



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Paz. La nueva era de la imagen satélite

**Máster en Gestión y Dirección de Sistemas y Tecnologías de la Información y
las Comunicaciones y de Seguridad de la Información**

ALUMNO: Miguel Ángel Orea García

DIRECTORES: Paula Gómez Pérez

CURSO ACADÉMICO: 2017-2018



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Paz. La nueva era de la imagen digital

**Máster en Gestión y Dirección de Sistemas y Tecnologías de la Información y
las Comunicaciones y de Seguridad de la Información**

RESUMEN

Tras casi 10 años después de su construcción, el pasado 22 de febrero de 2018 se produjo, satisfactoriamente, el lanzamiento y puesta en órbita del satélite español PAZ. Este satélite es parte de la ejecución de PNOTS (Programa Nacional de Observación de la Tierra por Satélite). El objetivo de PAZ es complementar la inteligencia de imágenes satélite que posee el Estado Español. Actualmente, las imágenes usadas en la inteligencia militar provienen, en su mayoría, de participaciones en consorcios como HELIOS (satélite óptico francés, belga, italiano y español que se encuentra próximo a su vida útil) o de la adquisición a proveedores privados. PAZ ha apostado por la obtención de imágenes a partir de un radar de apertura sintética y su entrada en producción es ya una realidad.

Las imágenes obtenidas a partir de radares de apertura sintética necesitan de un tratamiento posterior para poder ser interpretadas correctamente. En muchas ocasiones es necesario su comparación o ampliación con imágenes ópticas procedentes de otras fuentes para poder interpretadas de forma correcta.

El objetivo de este trabajo consiste en la recopilación de información sobre la tecnología en que se basa el satélite PAZ (radar de apertura sintética), la descripción del nuevo satélite y las nuevas capacidades adquiridas por el Estado Español, además de los tratamientos necesarios sobre los productos proporcionados por PAZ para que puedan ser interpretados de forma correcta.

PALABRAS CLAVE

Satélite, Paz, SAR (radar apertura sintética), imagen satélite, inteligencia de imágenes

AGRADECIMIENTOS

Mi primer agradecimiento siempre irá dirigido a Nieves, mi esposa. Aún a sabiendas de lo que supondría, desde el primer momento me ha transmitido todo su apoyo a que yo realizara este curso. Espero algún día poder compensar todo el tiempo que le he robado por dedicarme a esta actividad.

Así mismo, me gustaría agradecer a mi tutora, Paula Gómez Pérez, por aceptar la tutoría y ayudarme a desarrollar todo este trabajo. Además de mostrar una disponibilidad absoluta, sus consejos, orientaciones y comentarios siempre han sido de gran ayuda y, por supuesto, muy acertados.

Por último, mencionar a toda la plantilla de profesores y asociados que, gracias a su dedicación y esfuerzo durante este casi año y medio de Máster, han conseguido que un grupo tan heterogéneo de miembros del Ministerio de Defensa aprendamos las últimas novedades en la gestión de las TIC.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Introducción	7
1.2 Objetivos	9
1.3 Organización de la memoria	9
1.4 Obtención de información.....	9
1.4.1 Fuentes.....	9
1.4.2 Dificultades encontradas.....	9
2 Estado del arte	11
2.1 Captura de imagen satélite	11
2.1.1 TerraSAR-X.....	11
2.1.2 Sistemas ópticos Vs. Sistemas radar.....	11
2.1.3 Momento actual de la imagen satélite en España.	12
3 Teoría básica SAR.....	13
3.1 Radar de Apertura Sintética	13
3.1.1 Objetivo	13
3.1.2 Conceptos básicos.....	13
3.1.3 Formación de la imagen.....	14
4 PAZ. Segmento satélite	19
4.1 Marco del proyecto	19
4.2 Otras cargas útiles	21
4.2.1 Plataforma.....	21
4.3 Órbita	24
4.4 Comunicaciones	25
4.5 Antena	25
5 Otras cargas útiles del satélite	27
5.1 AIS (Sistema de Identificación Automático).....	27
5.1.1 Generalidades	27
5.1.2 Descripción.....	28
5.2 ROHPP (Radio Ocultaciones y Fuertes Precipitaciones con PAZ)	29
6 Segmento terrestre.....	31

6.1 Descripción general.....	31
6.2 Gestión de imágenes	32
7 Conclusiones y líneas futuras	35
7.1 Conclusiones	35
7.2 Líneas futuras	35
8 Bibliografía.....	37
Anexo I: Satélite PAZ. (PNOTS)	39
Anexo II: Satélite INGENIO. (PNOTS).....	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Satélite óptico INGENIO (http://www.aeroespacial.sener/productos/seosat-ingenio-satelite-espanol-de-observacion-de-la-tierra)	9
Figura 2-1 Constelación de TerraSAR-X/TanDEM-S/PAZ (crédito de imagen: Astrium, Hisdesat)....	12
Figura 3-1 Cobertura mundial de nubes (crédito de imagen: https://isccp.giss.nasa.gov/)	13
Figura 3-2 Generación de imagen SAR (http://www.geo.hunter.cuny.edu/terrain/radarii.html)	14
Figura 3-3 Tratamiento imagen SAR (crédito de imagen: https://isccp.giss.nasa.gov/).....	15
Figura 3-4 Visión lateral radar (Fuente: https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/water/Brazil_2017/Day1/S1P2-span.pdf)	15
Figura 3-3 Mecanismos de retrodispersión (crédito de imagen: https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/water/Brazil_2017/Day1/S1P2-span.pdf)	16
Figura 3-1 Esquema de organización PNOTS - PAZ e Ingenio (crédito de imagen: INTA)	19
Figura 4-6 Modos de captura de imagen (Imagen de ESA CASA Espacio)	21
Figura 3-1 Esquema de bloques PAZ (EADS Astrium)	23
Figura 4-3 Órbita Heliosíncrona (https://www.educacionespacial.aem.gob.mx/images_ise/pdf/03mecanica_orbital3.pdf)	24
Figura 3-2 Vistas array X-SAR (Imagen de ESA CASA Espacio)	26
Figura 3-3 Antena X-SAR (Imagen de ESA CASA Espacio)	26
Figura 4-1 Esquema básico de funcionamiento de AIS (VT Explorer)	28
Figura 6-1 Esquema segmento terretre PAZ (Imagen de ESA CASA Espacio)	34
Figura 6-2 Detalle del flujo de información de PAZ (Imagen de ESA CASA Espacio)	34

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Bandas de frecuencia utilizadas (https://www.dlr.de)	16
Tabla 4-1 Recopilación datos básicos de PAZ (recopilada de diversas fuentes internet).....	22
Tabla 4-2 Datos técnicos sobre principales componente (https://directory.eoportal.org)	23

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Desde donde se conoce en nuestra historia, el hombre siempre ha intentado inmortalizar sus momentos congelando el tiempo a modo de imágenes. Gracias a las pinturas ruprestres encontradas en numerosas cuevas, representando escenas de caza y momentos sociales, nos podemos hacer una idea de cómo era la tierra de nuestros antepasados.

Con la aparición del vidrio, muchos han sido los artilugios inventados por el hombre para poder observar a distancia. Desde Copérnico a piratas han tratado de observar a distancia para explorar el universo o sus enemigos. Históricamente siempre hemos intentado observar nuestro entorno ya sea con fines bélicos, científicos, artístico....

En la edad moderna, el hombre buscó de forma incesante la forma de inmortalizar momentos de forma permanente. La aparición de las cámaras oscuras y su posterior evolución hacia las cámaras fotográficas marcaron un hito en la historia de la humanidad.

Tras la invención del aeroplano, poco tardó el hombre en intentar observar la tierra desde otro punto de vista y la fotografía aérea no tardó mucho en aparecer y desarrollarse.

La observación de la tierra y del universo siempre ha fascinado a la humanidad y muchos han sido los recursos invertidos para intentar desvelar qué hay más allá. Desde las primeras misiones al espacio, la observación de nuestro propio planeta y la toma de imágenes desde las diferentes misiones que han fletado las naciones ha sido la tónica habitual.

Dada la potencialidad y discreción que supone la toma de imágenes desde un punto tan remoto como el espacio, las naciones comenzaron a especializar sus satélites y crearon constelaciones con la misión exclusiva de observación de la tierra ya sea con misiones geográficas, meteorológicas, militares.... Uno de los mayores avances conseguidos en la carrera del espacio ha sido en el campo de la observación de la Tierra, donde los avances de los sensores embarcados en los satélites alcanzan desarrollos sorprendentes.

En relación a la Inteligencia Militar, España ha optado por cubrir sus necesidades informativas participando en varios proyectos que contaban con la agrupación de varias naciones europeas para poder tener acceso a este tipo de productos, imagen satélite. En su mayoría, los proyectos en los que España ha participado han ido guiados de la mano de Francia. A cambio, España ha disfrutado de una cuota de uso de la plataforma bajo estrictas normas y restricciones. Actualmente, la cuota a la que tenemos derecho consiste en un 2,5% de participación en el satélite HELIOS II. Además, existen ciertas restricciones en el uso del satélite pactadas entre las naciones o impuestas por Francia, país con mayor cuota de participación en HELIOS II. Además, al tratarse HELIOS de un satélite óptico existe la

limitación de toma de imágenes en zonas nubladas o en horario nocturno. Como contrapartida, las imágenes ópticas de HELIOS gozan de una gran calidad y son fácilmente interpretables.

Durante el mes de julio de 2002 se produjo un punto de inflexión a nivel Nacional que haría replantearse a España su política de observación de la Tierra, vivimos la crisis de “Perejil”. Una dotación marroquí invadió un islote de soberanía española y se realizaron las acciones necesarias para su recuperación. Esta crisis de “Perejil” sirvió al Estado Español y sus Fuerza Armadas para recopilar un catálogo de lecciones aprendidas de los errores y aciertos acaecido durante esos días. Una de las lecciones fue que no podemos depender de terceras naciones para la obtención de imágenes satélite para la elaboración de inteligencia militar de carácter estratégico o táctico. Debíamos tener una fuente de observación satélite propia y sin restricciones.

En este contexto, el 26 de julio de 2007, el Ministerio de Defensa y el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España firmaron un Acuerdo Marco para el desarrollo, financiación, puesta en órbita y explotación de PNOTS (Programa Nacional de Observación de la Tierra por Satélite). PNOTS daría independencia a España en materia de toma de imágenes desde satélite con respecto a otras naciones. Este programa incluye el lanzamiento de dos satélites complementarios, uno de carácter radar y otro de carácter óptico. PAZ es el resultado de la primera parte de este programa.

”INGENIO” es el nombre que se le ha dado al satélite dotado de sensores ópticos en PNOTS. INGENIO ya ha sido desarrollado y construido por la empresa SENER. Actualmente, INGENIO se encuentra pendiente de su lanzamiento y puesta en órbita. INGENIO está concebido para la observación de la tierra desde un punto de vista civil y no militar y el Ministerio de Defensa apenas tiene participación en este proyecto. Este sensor estará gestionado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI, adscrito al Ministerio de Economía Industria y Competitividad). Ver anexo 1 “INGENIO” [1].

“PAZ” es el nombre que se ha elegido para el satélite con sensores radar en PNOTS. Se trata de satélite con un radar de apertura sintética (SAR), como sensor principal, que trabaja en banda X orientado tanto a un uso militar en los campos de seguridad y defensa como a usos civiles. PAZ ha sido desarrollado e implementado por EADS-CASA Espacio en España. El desarrollo se ha realizado en base al satélite TERRASAR-X, desarrollado por EADS Astrium GmbH. PAZ es gestionado por HISDESAT (HISDESAT Servicios Estratégicos, S. A), una compañía española privada de comunicaciones.

INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial), es el encargado de la gestión del segmento terreno de las dos misiones, PAZ e INGENIO. INTA e HISDESAT han sido los responsables de la puesta en órbita y operación de PAZ y, en un futuro próximo, de INGENIO. Airbus Defence and Space Spain (anterior EADS CASA Espacio) es el contratista principal que lidera los consorcios industriales de PAZ e INGENIO.

Se estima que PAZ ha costado un total de 160 millones de euros.

Con la puesta en órbita de PAZ, España se ha convertido en el tercer país que cuenta con esta tecnología junto con Alemania e Italia.



Figura 1-1 Satélite óptico INGENIO (<http://www.aeroespacial.sener/productos/seosat-ingenio-satelite-espanol-de-observacion-de-la-tierra>)

1.2 Objetivos

Este trabajo está basado en la recopilación de información diversa relacionada con la teoría radar de apertura sintética (SAR) y su implementación práctica en el satélite PAZ. Los objetivos a alcanzar son:

- Descripción básica de la teoría radar de apertura sintética.
- Estado del arte de la inteligencia de imágenes satélite en España.
- Recopilación de las Capacidades de PAZ.

1.3 Organización de la memoria

Es trabajo está dividido en dos grandes grupos de información, uno relacionado con la descripción básica de la teoría del radar de apertura sintética y otra centrada en la especificación del satélite PAZ.

1.4 Obtención de información

1.4.1 Fuentes

Toda la información relacionada con este estudio ha sido obtenida de fuentes abiertas. El trabajo está basado en la sintetización de información obtenida de consultas a páginas oficiales de internet y entrevistas a personal analista de imágenes SAR.

1.4.2 Dificultades encontradas

Una las principales dificultades que se ha encontrado a la hora de realizar el estudio ha sido que mucha de la información a la que se ha tenido acceso se encuentra en idioma inglés. Tampoco se ha tenido acceso al propio satélite ni se ha contactado con el segmento terrestre encargado de la gestión del Sistema.

Otro problema añadido ha sido que al tener que compaginar el trabajo diario, en muchas ocasiones con horarios impredecibles, con la realización del estudio ha provocado la falta de tiempo necesario para la consecución de los objetivos inicialmente previstos. Todas estas dificultades han provocado que la tentativa de objetivos iniciales haya tenido que ser disminuída.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Captura de imagen satélite

2.1.1 TerraSAR-X

Debido a lo novedoso del sistema PAZ se desconoce si existen trabajos similares o más profundos sobre el sistema. La información a la que se ha tenido acceso sobre el sistema, en fuentes abiertas, es bastante escasa y poco profunda en los detalles. En cualquier caso, PAZ está diseñado en base a un sistema de origen alemán denominado TerraSAR-X, cuya descripción en detalle se puede consultar en [5]. Podríamos decir que PAZ es un “hermano gemelo” de este sistema.

Sobre teoría SAR existen infinidad de publicaciones que tratan el tema. Debido a que el objetivo de este trabajo no es profundizar en estos temas, se ha accedido a información básica obtenida de fuentes abiertas.

2.1.2 Sistemas ópticos Vs. Sistemas radar

No cabe duda de que, sin un procesamiento previo, la interpretación de imágenes satélites de carácter óptico es mucho más sencilla que la ofrecida por las imágenes obtenidas a partir de un radar de apertura sintética. En ambos casos, la toma de la imagen se obtiene desde una visual de la parte superior de los objetos, pero los resultados obtenidos difieren mucho entre ellos.

Una diferencia trascendental entre los sistemas ópticos y los sistemas radar radica en que los sistemas ópticos deben ser operados en condiciones de visibilidad idóneas. No es posible obtener imágenes ópticas en condiciones de baja visibilidad debida a nubes, lluvia o noche, por ejemplo. Esta circunstancia provoca que haya zonas del mundo en las que resulta extremadamente difícil obtener imágenes satélite ópticas (por ejemplo, la franja del Ecuador). En cambio, debido a la idiosincrasia de los sistemas SAR, podemos obtener imágenes con cualquier condición climatológica, tanto de día como de noche.

Otra diferencia que encontramos entre los diferentes sistemas de toma de imágenes es que, dependiendo de la naturaleza de las superficies a fotografiar, se pueden discriminar la naturaleza de los objetos mejor en sistemas SAR que en sistemas ópticos. Como ejemplo de estas superficies encontramos los suelos húmedos, el hielo, las olas del mar, los bosques y masas de vegetación, las construcciones realizadas por el hombre como edificios. Este efecto es debido al comportamiento de las ondas electromagnéticas al interactuar con estos objetos. Esta especial interacción de las ondas electromagnéticas en función de los objetos se va a provechar, por ejemplo, para la detección y seguimiento de vertidos oleaginosos en el mar.

Al igual que los sistemas ópticos, los radares de apertura sintética también han sido utilizados para explorar más allá de la Tierra. La NASA (National Aeronautics and Space Administration) se planteó fotografiar y estudiar la geología del planeta Venus. A esta misión se le dio el nombre de MAGELLAN (1990-92). La NASA utilizó un sistema SAR en banda S, 2 GHz, que proporcionaban imágenes de 100m de resolución. Esta misión tenía como objetivo principal obtener imágenes del planeta Venus. Una característica de Venus es que se encuentra cubierto de nubes de forma permanente lo que descartó un sistema de toma de imágenes óptico desde el primer momento ya que no hubiera sido posible la obtención de ninguna imagen aprovechable.

2.1.3 Momento actual de la imagen satélite en España.

La toma de imágenes satélite se ha convertido en una vía más de negocio para grandes corporaciones. Muchas naciones y servicios de inteligencia optan por la compra de imágenes satélite para cubrir sus necesidades de inteligencia, geológico, geográfico, medioambiental... Dependiendo de la resolución requerida, la venta de imágenes satélite puede alcanzar precios al alcance de sólo algunos bolsillos privilegiados.

A través de una conexión a internet, Alphabet Inc ha puesto a disposición de cualquier persona el acceso a una colección de imágenes satélites de todo el planeta de forma gratuita, GOOGLE MAPS. Google ha utilizado una familia de satélites denominados LANDSAT X para recopilar su colección de imágenes. Entre los últimos dispositivos utilizados se encuentra el satélite LANDSAT 7, que proporcionaba imágenes con una resolución de 15 metros (por píxel) y LANDSAT 8 con resoluciones similares pero un espectro más ensanchado [2], [3]. Está previsto que la NASA se embarque en el lanzamiento de un nuevo satélite, LANDSAT 9, en el año 2020.

Hasta finales de la última década del siglo pasado, la obtención de imágenes satélite se restringía a un número muy limitado de privilegiados países. España tuvo esta capacidad limitada hasta el año 1995 donde se produjo el lanzamiento del satélite óptico HELIOS IA. En este satélite, Helios IA, España colaboró con un consorcio de varios países europeos con una participación de un 7.5%.

Tras la puesta en órbita de PAZ, TerraSAR-X y TanDEM-X, de propiedad alemana y PAZ, de propiedad española, formarán una constelación de satélites SAR de alta resolución. La adición de PAZ reducirá el tiempo de revisión y aumentará la capacidad de adquisición. Los tres satélites contarán con franjas terrestres y modos de adquisición exactamente idénticos. La nueva configuración será explotada conjuntamente por Hisdesat y Airbus Defence and Space [4].



Figura 2-1 Constelación de TerraSAR-X/TanDEM-S/PAZ (crédito de imagen: Astrium, Hisdesat)

3 TEORÍA BÁSICA SAR

3.1 Radar de Apertura Sintética

3.1.1 Objetivo

El objetivo de este apartado es conocer las bases tecnológicas de los Radares de Apertura Sintética (SAR, *Synthetic Aperture Radar*) sin profundizar en detalles técnicos para comprender cómo se realiza la función principal de PAZ: captura de datos que conformen una imagen susceptible de ser interpretable.

3.1.2 Conceptos básicos

Los sensores ópticos como INGENIO o HELIOS realizan su función de captura de imágenes en base a la medición de la luz solar reflejada sobre los objetos. Al no necesitar emitir energía para la obtención de las imágenes se les denomina sensores pasivos. Este tipo de sensores tiene el gran inconveniente de que sólo pueden obtener imágenes en el espectro visible de día. Además, la superficie terrestre no es observable por medios ópticos cuando hay nubes. Existen zonas de la Tierra que están cubiertas por nubes prácticamente todos los días del año con lo que la dificultad de obtener una imagen óptica es elevada.

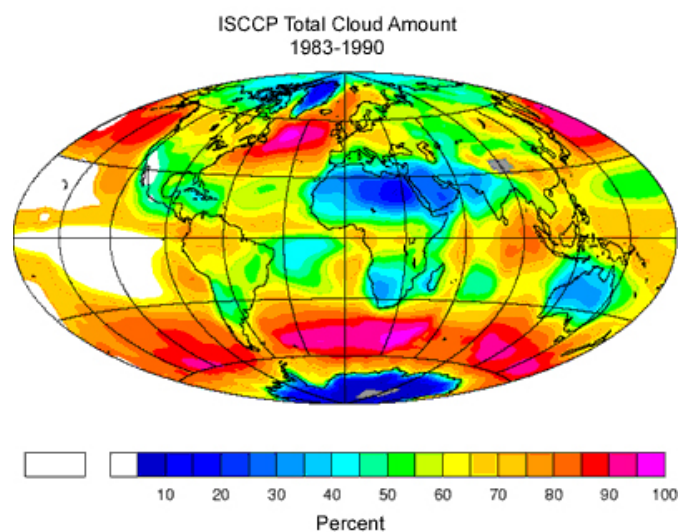


Figura 3-1 Cobertura mundial de nubes (crédito de imagen: <https://isccp.giss.nasa.gov/>)

Una característica de las ondas en la banda de las microondas es que, en función de su longitud de onda o frecuencia, pueden penetrar a través de las nubes, líquidos o incluso la vegetación. Esta propiedad se produce independientemente si nos encontramos de día o de noche.

Como se ha descrito anteriormente, alguna de las ventajas que tiene la teledetección radar sobre la óptica es que funciona en condiciones de meteorología adversa, permite la observación diurna y nocturna, tiene cierta capacidad de penetración sobre la vegetación, es sensible a las propiedades dieléctricas de la superficie de los objetos (la energía no se refleja de forma similar sobre el agua congelada o sin congelar) y es sensible a la estructura de los componentes de la superficie. También es cierto que el uso de sistemas activos ofrece desventajas como puede ser la dificultad de interpretar la información en muchas ocasiones, el efecto *speckle* (granulado de las imágenes) [5] o la distorsión que presentan las imágenes en zonas con orografía irregular. Además, los sistemas activos necesitan energía para la generación de las ondas.

3.1.3 Formación de la imagen

PAZ trabaja con un radar de apertura sintética en la banda X. El sistema radar que utiliza es un radar pulsado. La imagen se compone básicamente midiendo los tiempos (distancias) e intensidades de la energía de los ecos del radar devuelta por los objetos. Cada pixel en la imagen radar representa una cantidad compleja de energía reflejada de vuelta al satélite. El brillo de cada pixel representa la intensidad de la señal reflejada. El radar mide la amplitud (la magnitud del eco reflejado), polarización y la fase de la señal recibida, de la que únicamente se intercepta parte del eco reflejado en la dirección de la antena.

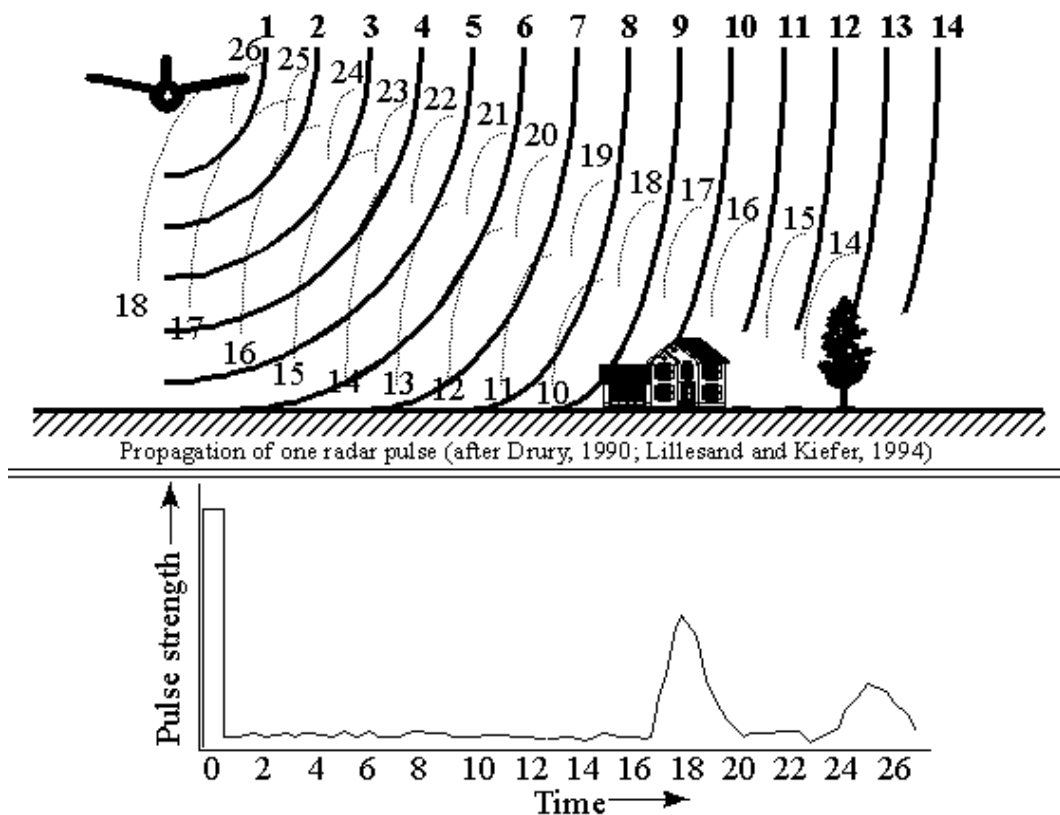


Figura 3-2 Generación de imagen SAR (<http://www.geo.hunter.cuny.edu/terrain/radarii.html>)

La imagen se forma por la representación sucesiva de líneas correspondientes a la energía recibida por la emisión de pulsos. En función de la energía recibida, los píxeles se representarán de forma más o menos brillantes. Así, al iluminar los objetos de forma lateral, la ladera de una montaña recibirá la energía proveniente de nuestro radar de forma muy perpendicular con lo que la energía rebotada a nuestro sensor será de mucha intensidad. Esto provoca que, por ejemplo, el lateral iluminado de una alta montaña se represente como una zona muy brillante de la imagen, pero muy pequeña en relación a su proporción real. Este tipo de comportamientos hace que el tratamiento posterior de las imágenes sea fundamental para la realización de una correcta interpretación. En la figura 3-3 podemos observar cómo la imagen de la izquierda presenta franjas estrechas y brillantes que una vez tratadas dan como resultado el relieve real (imagen de la derecha).

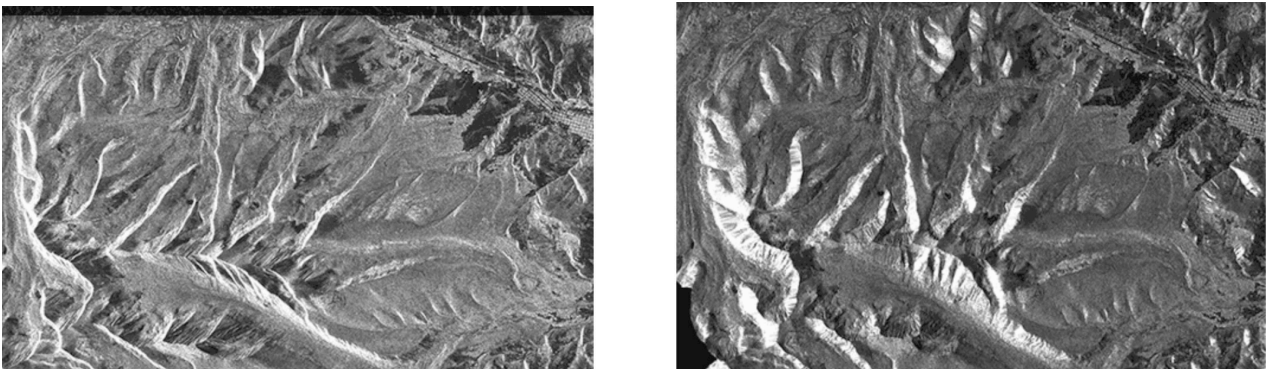


Figura 3-3 Tratamiento imagen SAR (crédito de imagen: <https://isccp.giss.nasa.gov/>)

Los radares SAR son sistemas de visión lateral. En el caso de PAZ, las tomas se realizan con visión a la derecha. El satélite podría variar su posición para reorientar su visión al lado izquierdo pero esta maniobra está previsto que se realice en muy contadas ocasiones. El motivo es que PAZ perdería energía y tiempo en colocarse en posición para realizar esta medición.

La razón por la que los sistemas SAR trabajen conformando sus imágenes de forma lateral es por que si las tomaran de forma vertical se producirían incongruencias de tiempo ya que diferentes objetos simétricos en el mismo plano producirían ecos a la misma distancia (tiempo) del sensor con lo que la imagen resultante no sería fiel. El sistema dibujaría un único objeto en vez de dos. Los objetos se enmascararían unos a otros. [6]

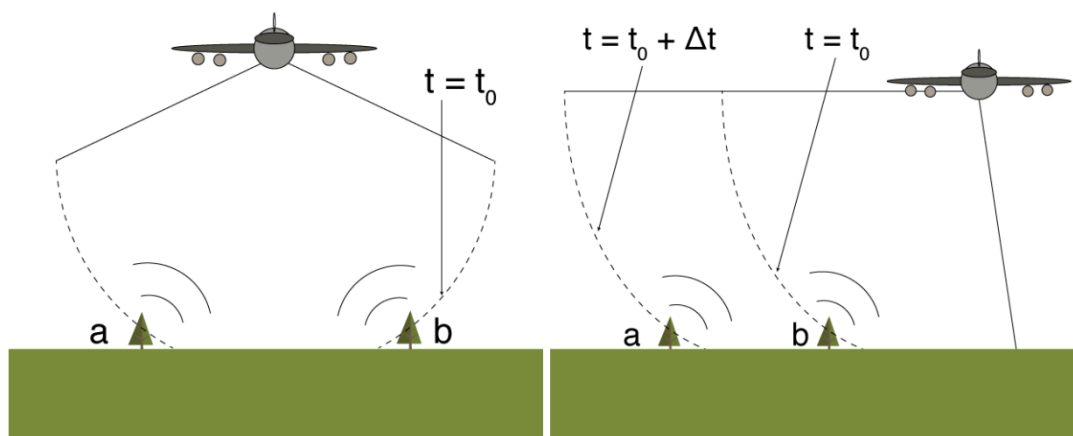


Figura 3-4 Visión lateral radar (Fuente: https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/water/Brazil_2017/Day1/S1P2-span.pdf)

En función de la longitud de onda, la señal va a penetrar más o menos en los diferentes materiales. La penetración a través de la vegetación o el suelo es proporcional al tamaño de la longitud de onda. A mayor longitud (frecuencias más bajas), mayor penetración. Como ejemplo, la banda L es la ideal para el estudio de humedales porque la señal penetra a través de la cubierta de vegetación y permite obtener información de las áreas inundadas que existan debajo. Ver Tabla 3-1.

Banda	Frecuencias	Aplicaciones
VHF	300 Khz-300 Mhz	Follaje, penetración del suelo, biomasa
P	300 Mhz- 1 Ghz	Biomasa, humedad del suelo.
L	1 Ghz – 2 Ghz	Agricultura, gestión forestal, humedad del suelo
C	4 Ghz – 8 Ghz	Océano, agricultura
X	8 Ghz – 12 Ghz	Agricultura, océano, radar de alta resolución
Ku	14 GHz – 18 GHz	glaciología (mapeo de la cubierta de nieve)
Ka	27 GHz – 47 GHz	radares de alta resolución

Tabla 3-1 Bandas de frecuencia utilizadas (<https://www.dlr.de>)

Denominamos retrodispersión a la energía que rebota en los objetos que iluminamos y somos capaces de captar con nuestros sensores. Ver Figura 3-3. Una característica de la señal de radar es que es sensible a la estructura de la superficie de los objetos. La señal radar es sensible a la estructura de la superficie sobre la que incide. En relación a la escala de las variaciones de la superficie a la longitud de onda, si una superficie es de características ásperas, se representará en nuestra imagen de forma más brillante que si iluminamos una superficie lisa, que se representará en tonos más oscuros. El motivo es que la superficie de carácter liso rebotará menos energía en dirección a nuestro sensor que una rugosa. La retrodispersión de una superficie rugosa es superior a la de una lisa (por ejemplo, una carretera o un curso de agua se representará de forma muy oscura).

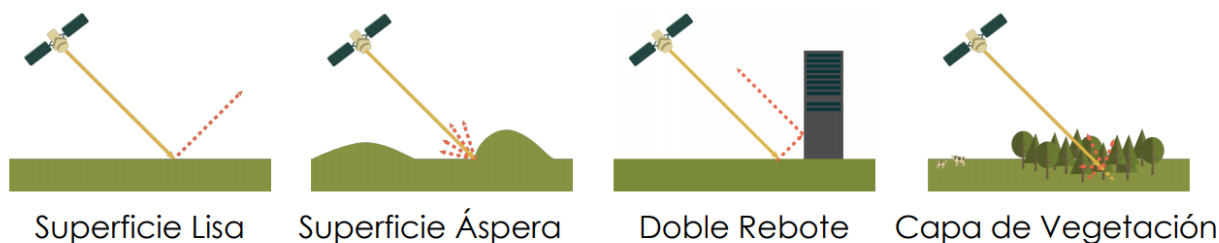


Figura 3-5 Mecanismos de retrodispersión (crédito de imagen: https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/water/Brazil_2017/Day1/S1P2-span.pdf)

La resolución en distancia de este tipo de radar se calcula en base al ancho de pulso que emitamos. Cuanto mayor sea la duración de nuestro pulso, mayor riesgo corremos de que dos objetos próximos se

representen como un único objeto en nuestra imagen. La separación mínima entre dos objetos para que sea representada de forma separada en nuestro radar debe ser la correspondiente a medio ancho de pulso.

La resolución en azimut es función del ancho del haz. A su vez, el ancho de haz depende de las dimensiones de nuestra antena. Cuanto mayor sea la dimensión longitudinal de nuestra antena, mayor es nuestra resolución en distancia. En este sentido, podemos encontrar dos situaciones, radares que formen su haz en función de las dimensiones reales de su antena (radares de apertura real) o radares que sinteticen la longitud efectiva de la antena (radares de apertura sintética).

Aunque la teoría SAR no es el objetivo principal de este trabajo, todos los conceptos tratados en este punto se pueden ampliar, de forma básica, en [6].

4 PAZ. SEGMENTO SATÉLITE

4.1 Marco del proyecto

El diseño y fabricación de PAZ se contrató a la empresa Airbus Defence & Space España (antes EADS Astrium Casa), lo que ha supuesto una ocasión sin precedentes para la industria espacial española, al ser la primera vez que se asumía en nuestro país el reto de construir un satélite de este tamaño y complejidad.

El marco institucional/industrial sobre el que se desarrolló el proyecto de PAZ fue el siguiente:

- CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial) es el agente de financiamiento de PNOTS y es responsable de los aspectos programáticos del programa.
- Astrium España (o EADS CASA España) es el contratista principal, responsable de desarrollar y construir el satélite. La construcción de PAZ se inició en 2011. El plazo de construcción se estimó en 48 meses.
- El INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial o Instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial) es responsable del segmento terrestre, que incluye dos estaciones de control: una en Torrejón cerca de Madrid y la otra en Maspalomas, ubicada en la isla de Gran Canaria. Tras su lanzamiento y durante el primer mes de vuelo, PAZ ha sido controlado desde Alemania.
- Hisdesat es el operador del satélite, responsable de toda la explotación comercial. Aunque el sistema dará servicio a otros Ministerios y compañías, el Ministerio de Defensa español es el principal cliente de Hisdesat y uno de los principales beneficiarios de las capacidades del satélite.

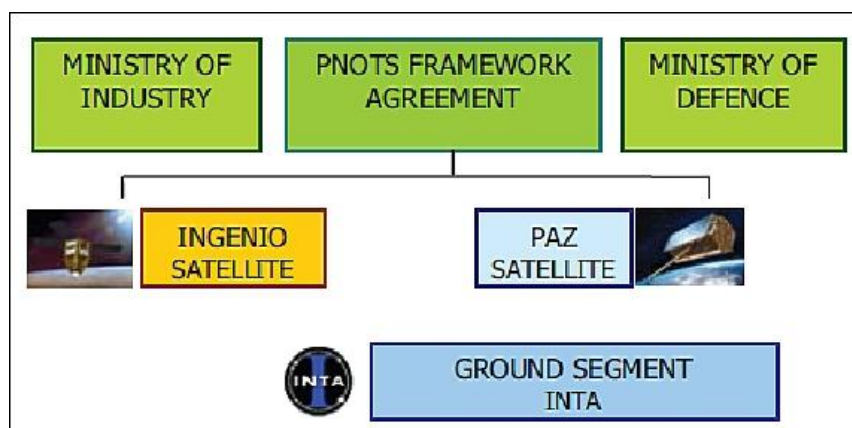


Figura 4-1 Esquema de organización PNOTS - PAZ e Ingenio (crédito de imagen: INTA)

En el proyecto han colaborado un consorcio de 15 empresas y 3 universidades, todas ellas nacionales, implicadas en la fabricación de distintas partes y componentes que ha resultado todo un éxito.

La construcción de Paz comenzó en el año 2011. En el año 2013, las compañías HISDESAT y ASTRIUM dan por finalizada la integración de los elementos y construcción del satélite. La fase de validación y verificación del segmento terrestre se lleva a cabo en el verano de 2014. El Conjunto del proyecto del satélite PAZ se da por finalizado en 2015. Desde este momento, Airbus mantiene el satélite en sus salas limpias de Barajas (Madrid) y tras haber finalizado todas las pruebas medioambientales, PAZ estaba listo para despegar. En aquel entonces, Hisdesat alcanzó un acuerdo con la compañía rusa Kosmotras, quien se comprometió a poner en órbita el satélite español. En 2015, PAZ viajó a Rusia, desde donde debería haber sido lanzado al espacio desde el cosmódromo kazajo de Baikonur en un cohete del tipo Dnepr. Sin embargo, la llegada de PAZ coincidió con el inicio de las tensiones diplomáticas entre Rusia y Ucrania que provocaron que su puesta en órbita se fuera demorando de forma indeterminada.

En el 2017, Hisdesat decidió llevar a la compañía rusa Kosmotras a la corte de arbitraje internacional por incumplimiento de contrato, esperando poder recuperar parte del dinero perdido por el retraso. Al mismo tiempo, la empresa española se puso en contacto con SpaceX, quien finalmente accedió a lanzarlo.

Su desplazamiento se realizó en un avión Antonov AN-124-100 adaptado de Volga Dnepr Airlines, que partió desde la base aérea de Torrejón (Madrid), el 28 de diciembre de 2017, llegando a California el día 29 de diciembre.

El lanzamiento de PAZ se produjo el día 22 de febrero de 2018 a las 14:17 UTC desde la Base área de Vandenberg (California). Para su puesta en órbita se utilizó un cohete Falcon 9 v1.2 Full Thrust fabricado por SpaceX. Se trata de un cohete de dos etapas impulsado por oxígeno líquido (LOX) y queroseno para cohetes (RP-1) densificado. Además de la puesta en órbita de PAZ, el lanzamiento se aprovechó para el despliegue de dos satélites STARLINK, en modo de pruebas, con el objetivo de proporcionar Internet de banda ancha desde esta órbita.

Aunque la primera imagen de PAZ no se recibe hasta el 13 de marzo de 2018, no se anuncia de forma pública la entrada en servicio hasta el día 6 de septiembre de 2018.

PAZ está destinado, no sólo a cubrir las necesidades de seguridad y defensa, sino también otras de carácter civil, pudiendo tomar más de 100 imágenes diarias de hasta 25 cm de resolución, tanto diurnas como nocturnas, y con independencia de las condiciones meteorológicas. Diseñado para una misión de cinco años y medio, cubrirá un área de más de 300.000 kilómetros cuadrados al día. Estará preparado para dar quince vueltas diarias a la Tierra, a una altura de 514 kilómetros y con una velocidad de siete kilómetros por segundo. Dada su órbita cuasi-polar ligeramente inclinada, PAZ cubrirá todo el globo con un tiempo medio de revista de 24 horas. [8]

Su peso total estimado es de 1400 kg., mide 5 m. de altura y tiene 2,4 m. de diámetro. El radar se ha desarrollado de manera muy flexible, con capacidad para operar en gran número de configuraciones que permitirán escoger las prestaciones de la imagen. Dispone de una memoria para imágenes de 256 GB y una capacidad de transmisión de las mismas a tierra de 300 Mbits/s en banda X.

Cuenta con un radar electrónico de configuración desde tierra que puede trabajar en diferentes modos, que combinan resolución y tamaño de imagen. Inicialmente PAZ se diseñó para trabajar en tres modos diferentes en función de las necesidades informativas, extensión de la zona de interés y resolución necesaria:

- **Spotlight:** resolución hasta de 1 metro y áreas de 5×5 Km.
- **Stripmap:** resolución hasta de 3 metros y áreas de 30×50 Km.
- **Scansar:** resolución de hasta 18,5 metros y áreas de 100×150 Km.

Actualmente se están estudiando otros dos modos, el *staring spotlight* de muy alta resolución, hasta 25 cm., y el *wide swath scanradar* que permite cubrir áreas de 270×200 km.

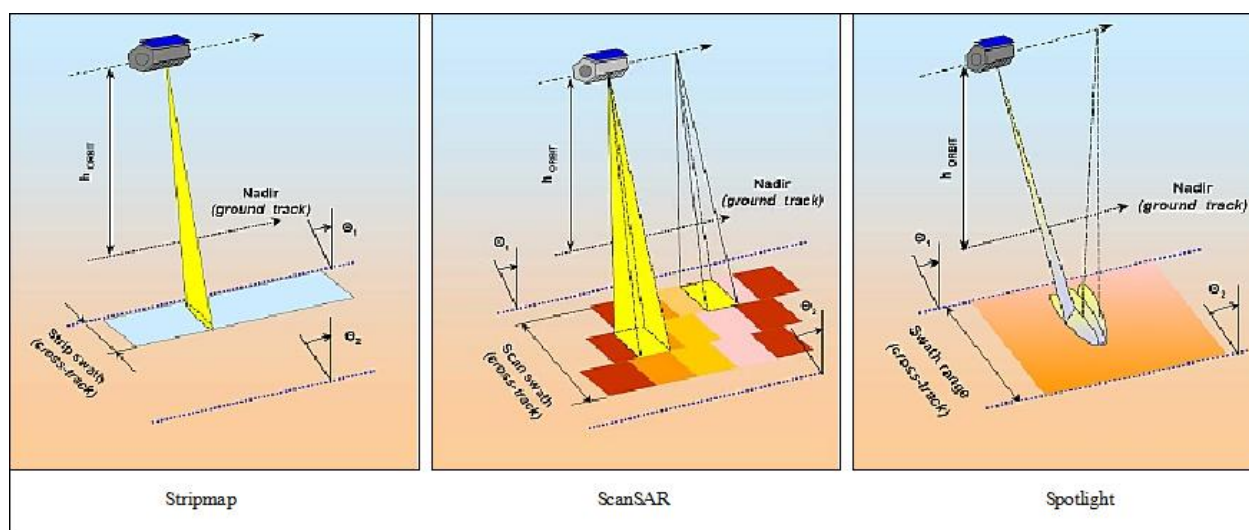


Figura 4-2 Modos de captura de imagen (Imagen de ESA CASA Espacio)

4.2 Otras cargas útiles

Incluido en la carga de PAZ se ha incluido el sistema AIS (Automatic Identification System) en su versión exactView-8 (EV-8). Se trata de un sistema de identificación de barcos de última generación desarrollado por la empresa canadiense exactEarth, de la que Hisdesat es el mayor accionista. Este sistema va a permitir que, por primera vez, se puede realizar una fusión de datos SAR (Radar de apertura sintética) y AIS captados de forma simultánea, lo que permite disponer de la mejor monitorización posible del entorno marítimo en todo el mundo. Los procesadores se han desarrollado en colaboración con el Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Alcalá de Henares.

También en la vigilancia marítima, Hisdesat ha desarrollado, en colaboración con INDRA, un procesador de detección de anomalías basado en la tecnología AIS que permite realizar la vigilancia de cualquier incidente en un área de interés definida durante un tiempo establecido. Los comportamientos que se reportan son, entre otros, la vigilancia de un área informando de los barcos que se encuentran en la misma, interceptación de un barco en una zona próxima definida, barcos parados en la mar, velocidades anómalas de barcos, agrupamientos de barcos, entradas y salidas de puertos, etc.

4.2.1 Plataforma

Muchos de los componentes de PAZ (módulo de servicios, plataforma y back-end de instrumentos) están basados en el satélite alemán TerraSAR-X y TanDEM-X. La plataforma o bus del satélite, donde se aloja la carga útil del satélite (*payload*), ha sido fabricado por Airbus Defence and Space Geo-Intelligence/Infoterra GmbH de Friedrichshafen, Alemania (anteriormente EADS Astrium GmbH). La plataforma se entregó a Airbus DS, España (anteriormente EADS CASA Espacio) para una mayor integración con el front-end del SAR de PAZ, incluida la antena.

La plataforma AstroBus está diseñada como un cuerpo con forma hexagonal, con paneles laterales en un ángulo de 60°. El peso total del satélite ronda 1400 kg y sus dimensiones son de 5 metros de largo por 2.4 metros de diámetro. El conjunto lleva incorporado un brazo desplegable para colocar la antena de enlace descendente de banda X, para la transmisión de datos.

Característica	Valor
Peso	1350 Kg.
Longitud	5 m.
Diámetro	2.4 m.
Vida prevista	5.5 años
Órbita	Helio-síncrona
Velocidad	7 Km/s
Altura	514 Km.
Memoria del satélite	256 GB.
Velocidad de transmisión	300 Mb/s

Tabla 4-1 Recopilación datos básicos de PAZ (recopilada de diversas fuentes internet)

La parte de la estructura hexagonal está compuesta de CFRP (*Carbon fiber reinforced polymer*) como elemento principal de carga. Tres lados del hexágono están poblados con equipos electrónicos, mientras que el lado orientado hacia el sol incorpora la matriz solar. La antena SAR está montada en uno de los lados del hexágono, que en posición de vuelo apunta a 33.8° del nadir. El otro lado que mira el nadir está reservado para el alojamiento de:

- Una antena TT&C (*telemetry, tracking, and commanding*) de banda S.
- Una antena de enlace descendente de datos SAR (transportada por un brazo desplegable de 3,3 m de longitud para evitar interferencias de RF durante la captura simultánea de imágenes de radar y transmisión de datos a tierra).
- Un LRR (Reflector retro láser) para apoyar la determinación precisa de la órbita.

Se ha desarrollado un sistema llamado ICDE (*Integrated Control and Data System Electronics*) destinado a gestionar todos los servicios de aviónica de PAZ. ICDE consta de dos módulos de procesador redundantes de 32 bits, que implementan el procesador ATMEL ERC32SC (núcleo de computación integrado en tiempo real - chip único de 32 bits), lo que le otorga un rendimiento de procesamiento de más de 18 MIPS y suficiente capacidad de memoria para manejar el AOCS (*Attitude and Orbit Control Subsystem*) y tareas de software de manejo de datos, dejando márgenes suficientes en rendimiento y capacidad de memoria para futuras ampliaciones o redundancias. Un módulo dedicado de reconfiguración redundante en caliente proporciona todas las funciones necesarias de vigilancia, reconfiguración, comando y telemetría. Los módulos ICDE son de acoplamiento cruzado, lo que proporciona una unidad completamente redundante [9].

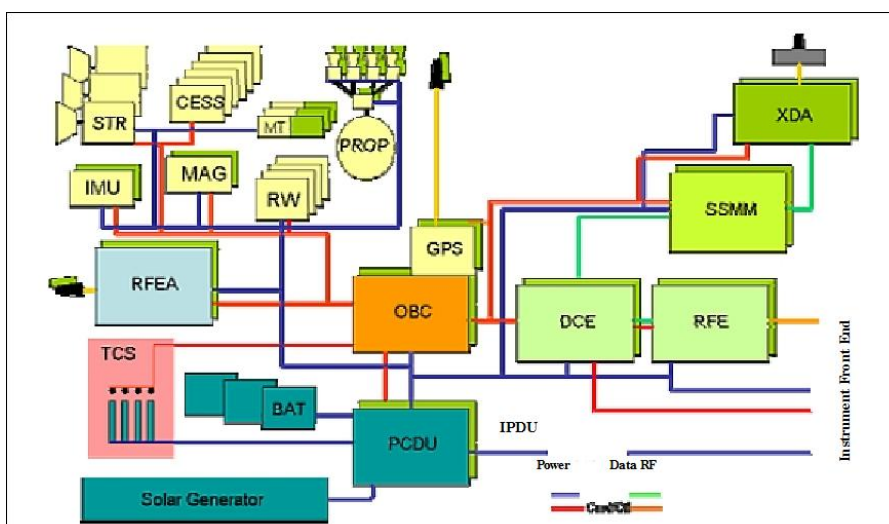


Figura 4-3 Esquema de bloques PAZ (EADS Astrium)

El ICDE (Integrated Control and Data System Electronics) proporciona las interfaces de la plataforma y la carga útil con los siguientes protocolos de enlace estándar:

- Bus MIL-1553
- HDLC
- SpaceWire

PAZ está dotado con un sistema GPS que le permite adquirir y rastrear de forma independiente hasta ocho satélites GPS. El satélite obtiene de este sistema los datos de posición, velocidad y tiempo. El ICDE utiliza full duplex UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) para la conexión de todos los equipos "inteligentes" del sistema, excepto el experimento LCT, donde se está utilizando un bus MIL-STD-1553B.

Característica	Valor
EPS (Subsistema de energía eléctrica)	5.25 m ² . Celdas GaAz de triple unión. Baterías de ión-litio 108 Ah
Manejo de datos	Procesador OBC: ERC 32 RAM / EEPROM: 6/4 MByte Memoria dedicada HK: 2 Gbit
Comunicaciones de radiofrecuencia	Enlace ascendente (banda S cifrada), velocidad de datos = 4 kbit/s Enlace descendente (banda S), velocidad de datos = 32 kbit/s o 1 Mbit/s Enlace descendente en banda X de datos SAR: 300 Mbit/s Capacidad de almacenamiento de datos a bordo: > 256 Gbit (EOL)
Comunicaciones de radiofrecuencia	Enlace ascendente (banda S cifrada), velocidad de datos = 4 kbit/s

Tabla 4-2 Datos técnicos sobre principales componente (<https://directory.eoportal.org>)

4.3 Órbita

PAZ recorre una órbita helio-síncrona. Las órbitas helio-síncronas o SSO (*Sun Synchronous Orbit*) son un caso particular de órbita LEO (*Low Earth Orbit*). En este tipo de órbitas la velocidad de regresión nodal es igual a la velocidad angular de giro de la Tierra en torno al Sol. Para estas órbitas la orientación del plano orbital respecto a la dirección del Sol se mantiene casi constante. Esto implica que los satélites sobrevuelan cada latitud a la misma hora solar, en el tramo ascendente, y a otra misma hora solar en el plano descendente. El ángulo entre el plano orbital y la dirección Sol-Tierra es constante [7]. Dos características de este tipo de órbitas SSO consisten en que:

- No se producen eclipses en ningún momento.
- Para satélites de observación, siempre se toman los datos en las mismas condiciones.

En el caso concreto de PAZ, se trata de una órbita casi polar con una inclinación de 97.44° a una altura de 514 kilómetros. Esta inclinación hace que PAZ repita su paso por una misma latitud determinada en el mismo tiempo solar. En este caso, la hora local del nodo ascendente de PAZ serán las 18 horas. El satélite revisita el mismo punto del globo terrestre cada 11 días. A la velocidad y altura a la que se desplaza, PAZ realiza 167 órbitas en cada periodo orbital, y 15 vueltas a la Tierra cada 24 horas (15 y $\frac{2}{11}$ órbitas cada día). Esto supone que PAZ se desplaza a una velocidad de 7 Km/s. En cada órbita PAZ emplea una hora y media. Este movimiento le permite a PAZ realizar un máximo de 100 imágenes al día.

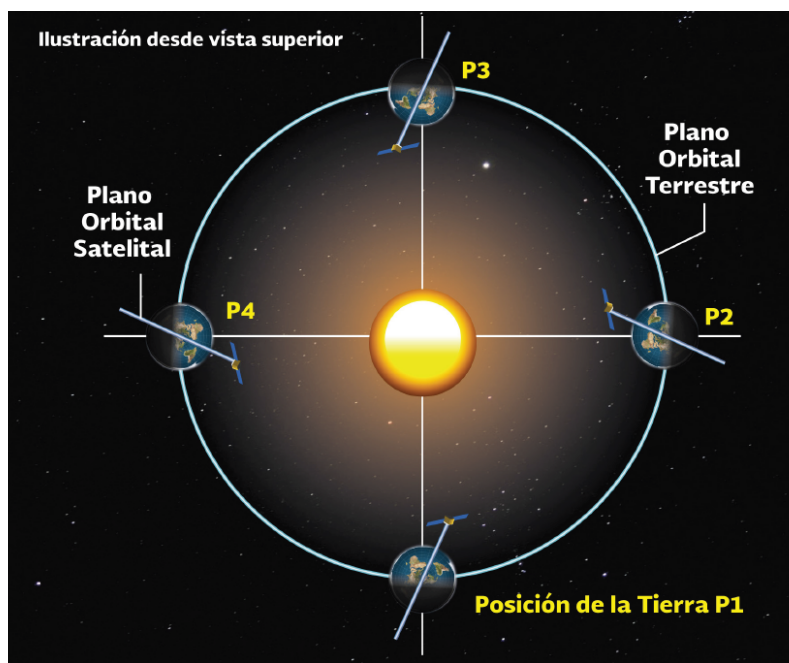


Figura 4-4 Órbita Heliosíncrona

(https://www.educacionespacial.aem.gob.mx/images_ise/pdf/03mecanica_orbital3.pdf)

PAZ siempre sobrevolará un mismo punto de la Tierra en el mismo momento del día o de la noche. Este momento serán las 18:00 horas.

Por norma general, los satélites con misiones similares a la de PAZ se encuentran en órbitas por encima de los 650 Km. La órbita de PAZ, así como la de TerraSAR-X y TanDEM-X, se encuentra a 514 km de altura. La razón es que los satélites basados en radar necesitan estar lo más cerca posible de la superficie para que el haz de microondas que disparan, cuyo rebote registran y analizan, pierda la menor intensidad posible. A cambio, a esta altura el rozamiento atmosférico es más importante y PAZ deberá utilizar más tiempo y combustible que otros satélites más lejanos en mantener su altura orbital.

Otros satélites radar optan por orbitar más lejos, aunque necesariamente a costa de menor resolución espacial. Sentinel-1, el satélite SAR de Copernicus, por ejemplo, orbita a 690 km (como comparación, Sentinel-2 orbita a 785 km, este sí bastante a salvo del rozamiento atmosférico), pero también hay que considerar que utiliza la banda C de microondas, con una longitud de onda de 6 cm, frente a los 3 cm de la banda X de PAZ. Como a mayor longitud de onda menor energía, en la banda C es menos costoso producir el haz de microondas con el que iluminar la escena y es posible alejarse un poco más manteniendo una intensidad equivalente sobre el terreno.

4.4 Comunicaciones

El sistema de comunicaciones utilizado en el satélite para las labores de telemetría, seguimiento y comando utiliza un sistema estándar TT&C (*telemetry, tracking, and commanding*) con cobertura de 360°. La información obtenida por PAZ se almacena en una memoria SSMM (*Solid State Mass Memory*) de 256 Gbit EOL. Previamente, la información es comprimida utilizando un algoritmo BAQ (*Block Adaptive Quantization*). El factor de compresión se puede seleccionar entre 8/6, 8/4, 8/3 o 8/2 (las técnicas más eficientes solo se pueden aplicar a imágenes SAR procesadas). La tasa de transmisión es de 300 Mbit/s a través del XDA (*X-band Downlink Assembly*). [8]

Ambos enlaces, ascendente y descendente, se han diseñado de acuerdo con el Estándar de Telemetría de Paquetes CCSDS de la ESA.

PAZ dispone de un brazo desplegable de 3.3 metros de longitud en el que va montada la antena para banda X. El objetivo de este montaje es evitar interferencias entre el propio sensor SAR y el enlace en banda X.

4.5 Antena

A PAZ se le ha dotado con un array de antenas impresas o antenas microstrip en fase activa en la banda X con un ancho de banda instantáneo de hasta 300 MHz. Esta tecnología ofrece ventajas respecto a las convencionales guías de onda ranuradas, como son la facilidad de fabricación, peso, flexibilidad de topologías, etc. a la par que proporcionan buena eficiencia de radiación y bajas pérdidas. Las dimensiones de la antena son de 4.8 metros por 0.7 metros. El array está conformado por 12 paneles (ensamblados en tres hojas mecánicas), donde, a su vez, cada panel está formado por 32 subarrays de doble polarización. Cada uno de los subarrays se controla por un Módulo de Transmisión/Recepción (TRM) que ajustan la amplitud y fase de la señal, permitiendo conformar un haz adaptativo en dirección y elevación. El conjunto puede programar y gestionar hasta 10.000 haces. [8]

Además, cada panel tiene una PDN (Red de Distribución de Panel) para dividir o combinar señales transmisión o recepción radar, una PCN (Red de Calibración de Panel) para dividir o combinar señales de calibración radar, dos PSU (Unidades de Suministro de Panel) para alimentar los TRM, y una PCU (Panel Control Unit) para controlar los TRMs.

Un subarray es una matriz de 16 elementos de tamaño 400 mm x 22 m. El grosor de la antena es de 9 mm (excluyendo los conectores) y pesa 80 gramos.

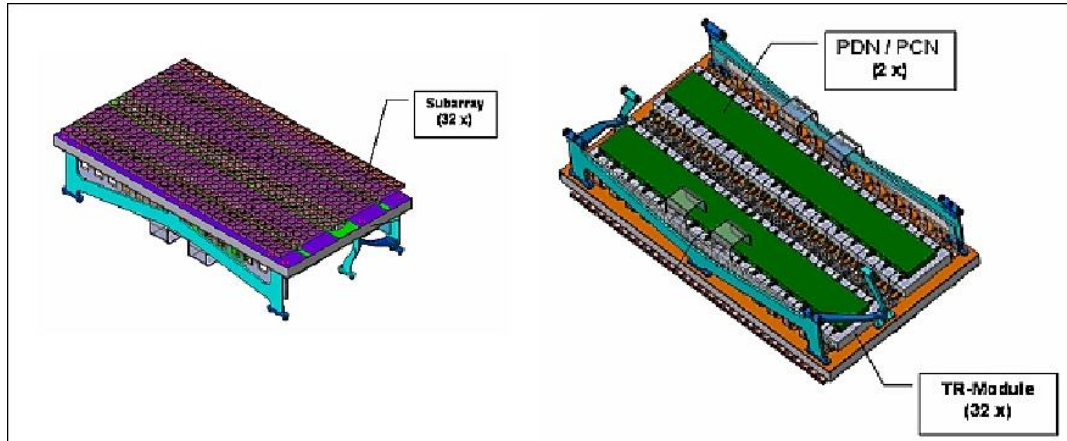


Figura 4-5 Vistas array X-SAR (Imagen de ESA CASA Espacio)

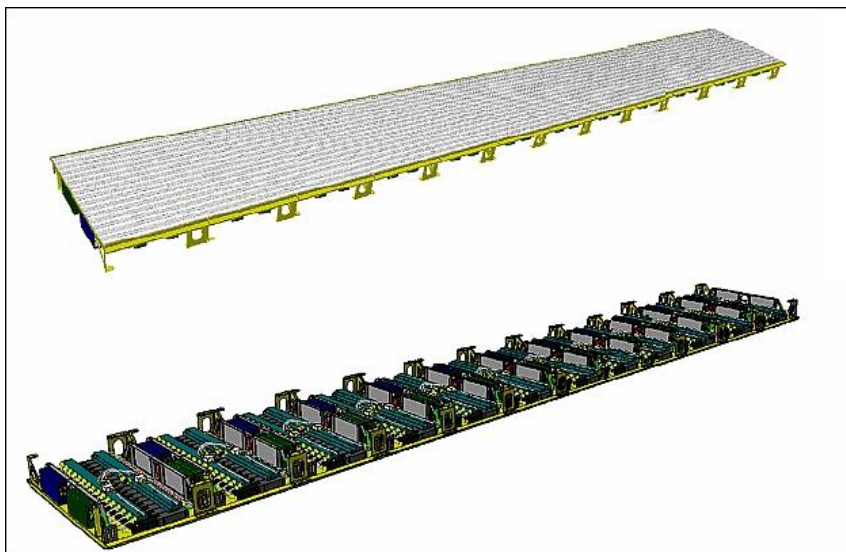


Figura 4-6 Antena X-SAR (Imagen de ESA CASA Espacio)

5 OTRAS CARGAS ÚTILES DEL SATÉLITE

5.1 AIS (Sistema de Identificación Automático)

5.1.1 Generalidades

Cada vez son más las embarcaciones y buques que cruzan nuestros mares. Este volumen de tráfico ha obligado a desarrollar servicios para gestionar el tráfico de buques (VTS, *vessel traffic services*). En algunas ocasiones, el uso de radares no es suficiente para evitar colisiones, dado que normalmente se limitan a la detección de objetos. En cambio, AIS realiza labores de identificación de objetivos, por lo que complementa al sistema radar embarcado.

AIS es un sistema de seguimiento en base al uso de transpondedores en los barcos que es usado por VTS y que proporciona datos de identificación, posición, curso y velocidad de un buque. La finalidad es que un barco pueda ver los barcos que lo rodean así como ser visto por el resto. En cualquier caso, la información proporcionada por el sistema es variada y ofrece detalles sobre la identidad, situación, ruta, destino, velocidad, carga, calado, bandera, eslora, oleaje, maniobras....

AIS utiliza un transceptor dedicado en banda VHF que le proporcionan unos alcances entre 10-20 millas náuticas. Existe la posibilidad de que los transpondedores AIS utilicen satélites para detectar sus señales. En este caso, la denominación del sistema se denomina "AIS Satélite" (S-AIS). Lo más habitual es que si la embarcación se encuentra próxima a tierra el seguimiento se realice en base a estaciones localizadas en la línea de costa. Si la embarcación se encuentra fuera de alcance de estas estaciones terrestres, la transmisión se realiza a través de un satélite.

El Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida en el Mar (SOLAS, *Safety of Life at Sea*) obliga a que todas las embarcaciones de transporte de pasajeros, independientemente de su tamaño, y todos los buques que superen las 300 toneladas brutas (GT, *Gross Tonnage*) deben instalar un sistema AIS para su monitorización.

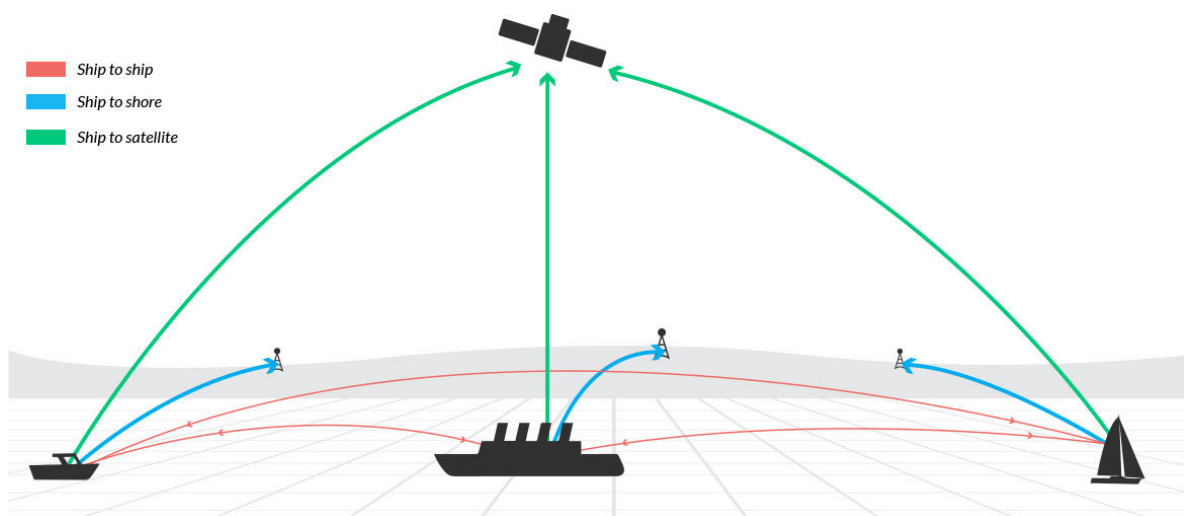


Figura 5-1 Esquema básico de funcionamiento de AIS (VT Explorer)

5.1.2 Descripción

PAZ es pionero en la fusión de un sensor SAR con un receptor de un Sistema AIS en la misma plataforma. El objetivo fundamental del sistema AIS es permitir a los buques comunicar su posición y otras informaciones relevantes para que otros buques o estaciones puedan conocerla y evitar colisiones. Los buques militares no están obligados al uso AIS.

La carga útil AIS a bordo de PAZ es parte de la constelación exactEarth (exactEarth Ltd. tiene su sede en Cambridge, Ontario, Canadá). El Sistema que lleva instalado PAZ es el modelo exactView-8 (EV-8). El objetivo general es proporcionar una capacidad de fusión de datos SAR para la vigilancia marítima desde el espacio con servicios de datos AIS. Con la fusión de los datos de AIS y SAR se va a producir una mejora en las capacidades de vigilancia marítima. Ahora será posible identificar a buques que no estén informando de su posición o que no cooperen con las autoridades.

Para lograr la imagen de situación marítima más precisa, se requiere una observación independiente para verificar los buques que están presentes en el área. El SAR puede proporcionar dicha fuente de datos debido a su capacidad diurna/nocturna en cualquier clima.

El uso de imágenes SAR para el reconocimiento marítimo requiere del equilibrio entre la cobertura y la resolución de la imagen para establecer el grado óptimo entre la tasa de detección y el nivel de información que se extraerá de la imagen.

Sin embargo, a diferencia de las imágenes ópticas, los barcos detectados por SAR son más difíciles de identificar.

La fusión y correlación de información entre los sistemas SAR y AIS ha sido uno de los grandes retos de este proyecto. Los procesadores que cumplimentan esta funcionalidad se han desarrollado en colaboración con el Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Alcalá de Henares.

Las encargadas de recibir la información procedente de los buques son 4 antenas de 40 centímetros de longitud que se han situado en una de las caras del prisma de PAZ orientadas hacia la tierra. Existe

una quinta antena instalada en el satélite que se encarga de reenviar los datos a los centros de control terrestre.

Como ya se comentó anteriormente, Hisdesat ha desarrollado, en colaboración con INDRA, un procesador de detección de anomalías basado en la tecnología AIS que permite realizar la vigilancia de cualquier incidente en un área de interés definida durante un tiempo establecido. Los comportamientos que se reportan son, entre otros, la vigilancia de un área informando de los barcos que se encuentran en la misma, interceptación de un barco en una zona próxima definida, barcos parados en mar, velocidades anómalas de barcos, agrupamientos de barcos, entradas y salidas de puertos, etc.

Estas nuevas capacidades van a dotar a España de nuevas herramientas que la capaciten para proporcionar seguridad a los barcos españoles contra la piratería o secuestros como lo que se han producido en los últimos años en el Cuerno de África.

5.2 ROHPP (Radio Ocultaciones y Fuertes Precipitaciones con PAZ)

El objetivo de este “experimento” de I+D+i es detectar lluvias de carácter torrencial que puedan tener efectos devastadores en la superficie terrestre. Asociado al cambio climático, este tipo de fenómenos meteorológicos se están produciendo cada vez con mayor frecuencia y virulencia. El experimento ROHPP ha sido desarrollado por el Instituto de Ciencias del Espacio (ICE) de Barcelona, perteneciente al CSIC y con el que también han colaborado otras organizaciones de carácter internacional como son el “Jet Proulsion Laboratory” (NASA) y la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).

La iniciativa ha sido promovida por la Doctora “Estel Cardellach” que ha reunido un equipo multinacional de científicos españoles, daneses, americanos, alemanes y británicos para investigar sobre este fenómeno. [10]

La radio ocultación es un fenómeno ligado a la refracción de las ondas electromagnéticas, que mediante técnicas de teledetección permite cuantificar las propiedades físicas de la atmósfera o de un anillo planetario. La técnica del análisis de la radio ocultación atmosférica consiste en la detección del cambio en una señal de radio a medida que pasa a través de la atmósfera de un planeta, es decir, se trata de saber cómo es ocultada por la atmósfera. [11]

En 2009, el Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN) aprobó las propuestas de RO, cuyo objetivo era incluir una carga útil de Radio-Ocultación (RO) del Sistema Global de Satélites de Navegación (GNSS) a bordo del satélite de observación de la Tierra (PAZ). PAZ incluye un receptor de GPS avanzado IGOR + y las antenas correspondientes para la determinación precisa de la órbita. El diseño y el software de este receptor GPS permiten el seguimiento de señales ocultas, es decir: señales transmitidas por satélites GPS que se configuran por debajo del horizonte de la Tierra (o que se elevan por encima de él). El instrumento ROHPP utiliza el receptor IGOR + en PAZ. [12]

El objetivo del experimento es aportar datos clave para contribuir a predecir las lluvias y grandes tormentas que causan inundaciones. Ocurre que, a mayor intensidad de la lluvia, *“las gotas tienen un diámetro mayor, a la vez que sufren un mayor aplanamiento –subraya la doctora Cardellach–, con lo que se rompe la simetría esférica y las dimensiones verticales y horizontales de las gotas ya no son iguales”*. [11]

El innovador experimento ideado por Cardellach consiste en tomar las medidas en las polarizaciones vertical y horizontal mediante un equipo Igor+ –un avanzado receptor espacial de GPS– para obtener información *“sobre precipitaciones intensas y los perfiles verticales de las variables termodinámicas atmosféricas a alta resolución”*.

Si el experimento funciona, *“las radio-ocultaciones polarimétricas se convertirán en la primera técnica capaz de ofrecer informaciones complementarias sobre grandes precipitaciones –asegura*

Cardellach—, *lo que resulta de relevancia para estudiar las lluvias fuertes que actualmente son difíciles de predecir en cualquiera de los modelos con los que trabajan los meteorólogos*". [13]

Los datos recogidos se volcarán cada 95 minutos, tiempo que tarda PAZ en describir una órbita, sobre la estación de telemetría de la NOAA situada en Fairbanks (Alaska). Allí se procesarán en tiempo casi real y se distribuirán a todos los Servicios Nacionales de Meteorología a través del Sistema Global de Telecomunicaciones de la Organización Mundial de Meteorología. Los datos en bruto también se enviarán al ICE de Barcelona, donde serán accesibles para la comunidad investigadora.

6 SEGMENTO TERRESTRE

6.1 Descripción general

El segmento terrestre de PAZ (PGS) es compartido con la futura misión de INGENIO dentro del programa PNOTS. Este segmento es en su totalidad propiedad del INTA. Para su despliegue y operación se han utilizado tres ubicaciones:

- Las instalaciones del Centro Espacial INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial) (CEIT) en Torrejón de Ardoz, Madrid, como emplazamiento principal o nominal.
- Maspalomas, Islas Canarias, ha sido elegido para el despliegue del centro de respaldo. Contiene los sistemas críticos para la supervivencia de la misión en caso de problemas en el centro nominal.
- El Centro de Usuarios de Defensa, situado en el Centro de Sistemas Aeroespaciales de Observación (CESAEROB). El CESAEROB es el encargado del procesamiento de imágenes.

Destacar que la primera operación y la aproximación a la órbita de referencia del sistema fueron llevadas a cabo desde el Centro de operaciones espaciales alemán (GSOC) y, tras los primeros cinco días, el control se transfirió al CEIT para el inicio de la fase de puesta en servicio y su posterior operación.

El Segmento Terrestre de PAZ proporciona las siguientes funciones [8]:

- FOS (*Flight Operation Segment*): con FOS se materializa la operación y el control del satélite y la provisión de telemetría. Se divide en un FOCC (Centro de control de operaciones de vuelo) y un conjunto de subsistemas

El conjunto de subsistemas consiste en:

- Estación de Operaciones de Tierra (GS, Ground Station, Operations), encargada de la modulación/demodulación de la señal en banda S y X.
- ARF (Acquisition & Routing Facility), a cargo del segundo nivel de sincronización, generación de archivos ISP y enrutamiento a los PDGS (Payload Data Ground System) nominales o de defensa.
- SMC (Secure Management Center. CFI) a cargo de la autenticación/cifrado y la gestión de claves.

- FMC (Monitorización y control de FOS), a cargo de la supervisión del segmento y la interconexión entre la tierra y el satélite.

La labor principal del FOS la desarrolla el Centro de Control de Operaciones de Vuelo (FOCC). Este Centro de Control es el encargado de gestionar las tareas de planificación y mando del satélite. Los subsistemas permiten desarrollar todas las funciones del FOCC son:

- MPF (Mission Planning Facility), a cargo de la planificación de las actividades satelitales para los días siguientes, incluidos los de plataforma e instrumentos.
 - IO (Instrument Operations), a cargo de generar los comandos necesarios para realizar una adquisición de toma de imágenes. Este subsistema funciona diariamente, dejando la tarea de planificar las otras actividades del instrumento necesarias para permitir la correcta adquisición de datos al MPF.
 - FD (Flight Dynamics), a cargo del control de la órbita y la generación de los productos de órbita y actitud requeridos.
 - MCS (Sistema de control de la misión), a cargo de convertir el programa generado por MPF a TC y el enlace ascendente al satélite. También recibe la banda S TM y genera los informes HK.
 - SSIM (Spacecraft SIMulator, CFI), para simular el satélite. Este simulador no soporta TCs de instrumentos.
- PDGS (Segmento terreno de datos): El PDGS se encarga de gestionar las solicitudes de los usuarios, el archivo de datos, el procesamiento y la calibración/validación. Para realizar estas tareas, PDGS consiste en los siguientes sistemas:
 - MUS (Master User Services). Este subsistema es el único que interactúa con el usuario, recibiendo las solicitudes del usuario y proporcionándole los productos obtenidos. También genera las órdenes internas requeridas para iniciar el flujo de PGS.
 - PDS (Payload Data System). Este subsistema es el núcleo del PDGS y se encarga de descifrar y procesar los datos sin procesar para obtener los productos deseados y también hacer circular todo el flujo de datos dentro del segmento.
 - Centro de CALVAL (Calibración y Validación). Las tareas realizadas en este subsistema son el mantenimiento de la configuración del sistema SAR (satélite y PGS), la calibración, caracterización y validación de productos SAR y la gestión de la explotación científica.
 - MAC (Mission Archive & Catalog), a cargo del almacenamiento y catálogo de datos procesados y toda la información necesaria requerida en el PDGS.
 - PM (Performance Monitoring), a cargo de la supervisión de todo el rendimiento del sistema.

6.2 Gestión de imágenes

Las solicitudes de usuario se introducen en el segmento terrestre de PAZ a través del subsistema MUS (Master User Services). Los usuarios pueden realizar tres tipos de peticiones diferentes:

- Solicitud de difusión: Para la petición de productos ya presentes en el archivo de PAZ.
- Solicitud de tramitación: El peticionario consulta el catálogo de PAZ para conocer las adquisiciones anteriores que coinciden con sus intereses (área de interés específica,

período de tiempo de adquisición, modo de imagen, etc.), realizando una solicitud del producto diferente al almacenado en el archivo PAZ.

- Solicitud de Adquisición: Destinado a obtener una futura adquisición de datos en bruto. Los usuarios pueden seleccionar parámetros de adquisición y procesamiento, tales como: área de interés, ventana de adquisición de tiempo, modo de imagen, haz, polarización y nivel de procesamiento.

Todas las solicitudes deben pasar una etapa de aprobación para ser ingeridas en la cadena PGS. Después de esta operación, el flujo de trabajo para las solicitudes depende de su tipo. Las solicitudes de difusión se envían directamente desde MUS al MAC. MAC extrae del archivo PAZ el producto deseado que se transfiere a MUS para entregarlo al usuario.

Las solicitudes de procesamiento son administradas por PDS, que extrae de MAC el producto bruto que se procesará hasta el nivel deseado y resuelve las dependencias relacionadas con los datos auxiliares necesarios para realizar el procesamiento. PSP realiza el procesamiento y el producto resultante se archiva temporalmente en el MAC y se entrega al usuario a través de MUS.

Las solicitudes de adquisición son gestionadas en una primera etapa por MUS. Una vez que el usuario ha insertado en el subsistema su solicitud, MUS realiza un análisis de factibilidad y le entrega al operador una lista de posibles adquisiciones que coinciden con sus criterios de búsqueda. El usuario seleccionará de la lista la adquisición o el conjunto de adquisiciones que se realizarán, generando la Solicitud del usuario final. El análisis de viabilidad tiene en cuenta las maniobras satelitales que impiden las adquisiciones, así como los posibles problemas de conflicto debido a la solicitud de otro usuario.

Teniendo en cuenta todas las solicitudes finales de adquisición introducidas en el sistema, MUS genera diariamente el DTOL (*Data Take Order List*), que contiene todas las tomas de datos posibles que se pueden adquirir en el próximo horizonte de programación de la misión (en la actualidad fijado a 72 horas).

El DTOL civil y de Defensa se envía al MPF, que se encarga de generar el plan final. Este plan se realiza teniendo en cuenta todas las solicitudes de adquisiciones, así como las maniobras de satélites, la falta de disponibilidad y visibilidad de las estaciones terrestres y las limitaciones de los satélites. MPF tiene que resolver los conflictos que pueden surgir entre las solicitudes de los usuarios provenientes de los centros nominales y de defensa, realizando un algoritmo que utiliza los diferentes roles y prioridades de los usuarios.

El PGS avanza en coordinación con el IGS (Ingenio Ground Segment), que también soporta la interfaz HMA (Heterogeneous Mission Access). HMA es una técnica que se está implementando para el segmento terrestre del programa GMES en Europa para lograr un acceso coherente a los archivos para apoyar la explotación científica como la Iniciativa de Cambio Climático. HMA está siendo implementada por ESA, DLR, CNES, EUMETSAT, MDA (RADARSAT), INTA, etc.

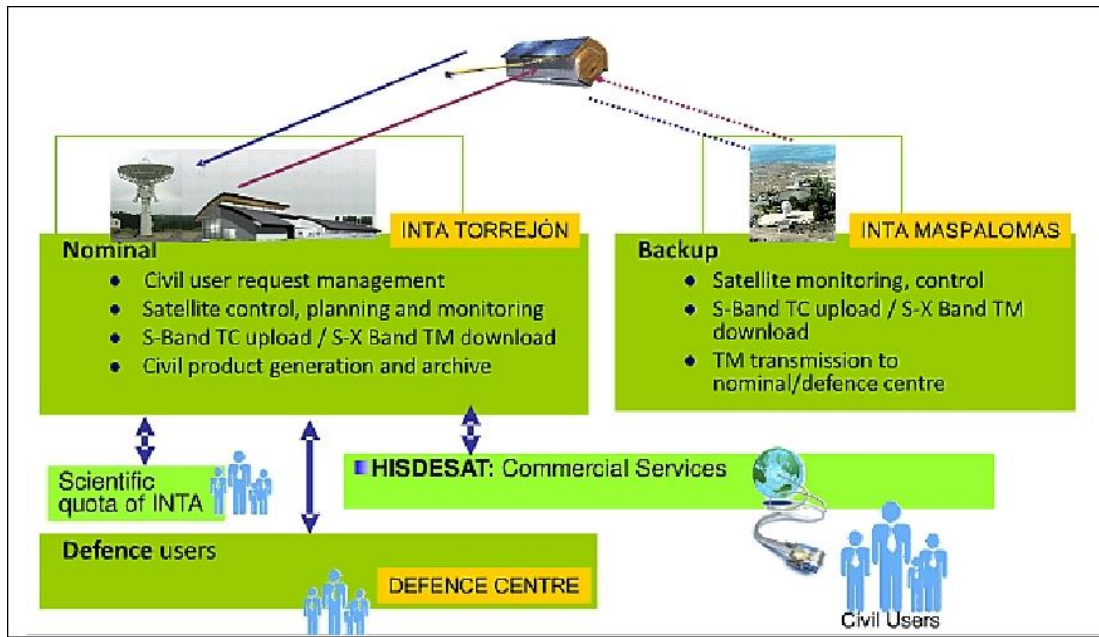


Figura 6-1 Esquema segmento terreste PAZ (Imagen de ESA CASA Espacio)

En noviembre de 2011, el INTA adjudicó un contrato a la empresa española de tecnología de la información Indra para proporcionar el segmento de control terrestre para el satélite de observación de la Tierra por radar PAZ de España.

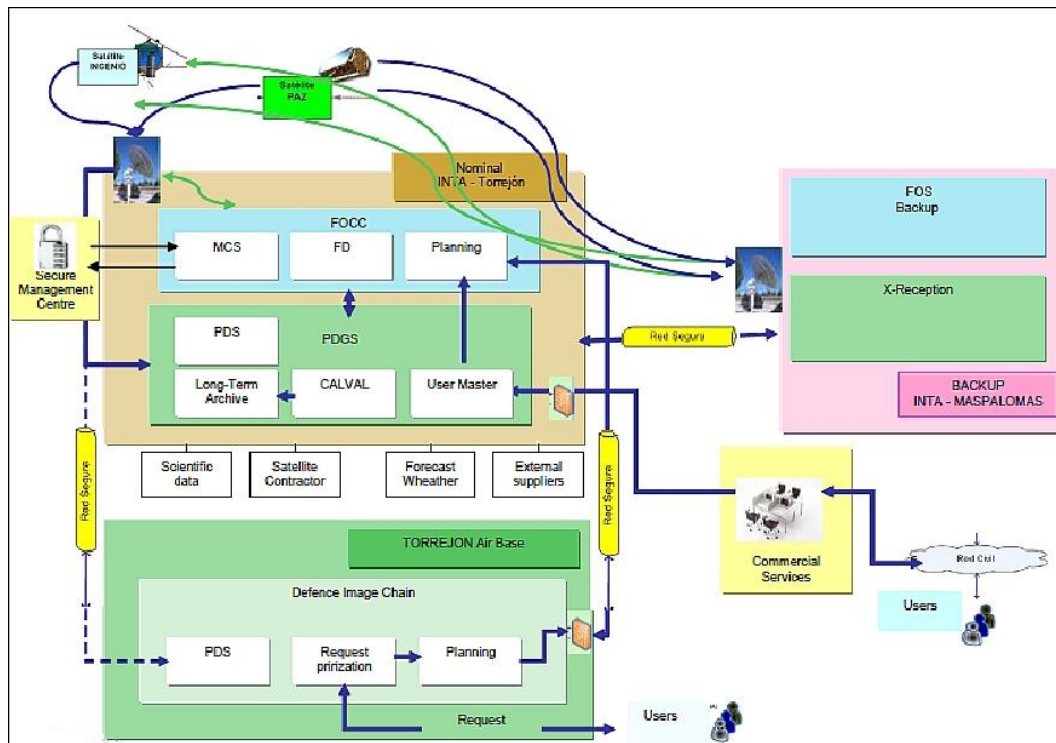


Figura 6-2 Detalle del flujo de información de PAZ (Imagen de ESA CASA Espacio)

7 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

7.1 Conclusiones

El lanzamiento de PAZ ha supuesto que España pase a formar parte de la triada de naciones que cuentan con esta tecnología junto con Alemania e Italia. La posibilidad de toma de imágenes independientemente de las condiciones meteorológicas y de luz aporta una ventaja sustancial a nuestros sistemas de inteligencia.

Cuando PNOTS se complete con el lanzamiento de INGENIO, España contará con capacidades para la observación de la tierra, ópticas y radáricas.

Este sistema proporciona a España autonomía a la hora de obtener imágenes desde satélite. Hasta el momento, siempre hemos estado sujetos a terceras naciones y las limitaciones que esto supone.

Este lanzamiento ha supuesto un gran reto tecnológico que, sin duda, ha impulsado nuestro entramado empresarial y universitario

7.2 Líneas futuras

Muchas son las posibilidades que se tendrán que explorar con el nuevo satélite. Lo novedoso del sistema y de la tecnología empleada va a suponer un reto para mucho personal de muy diversos ámbitos (ingenieros, militares, analistas, geógrafos, interpretadores de imágenes...).

No hay que olvidar que el satélite ha incluido entre su carga útil dos grandes proyectos que pueden proporcionar grandes éxitos a nivel internacional: integración de un SAR al sistema AIS y el experimento para detección de catástrofes climáticas ROHPP.

Un gran reto que va a suponer PAZ es el tratamiento de las imágenes en bruto y su posterior interpretación. La experiencia que tienen nuestros analistas con esta tecnología actualmente es muy pobre. El Ministerio de Defensa ha adquirido el paquete ArcGis para el tratamiento inicial de las imágenes. En este campo quedarán muchas líneas por explorar.

Otro hito importante que se producirá en breve es el lanzamiento de INGENIO. Aunque la resolución que ofrece no será utilizable para fines militares, merece que se complemente su estudio y se complete PNOTS.

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] dep.aeroespacial@sener.es - © SENER 2018 , «<http://www.aeroespacial.sener/pdf-ficha-proyecto/seosat-ingenio-satelite-espanol-de-observacion-de-la-tierra>,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.aeroespacial.sener>. [Último acceso: 04 11 2018].
- [2] US GOB, «https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites-0?qt-news_science_products=7#qt-news_science_products,» [En línea]. Available: https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites-0?qt-news_science_products=7#qt-news_science_products. [Último acceso: 08 11 2018].
- [3] WIKIPEDIA, «https://en.wikipedia.org/wiki/Landsat_program,» [En línea]. [Último acceso: 08 11 2018].
- [4] HISDESAT, «https://www.hisdesat.es/satelites_observ-terrasar/,» [En línea]. [Último acceso: 08 11 2018].
- [5] WIKIPEDIA, «https://en.wikipedia.org/wiki/Speckle_noise,» [En línea]. [Último acceso: 08 11 2011].
- [6] NASA, «https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/water/Brazil_2017/Day1/S1P2-span.pdf,» [En línea]. [Último acceso: 08 11 2018].
- [7] NASA, [En línea]. Available: https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/water/Brazil_2017/Day1/S1P2-span.pdf. [Último acceso: 04 11 2018].
- [8] HISDESAT, «<https://www.hisdesat.es/paz/>,» [En línea]. [Último acceso: 09 11 2018].
- [9] ESA (Agencia Espacial Europea), [En línea]. Available: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/p/paz>. [Último acceso: 06 11 2018].
- [10] EL DIARIO, «https://www.eldiario.es/tecnologia/satelite-espanol-experimentara-prediccion-meteorologica_0_633786830.html,» [En línea]. [Último acceso: 09 11 2018].
- [11] COSMIC, «https://www.cosmic.ucar.edu/oct2012workshop/presentations/Session5/cardellach_session5.pdf,» [En línea]. [Último acceso: 09 11 2018].

- [12] CSIC, «<http://www.ice.csic.es/paz/introduction.php?idi=ES>,» [En línea]. [Último acceso: 09 11 2018].
- [13] HERALDO, «<https://www.heraldo.es/noticias/suplementos/tercer-milenio/innovacion/2018/01/23/paz-primer-satelite-radar-espanol-1220044-2121030.html>,» [En línea]. [Último acceso: 09 11 2018].

ANEXO I: SATÉLITE PAZ. (PNOTS)

Infografía resumen realizada por Airbus sobre PAZ.

SATÉLITE RADAR DE ALTA RESOLUCIÓN

AIRBUS

CARACTERÍSTICAS

Radar de apertura sintética (SAR), con un ancho de banda de 300 MHz
 Más de 100 imágenes diarias nocturnas/diurnas
 Bajo cualquier condición meteorológica, por debajo de 1 m. de resolución.
 Cubrirá un área de más de 300.000 Km² diariamente
 5 modos de operación: Spotlight, HRSpotlight y Staring Spotlight, Stripmap
 y dos ScansAR, con varias combinaciones de polarización
 Constelación con los satélites alemanes radar: TSX y TDX, de Airbus DS
 GEO, reduciendo el tiempo de revisita e incrementando el número de imágenes
 Hisdesat: propietaria, explotadora y operadora del satélite
 Airbus Defence and Space: contratista principal
 INTA: propietario del segmento terreno

LAS CIFRAS

- 15 Empresas y 3 universidades españoles involucradas: HITO INDUSTRIA ESPAÑOLA
- 24 Horas de tiempo medio de revisita
- 5 m. de altura y 2,4 m. de diámetro
- 514 Kilómetros de altura
- 1400 Kg de peso

LANZAMIENTO

Falcon 9 llevará al satélite PAZ hasta su órbita de operación, en enero de 2018, desde el Complejo de Lanzamiento Espacial (SLC) 4E de la Base de la Fuerza Aérea en Vandenberg (California).

CARGA ÚTIL AIS

Sistema AIS (receptores de exactEarth-Hisdesat)
 La mejor monitorización posible del entorno marítimo global y en tiempo real
 Información: Identidad, buque, situación, ruta, velocidad, destino, carga y maniobras
 Capacidad para combinar información SAR con los datos del servicio AIS simultáneamente
 Aplicaciones: búsqueda y rescate, protección medioambiental, detección pesca ilegal, desastres naturales y control de la piratería marítima.
 Utilidad: Autoridades gubernamentales, aduaneras, marítimas, portuarias, de pesca, etc.

PROYECTO DE RADIOCULTURACIÓN Y PRECIPITACIÓN EXTREMA (ROHP)

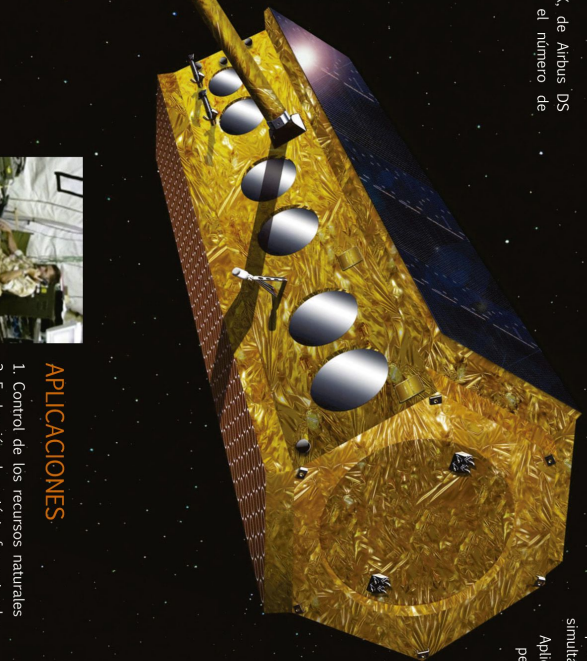
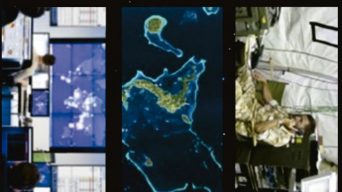
Liderado por el ICE del CSIC, y con la colaboración del NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL), de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) e Hisdesat
 Innovación en radio ocultación atmosférica: predicciones de comportamientos atmosféricos como lluvias e inundaciones
 Medición por primera vez de la ocultación de señales RF en sus dos polarizaciones
 Visión sobre ocultación de las señales GPS a su paso por la atmósfera
 Permite medidas para evitar desastres asociados a grandes precipitaciones
 Permite suficiente tiempo para avisar de precipitaciones extremas y evitar desastres asociados

APLICACIONES

1. Control de los recursos naturales
2. Evaluación de catástrofes naturales
3. Monitorio del medio ambiente
4. Planificación del territorio e infraestructura
5. Gestión de crisis y riesgos
6. Cartografía de alta resolución
7. Seguridad y defensa
8. Control de fronteras
9. Vigilancia del entorno marítimo
10. Generación de modelos de deformación de la tierra
11. Intervención en crisis humanitarias

RADAR DE APERTURA SINTÉTICA (SAR)

Radar de Airbus en banda X
 Capacidad máxima, de toma de imágenes de 420 segundos por órbita
 Posibilidad de apuntar electrónicamente la antena.
 Cualquier punto de la Tierra será visible en un plazo máximo de un día



ANEXO II: SATÉLITE INGENIO. (PNOTS)

Como parte del programa PNOTS se ha desarrollado un satélite de observación óptica llamada INGENIO. Se adjunta información empresarial de este satélite.



SEOSAT/INGENIO. Satélite Español de Observación de la Tierra

SEOSAT es una unidad de captura de imágenes multiespectral, de alta resolución y franja ancha de cobertura mundial, diseñada para la adquisición sistemática de imágenes del territorio Español con un tiempo mínimo de revisita. Estará operativo en 2020 con una vida de 7 años, con órbita helio-síncrona de unos 670 km de altura, lo que equivale a unas 14,4 órbitas al día. Incluye como carga útil un instrumento óptico de alta resolución. Dispone de capacidad de orientación de + 35° desde nadir.

SENER es el responsable principal del diseño, fabricación, integración, alineación y la verificación de la carga útil primaria de la misión.

La carga útil es un instrumento óptico de alta resolución cuyo objetivo es la toma de imágenes terrestres en dos canales, uno Pancromático (PAN: blanco y negro) de 2,5 m de resolución, y uno Multiespectral con cuatro bandas (MS: azul, verde, rojo y NIR) de 10 m de resolución, que trabaja en modo de barrido por empuje (push-broom) y proporcionando 55 kilómetros de franja, que cubre más de 2,5 millones de kilómetros cuadrados por día.

Configuración seleccionada:

- El tamaño total del instrumento es de 1,5 m x 1,5 m x 1,5 m
- Peso del equipo es 150 kg
- Instrumento con dos cámaras idénticas
- Cada una cubriendo 28 km de ancho de traza
- Diseño óptico tipo Korsch
- Óptica:
 - Focal de 3,5 m
 - Pupila de Ø 260 mm
 - Tres espejos esféricos centrados
- Cada cámara dispone de dos canales:
 - Pancromático:
 - 2,5 m de resolución
 - Dos detectores TDI
 - Multiespectral:
 - 10 m de resolución
 - Dos detectores multibanda
 - Filtros microstrip de Sharp
- Función de Alta Transferencia Modular (calidad de imagen) y la relación señal/ruído (actuaciones radiométricas)
- Electrónica de detección independiente para cada cámara
- Unidad de potencia y control del Instrumento.

Cliente: CDTI
 Fecha de inicio: 2008
 Fecha de fin: 2020

