitales a partir de datos crudos de sensores polares.

JPEG / PNG–Joint Photographic Experts Group / Portable Network Graphics: formatos comunes de imagen utilizados para la visualización de datos, aunque no incluyen georreferenciación como el formato GeoTIFF.

LANOT–Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra: centro de investigación mexicano que opera infraestructura para la recepción y análisis de datos satelitales.

MHS–Microwave Humidity Sounder: sensor que mide humedad atmosférica mediante microondas.

MODIS–Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer: sensor a bordo de los satélites Terra y Aqua, útil para monitoreo ambiental a gran escala.

NOAA–National Oceanic and Atmospheric Administration: agencia de EE.UU. encargada de la vigilancia del clima, océanos y la atmósfera.

OMPS–Ozone Mapping and Profiler Suite: conjunto de instrumentos para la detección y monitoreo del ozono atmosférico.

PDS–Production Data Set: formato de archivo intermedio utilizado en el procesamiento de datos de sensores como MODIS.

POES–Polar Orbiting Environmental Satellites: serie de satélites meteorológicos de órbita polar operados por NOAA.

Polar2Grid: herramienta del proyecto CSPP que transforma productos satelitales en bruto en imágenes georreferenciadas (GeoTIFF) o visualizables (JPEG, PNG), listas para ser interpretadas o utilizadas en sistemas de información geográfica.

RDR–Raw Data Record: datos crudos obtenidos directamente de la telemetría de los sensores a bordo de los satélites.

RT-STPS – Real-time Software Telemetry Processing System: sistema de software para procesar en tiempo real datos de telemetría satelital.

SDR–Sensor Data Records: productos calibrados que contienen mediciones físicas directas de los sensores (como radiancia o temperatura de brillo).

SPA–Science Processing Algorithm: algoritmo científico que genera productos a partir de los datos crudos o parcialmente procesados, como parte del flujo en IPOPP.

TeraScan: software comercial utilizado para la recepción y el procesamiento inicial de datos de satélites de observación terrestre.

VIIRS–Visible Infrared Imaging Radiometer Suite: sensor multiespectral que proporciona imágenes y mediciones de la superficie terrestre, nubes, océanos y atmósfera.