

CASO PRÁCTICO

# Calificación y validación de las prestaciones del instrumento SAR de PAZ

Closa, J.\*, Zurita, A., Sánchez, J., Labriola, M., Solana, A.

*Departamento de Instrumentos de Microondas, Airbus Defence & Space, Av. Aragón 404 C.P. 28022, Madrid, España.*

---

**Resumen:** PAZ es un satélite con un sensor SAR en banda X como instrumento principal. Altamente flexible, el radar es capaz de proporcionar imágenes SAR de alta calidad con una gran diversidad de tamaños, desde los 5 km hasta los 200 km, con resoluciones desde unos 30 m para productos con una alta cobertura hasta valores alrededor del metro e incluso del orden de varios centímetros en el caso de muy alta resolución. Este artículo describe las actividades de validación y las prestaciones esperadas de PAZ a partir de los ensayos en tierra.

**Palabras clave:** PAZ, SAR, radar, instrumentos, teledetección activa.

## Qualification and Validation of the performances of the SAR instrument on board PAZ

**Abstract:** PAZ is a satellite with a highly flexible X band SAR as primary instrument. The radar is capable of generating high quality SAR images with sizes ranging from 5 km to 200 km and resolutions from 30 m for products with high coverage to values around 1m or even in the order of several cm in the case of very high resolution products. This paper describes the validation activities and the expected quality performances based on the tests performed on-ground.

**Key words:** PAZ, SAR, radar, instrument, active remote sensing.

---

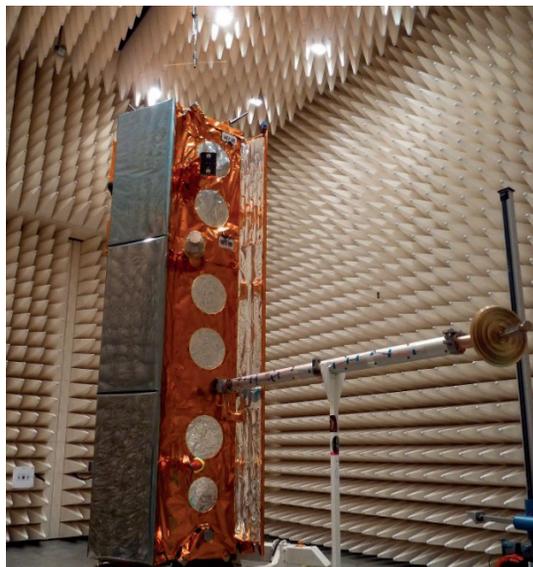
## 1. Introducción

PAZ es el primer satélite español con un Radar de Apertura Sintética (SAR, de sus siglas en inglés) en banda X altamente flexible cuyo principal objetivo es proporcionar las capacidades de observación global que satisfagan las necesidades del gobierno español en el marco del Plan Nacional de Observación del Territorio (PNOT). Airbus Defence & Space (Airbus DS) es el contratista principal del satélite, cuya plataforma se basa en la de los satélites Terrasar-X (TSX) y Tandem-X (TDX), y cuya órbita es polar, síncrona con el sol y por delante de la de los dos anteriores satélites para reducir a la mitad el periodo de revisita de una constelación formada por los tres satélites. El

satélite y su instrumento SAR han sido validados en tierra y están listos para ser lanzados y entrar en operación después de un breve periodo de comisionado de unos tres meses desde finales de 2014. No obstante, el lanzamiento se prevé en la segunda mitad de 2018 debido a la indisponibilidad del lanzador inicialmente previsto para su lanzamiento (DNPER). El satélite, con su instrumento SAR puede verse en la configuración de los ensayos de compatibilidad electromagnética en la Figura 1.

El instrumento SAR se compone de un *back-end* y un nuevo concepto de *front-end*, desarrollado por Airbus DS para satisfacer los requisitos de los diferentes modos de adquisición del SAR (Labriola *et al.*, 2012). Estos exigen una alta

\* Autor para la correspondencia: [josep.closa@airbus.com](mailto:josep.closa@airbus.com)



**Figura 1.** Imagen del satélite PAZ durante la campaña de compatibilidad electromagnética.

agilidad en términos de comando de la antena con la implementación de una agrupación activa orientable electrónicamente mediante diferentes centros de fase. El *back-end* es responsable de la generación de la señal *chirp*, de la gestión de todas las señales de sincronismo, de las modulaciones y demodulaciones de las señales transmitidas y de la adquisición de los datos SAR. La antena consiste en 12 paneles cada uno con 32 *subarrays* de parche *microstrip*, cada uno de ellos conectado a un módulo transmisor-receptor (TRM) y, por tanto, consta de 384 centros de fase. Tiene una longitud total de 4,8 m y 0,7 m de ancho. El apuntamiento electrónico de alta velocidad es posible tanto en acimut como en elevación y se consigue mediante la unidad de control de cada panel (PCU) y la unidad de control remoto de la antena (RTU) que proporcionan el control programable en tiempo real del diagrama de antena y su apuntamiento así como de la polarización en transmisión y en recepción (lineal, H o V). Los diferentes haces y polarizaciones de la antena en transmisión y en recepción son modificables para cada una de las *PRIs* de una toma de datos, lo cual transfiere al sistema una gran flexibilidad y la posibilidad de programar nuevos modos de adquisición inicialmente no elegidos como operacionales. Todo el radar está diseñado con un ancho de banda de 300 MHz para lograr el cumplimiento de los

requisitos de resoluciones exigidas. El instrumento incluye además una red de calibración por donde se distribuyen señales para la monitorización de posibles variaciones de amplitud y fase para su posterior compensación en tierra.

La versatilidad del instrumento SAR de PAZ en términos de operaciones y configuraciones permite obtener un alto rango de productos adaptados a diversas aplicaciones, con diferentes resoluciones y tamaños de imagen basados en tres modos principales de observación: a) *Stripmap*, b) *Spotlight* (alta, muy alta y super alta resoluciones) y c) *ScanSAR*. Para cada uno de ellos se pueden combinar una o dos polarizaciones cuasi simultáneas con la consecuente pérdida de resolución y ancho de barrido. La arquitectura del instrumento también posibilita la operación de modos experimentales usando las dos mitades de la antena y los *back-ends* nominales y redundantes (*Dual Receive Antenna*). Ello abre posibilidades a nuevas aplicaciones, tales como la interferometría en la dirección de vuelo o la adquisición de imágenes con un sistema polarimétrico (quad-pol).

La Tabla 1 resume los diferentes modos en los que se va a operar PAZ y sus principales características en cuanto a resolución y tamaño de imagen. Es importante destacar la armonización de los productos generados con la misión PAZ con los adquiridos con TSX – TDX para que el usuario pueda utilizar indistintamente imágenes a partir de cualquiera de estos sensores. Para ello, no sólo se han asegurado las especificaciones del instrumento radar sino que se va a utilizar un mismo proceso de comando del instrumento y de procesamiento de los datos en tierra. Adicionalmente, también se van a adquirir en PAZ de manera futura, modos recientemente introducidos en TSX, como son un *Spotlight* de muy alta resolución (*staring spotlight*) y un *ScanSAR* con más haces para obtener un mayor ancho de barrido destinado a monitorización marítima.

## 2. Caracterización en tierra

Para la validación de las prestaciones del radar, el equipo de Airbus DS ha diseñado toda una campaña de verificación y validación del instrumento SAR en tierra que incluye, desde medidas del patrón de radiación de los *subarrays* y de la antena completa (en tramos de 1/3 de la longitud total)

**Tabla 1.** Modos de observación de la misión PAZ y principales características. En rojo, los modos nominales, en verde los nuevos productos (rg: rango, az: acimut).

Modo	Resolución [rg×az]	Tamaño [rg×az]	Polarización
<i>Stripmap Single</i>	[1,7-3,5] m×3,3 m	30 km×50 km	HH/VV
<i>Stripmap Dual</i>	[1,7-3,5] m×6,6 m	15 km×50 km	HH-VV HH-HV VV-VH
<i>ScanSAR</i>	[1,7-3,5] m×18,5 m	100 km×150 km	HH/VV
<i>HR spotlight single</i>	[0,7-1,8] m×1,1 m	<10 km×5 km	HH/VV
<i>HR spotlight dual</i>	[0,7-1,8] m×2,2 m	<10 km×5 km	HH-VV
<i>Spotlight single</i>	[1,5-3,5] m×1,7 m	<10 km×10 km	HH/VV
<i>Spotlight dual</i>	[1,5-3,5] m×3,4 m	<10 km×10 km	HH-VV
<i>ScanSAR Wide</i>	7 m×40 m	[266-194] km×200 km	HH/VV
<i>Staring Spotlight</i>	[0,8-1,8] m×0,24 m	~6 km×2,7 km	HH/VV

hasta la campaña de termo-vacío para comprobar el comportamiento del instrumento en temperatura y su estabilidad en términos de radiometría y fase. Los siguientes apartados resumen los ensayos más significativos.

## 2.1. Modelo de antena

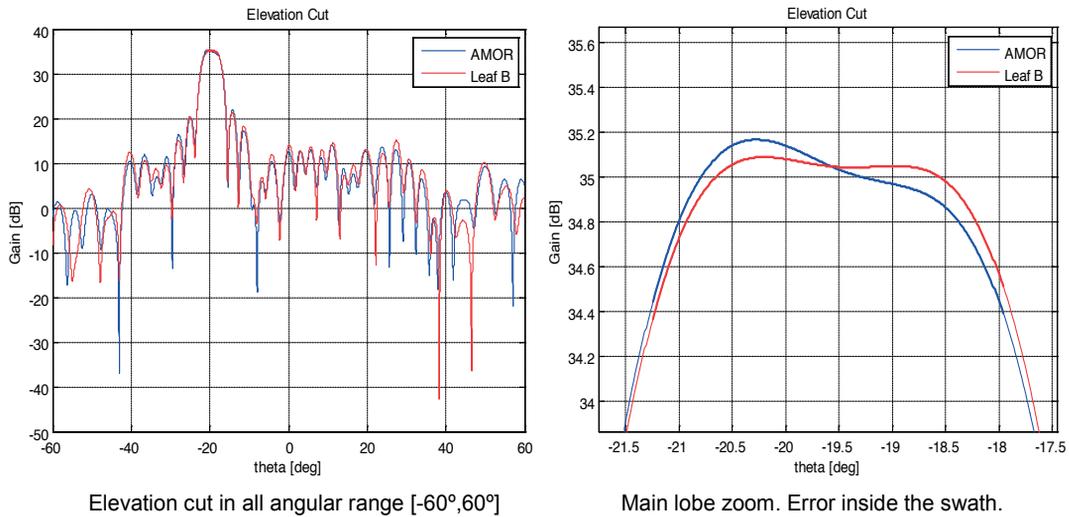
Uno de los términos fundamentales en la calibración de PAZ es el conocimiento de la forma de los diagramas de antena, así como de su ganancia. Sin embargo, la alta flexibilidad de la antena activa de PAZ y sus múltiples haces configurables en vuelo, hacen que la medida de todos los diagramas de radiación de la antena tanto en tierra, donde se necesitarían instalaciones de grandes dimensiones, como en vuelo, resulten una tarea muy costosa en términos de tiempo, lo cual prolongaría la campaña de validación tanto antes de su integración final con el satélite como una vez en órbita. Para evitarlo se ha desarrollado un modelo de antena que utiliza como entrada las medidas, en cámara anecoica, de los diagramas de los *subarrays* una vez montados en la antena para así tener en cuenta cualquier acoplo entre ellos. El modelo también utiliza los coeficientes teóricos de excitación de los TRM e incorpora otros factores como la geometría de cada uno de los elementos que conforman la antena, así como posibles desviaciones de amplitud o fase de los TRM, obtenidos mediante medidas de calibración periódicas ejercitadas en vuelo a través de la modulación de la fase de los pulsos de calibración utilizando la técnica del *Pseudo Noise* (Mittermayer *et al.*, 2010).

El modelo de antena se ha validado en tierra mediante las medidas de 19×4 diagramas (Tx, Rx, H, V) de tres *leaves*, cada uno formado 4 paneles (1/3 de la antena), ya que las dimensiones del total de la antena imposibilitan su medida en cámara anecoica. Las medidas se han realizado en las instalaciones de la Universidad de Alcalá. En la Figura 2 se pueden ver los resultados de la comparación entre las medidas del *leaf* central (*leaf*B) y las predicciones del modelo de antena para el haz más conformado orientado hacia nadir que está previsto utilizar.

El promedio de las diferencias del diagrama de antena en el rango angular que ocupa el ancho de barrido para las 76 configuraciones medidas, cuyo efecto se tiene en cuenta como una contribución al error radiométrico del radar, es de 0,104 dB siendo este valor de 0,17 dB cuando se considera el promedio de la máxima diferencia en ese intervalo para todos los haces medidos lo cual asegura una buena predicción de los diagramas a través del modelo de antena.

## 2.2. Campaña de ensayos en tierra

La campaña de ensayos en tierra se ha dividido entre los ensayos funcionales, que garantizan el correcto funcionamiento del instrumento y los ensayos de prestaciones, en los que no sólo se verifican los parámetros radar más significativos mediante medidas en área limpia sino que además se obtienen las caracterizaciones necesarias para el procesado de datos una vez en vuelo. Finalmente, se ha verificado la eculización en fase y amplitud de toda la antena para asegurar su correcto



**Figura 2.** Comparación de las medidas del diagrama de antena de un *leaf* (rojo) y predicciones del modelo de antena (azul). Izquierda: corte en elevación para todo el rango angular. Derecha: detalle del lóbulo principal.

apuntamiento en vuelo y el funcionamiento de todos los *subarrays* en las dos polarizaciones una vez integrados en el satélite. Los datos obtenidos en estos ensayos se utilizan para una primera estimación de aquellos parámetros que sólo se pueden medir en vuelo y cuya primera verificación se realiza mediante modelos que tienen en cuenta los diferentes términos que les afectan directamente.

Además, las diferentes respuestas del sistema a diferentes anchos de banda se han caracterizado para verificar, por un lado, las resoluciones requeridas y, por otro, poder corregir en vuelo todos esos términos que afectan a la estabilidad de las imágenes y no son corregidos directamente por los pulsos de calibración. Así, por ejemplo, la respuesta impulsional SAR, que sólo se puede medir en vuelo, se verifica a partir de la compresión de la *chirp* en rango y la variación de múltiples señales *chirp* en un periodo equivalente al tiempo de integración. Las componentes en fase y cuadratura de varias señales *chirp*, con múltiples longitudes de pulso y anchos de banda hasta los 300 MHz, necesarios para obtener las resoluciones cercanas al metro, se han caracterizado para verificar la resolución final en vuelo. Éstos pulsos se obtienen una vez han recorrido tanto el camino de transmisión como el de recepción y parte de la red de calibración.

De la misma manera, se ha incidido en uno de los términos más influyentes en la precisión y la

estabilidad del instrumento SAR, como es la caracterización de los TRM. La precisión de los TRM a la hora de programar una determinada atenuación y fase para conformar el diagrama de antena se ha obtenido utilizando la técnica de modulación de pulsos en fase una vez los módulos se han integrado en el instrumento. La Tabla 2 muestra las diferencias entre el valor comandado y el valor medido calculadas a partir de los 384 TRM para 6 configuraciones de haz cuando el SAR apunta a la derecha de la dirección de vuelo. Valores similares se han obtenido para un apuntamiento a su izquierda.

Otro término fundamental es la estabilidad de los TRM en temperatura. Debido al comportamiento intrínseco de la electrónica, sus variaciones en temperatura se han caracterizado en tierra y se ha

**Tabla 2.** Errores de amplitud y fase para diferentes configuraciones de los TRM correspondientes a haces de medida.

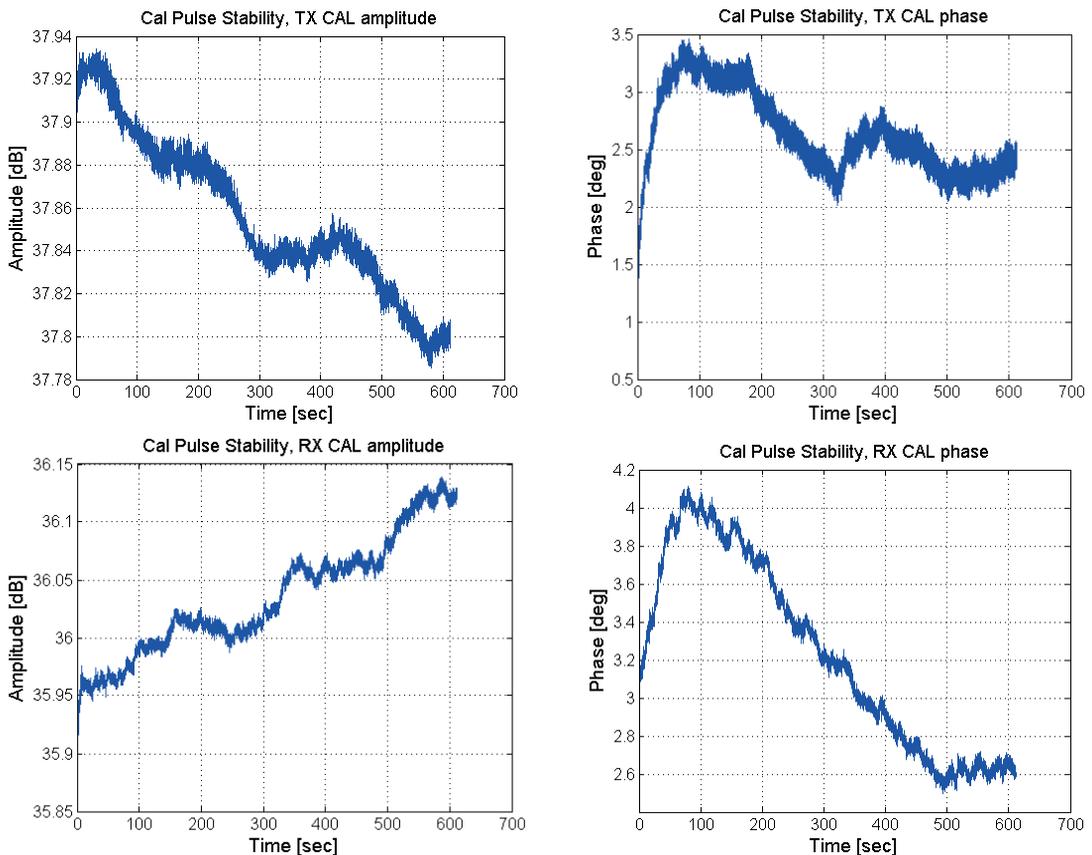
Haz	Error Amplitud Tx ( $\sigma$ )	Error Fase Tx ( $\sigma$ )	Error Amplitud Rx ( $\sigma$ )	Error Fase Rx ( $\sigma$ )
	El:0, Az:0	0,53 dB	3,30°	0,31 dB
El:0, Az:128	0,53 dB	3,12°	0,31 dB	4,53°
El:0, Az:255	0,54 dB	3,07°	0,31 dB	4,32°
El:9, Az:0	0,56 dB	3,59°	0,35 dB	5,55°
El:255, Az:1	0,55 dB	3,29°	0,43 dB	3,19°
El:255, Az:100	0,49 dB	4,16°	0,42 dB	3,83°

incorporado un algoritmo de corrección en vuelo basado en esta caracterización. La Figura 3 muestra la evolución de la amplitud y la fase para toda la antenna una vez estos parámetros se autocorrigen en el propio comandado del módulo para una toma de 10 minutos de duración. Se puede ver como su variación se limita a 0,14 dB en Tx y 0,24 dB en Rx y 2,48° en Tx y 1,61° en Rx. De todos modos, estas mínimas variaciones pueden ser calibradas y compensadas en tierra mediante pulsos específicos que discurren por la red de calibración.

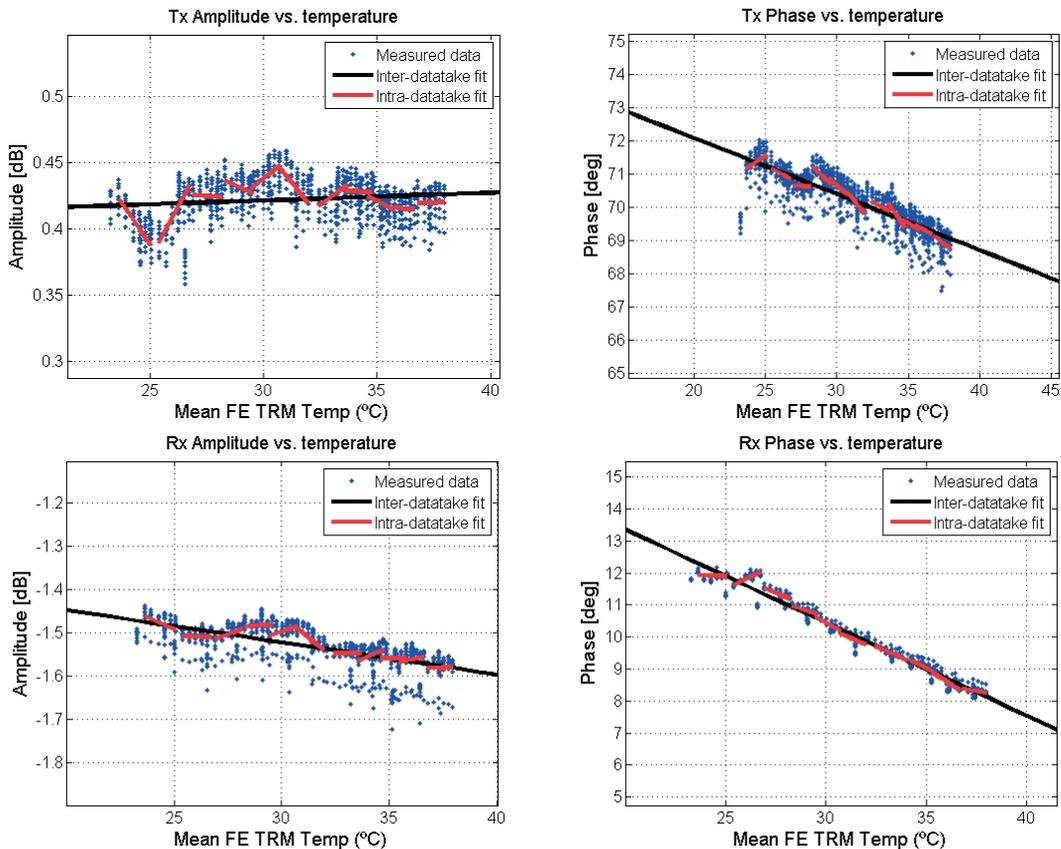
La estabilidad de los módulos en temperatura también se ha evaluado mediante la ejecución de tomas de datos consecutivas con un alto número de pulsos de calibración, para así poder evaluar la variación de amplitud y fase no sólo dentro de una misma adquisición sino también entre ellas, y así poder asegurar una calidad de imagen homogénea, independiente de la temperatura. La Figura 4 muestra estas variaciones respecto a la

temperatura para 15 tomas de datos. En cuanto a la amplitud, los valores de estabilidad son de 0,01 dB/°C en Tx, y -0,01 dB/°C en Rx, y en cuanto a la fase de 0,17°/°C en Tx y 0,29°/°C. Esta ligera variación en fase se debe a que los TRM en la etapa de pre-amplificación no se compensan en temperatura de forma continua, de manera diferente a como se hace con el resto de TRMs conectados a los *subarrays*. Esto se hace para evitar que la antenna se desapunte en la dirección de acimut durante la toma de datos, debido a cambios bruscos de la fase provocados por la compensación interna en temperatura, ya que esta afecta a 1/6 de la antenna completa.

Para asegurar que las excitaciones en el plano de la antenna son las comandadas a los módulos T/R y por tanto los diagramas de radiación los adecuados para maximizar las prestaciones, cada uno de los *leaves*, es decir, en grupos de 4 paneles, se equaliza tanto en fase como en amplitud



**Figura 3.** Estabilidad de los 384 módulos TR en transmisión: potencia transmitida (superior izquierda) y fase (superior derecha) y recepción: ganancia (inferior izquierda) y fase (inferior derecha).

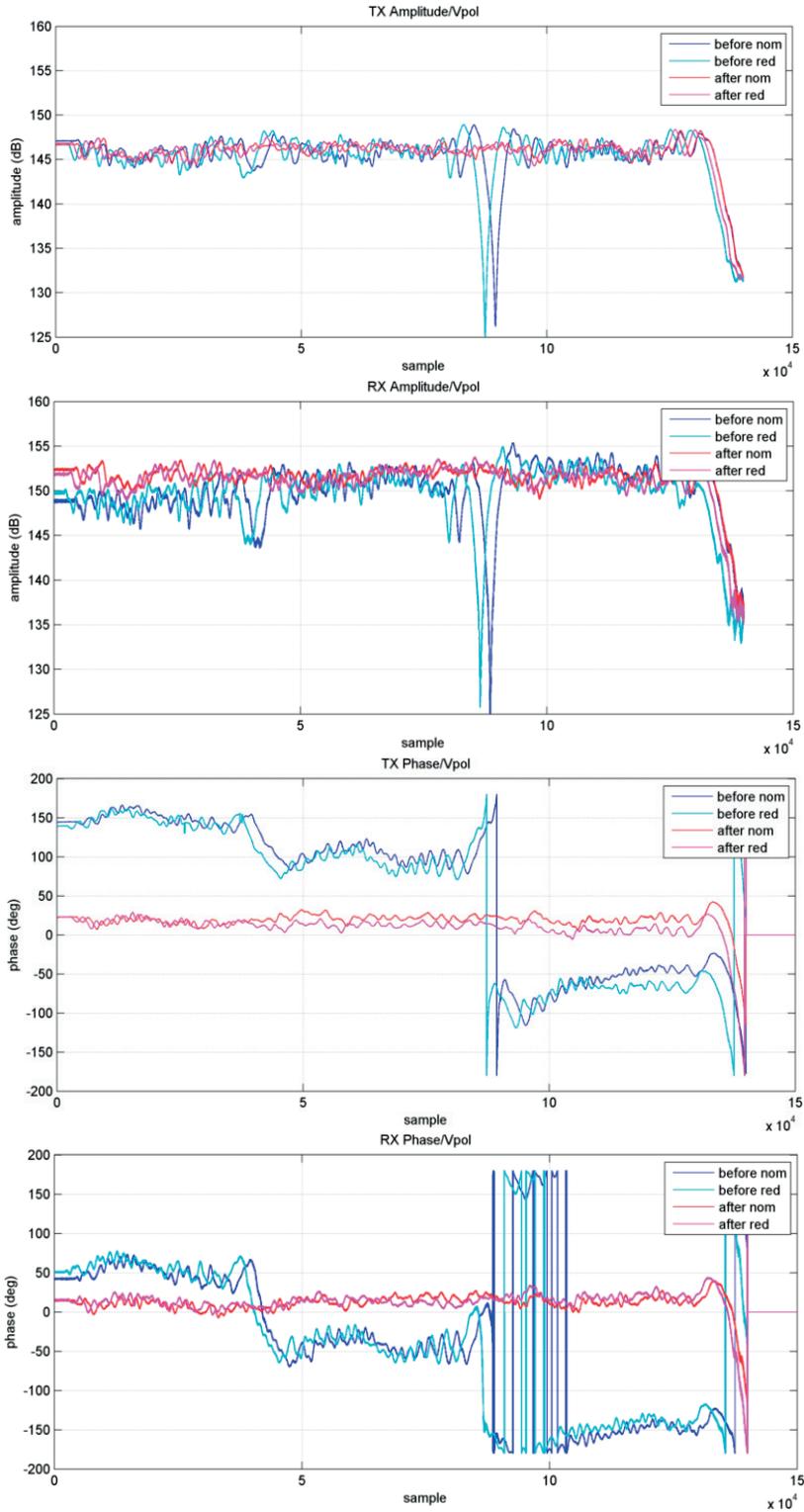


**Figura 4.** Estabilidad de los 384 TRM en transmisión (potencia transmitida y fase) y recepción (ganancia y fase) para múltiples tomas de datos.

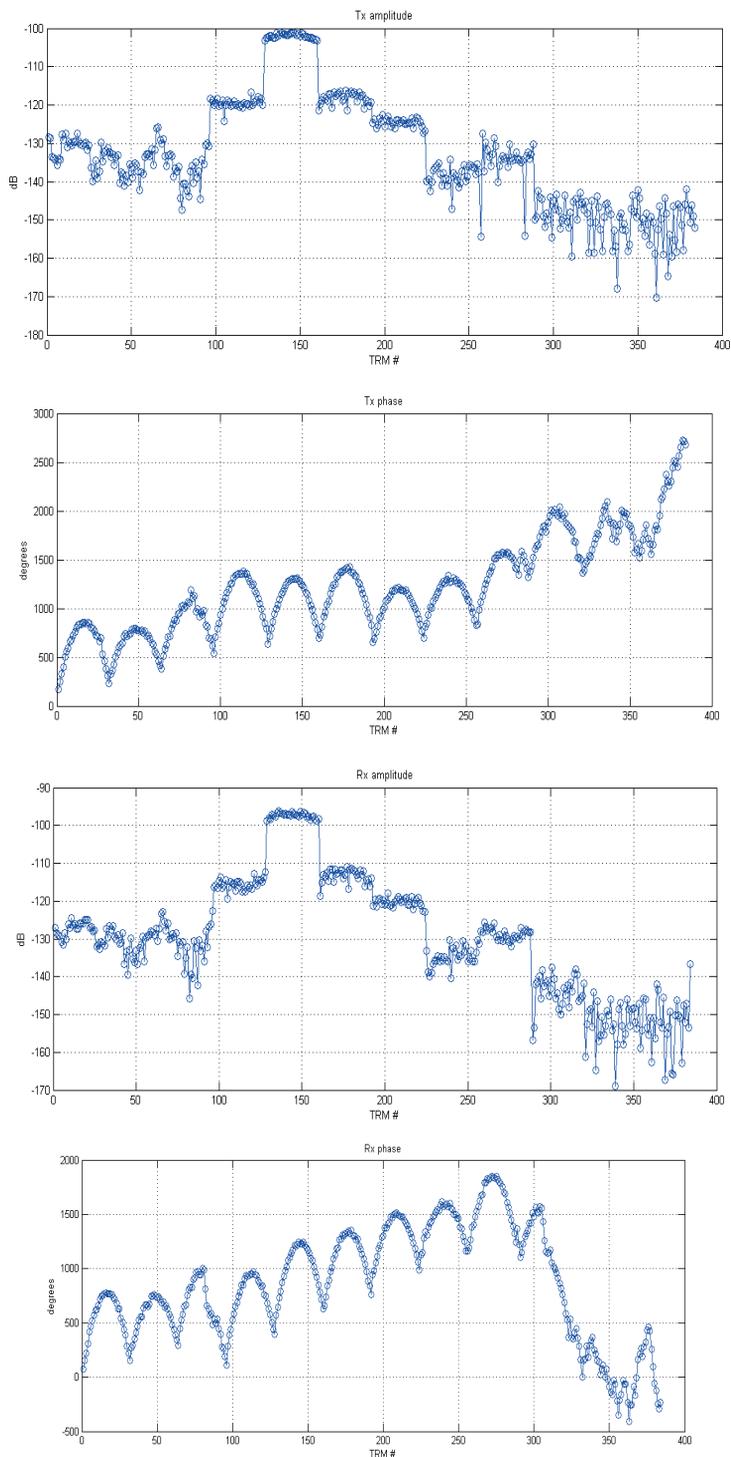
durante las medidas para la validación del modelo de antena. Esto se consigue mediante la medida en campo cercano de todo el plano de radiación en transmisión y en recepción para las dos polarizaciones y la utilización de unos *offsets* de amplitud y fase a nivel de comandado de los módulos T/R. Sin embargo, aunque la ecalización entre los 32 *subarrays* de cada uno de los paneles se mantiene, ésta se pierde entre los 12 paneles al integrar toda la antena en el instrumento debido a que la instrumentación de la cámara no es idéntica a la de vuelo y a que el radar incluye 6 módulos T/R que sirven de preamplificadores a cada grupo de dos paneles. Es por eso que para asegurar que las longitudes eléctricas de cada uno de los caminos a los paneles son iguales, se escanea, como último test, toda la antena en la dirección acimutal, es decir, a través de los 12 paneles. Así se asegura que todos ellos quedan ecalizados y por tanto el apuntamiento y la forma de los diagramas de toda la antena. En la figura 5 se pueden ver los valores

de amplitud y fase, en transmisión y recepción medidos a través de toda la antena antes y después de esa ecalización para la polarización V. Valores similares se han obtenido para H. Las medidas se han efectuado en las instalaciones de Airbus DS en Ottobrun, capaces de albergar todo el satélite una vez integrado.

El mismo test se utiliza para verificar el correcto funcionamiento de cada uno de los *subarrays* por la vía radiada después de toda la campaña ambiental a la que se ha sometido el satélite. El estado de los módulos es verificable a partir de los pulsos obtenidos a través de la red de calibración, pero la parte radiante sólo se puede comprobar mediante medidas con una sonda exterior. Para ello se utiliza, al igual, que en calibración la modulación de los pulsos en fase. Eso permite a partir de la excitación simultánea de toda la antena, la individualización de la contribución de cada uno de los *subarrays*. La Figura 6 muestra los resultados, una vez se han



**Figura 5.** Escaneo de la amplitud y la fase tanto en transmisión como en recepción de toda la antenna de PAZ para la polarización V. Los valores más a la derecha de cada una de las figuras decrecen en amplitud y se vuelven más inestables en fase debido a que la sonda ya ha superado la longitud de la antenna.



**Figura 6.** Amplitud y fase en transmisión y en recepción para cada uno de los módulos T/R en polarización H obtenida a partir de la adquisición de pulsos transmitidos por toda la antena situando una sonda frente al panel 5 (mitad). Los pulsos son modulados en fase para poder decodificar de manera individual la contribución de cada uno de los módulos y el estado de cada uno de los *subarrays*. Las variaciones de fase indican exactamente la distancia entre la sonda y el centro de fase de cada uno de los *subarrays*.

convolucionado las medidas con los códigos que identifican a cada uno de los contribuyentes para el caso en el que la sonda se sitúa frente al panel 5. Cada punto en la gráfica representa un *subarray* en polarización H. Se puede ver el correcto funcionamiento de cada uno de los *subarrays* tanto en transmisión como en recepción. La fase sigue una forma parabólica debido a las diferentes distancias entre la sonda y cada uno de los 32 *subarrays* de cada panel. Las diferentes amplitudes de cada panel también se deben a la atenuación de la señal debido a la distancia. Se puede comprobar cómo la sonda está enfrentada al panel 5, que aparece con mayor intensidad de señal. La técnica permite identificar con esta medida prácticamente el estado de la totalidad de la antena, lo cual se consigue con dos medidas adicionales situando la sonda frente los paneles 2 y 8 y 11.

### 3. Resumen de prestaciones

Uno de los parámetros decisivos a la hora de obtener las prestaciones finales de cada uno de los modos es la forma del diagrama con los que se adquieren las escenas. Éste viene definido, por un lado, por las dimensiones físicas de la antena, y

por otro, por los coeficientes de excitación de los módulos T/R, y por tanto están sujetos a optimización. En este proceso de optimización intervienen: el ángulo de incidencia de la zona a observar, el ancho de barrido, la maximización de la ganancia en el lóbulo principal, la minimización de las zonas del diagrama susceptibles de generar ambigüedades y la homogeneización de la calidad de imagen en todo el ancho de barrido. El proceso se ejecuta para cada uno de los modos a la altura mínima del satélite, ya que es el caso más restrictivo. La Figura 7 muestra los resultados de NESZ para el modo *Stripmap* para las dos polarizaciones. Se puede ver cómo para los ángulos nominales de observación se obtienen valores mejores que los  $-18$  dB.

Todas las medidas de caracterización del instrumento se han introducido en los diferentes modelos para verificar los requisitos de sistema a nivel de resolución geométrica, precisión y estabilidad radiométrica, estabilidad de fase para verificación de las capacidades interferométricas y precisión en la geolocalización de las imágenes.

A nivel radiométrico, la estabilidad radiométrica obtenida tiene un valor promedio de 0,13 dB,

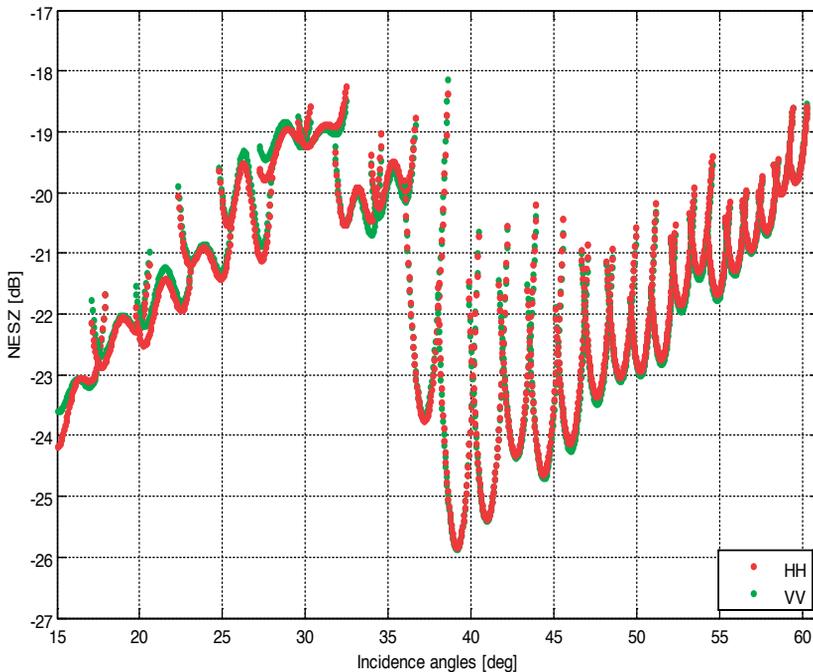


Figura 7. NESZ para SM-S mode (H≈510 km).

**Tabla 3.** Parámetros de calidad de imagen más significativos previstos para los principales modos de observación de PAZ.

	SM-S	SM-D	ScanSAR	HS-S	SL-S
PSLR	≤-25 dB	≤-25 dB	≤-25 dB	≤-25 dB	≤-25 dB
ISLR	≤-18 dB	≤-18 dB	≤-18 dB	≤-18 dB	≤-18 dB
NESZ	≤-18 dB	≤-18,5 dB	center: ≤-19,5 dB edge: ≤-17 dB	≤-16,5 dB	≤-19 dB
DTAR	≤-22 dB	≤-15 dB	center: ≤-25 dB edge: ≤-15 dB	≤-18 dB	≤-16 dB

una precisión radiométrica relativa dentro de una misma imagen de 0,31 dB y una precisión radiométrica absoluta de 0,48 dB, mientras que los valores más altos en estos parámetros fueron 0,18 dB para la estabilidad radiométrica, 0,32 dB para la precisión radiométrica relativa y 0,52 dB de error radiométrico absoluto, que aumentan hasta 0,55 dB en el caso de *ScanSAR*.

En cuanto a los errores de fase se espera que éstos sean inferiores a los 1,2° por el uso de pulsos de calibración interna, mientras que la localización de los productos se sitúa entre 3,4 m y 0,6 m en rango si se utiliza algún modelo para compensar el retardo introducido por la atmósfera y de 0,13 m en acimut. Estos valores son tan precisos debido al uso a bordo de un GPS de doble frecuencia que proporciona una precisión de la posición del satélite de unos 10 cm.

Finalmente la Tabla 3 muestra un resumen de los principales parámetros de calidad de imagen derivados a partir de los modelos para los principales modos de operación: *Stripmap* (single y dual), *Scansar* y *Spotlight* (resolución nominal y alta). Prestaciones adicionales del instrumento pueden encontrarse en (Del Castillo *et al.*, 2014).

#### 4. Conclusiones

Los diferentes ensayos a los que se han sometido el satélite PAZ y su instrumento SAR en tierra han confirmado la operatividad de PAZ y han proporcionado una primera validación de las prestaciones del instrumento dentro de las limitaciones que implican el no tener un movimiento relativo entre la escena y el sensor. El satélite estará listo para entrar en operaciones después de una breve campaña de comisionado en vuelo posterior a su lanzamiento en la que se van a verificar las prestaciones del sistema y a caracterizar la calidad de sus productos. Estas primeras actividades en vuelo

abarcan la calibración externa mediante triedros y *transponders* activos, incluyendo asimismo la validación del modelo de antena, la calibración geométrica mediante triedros, la calibración polarimétrica mediante los mismos dispositivos y zonas de reflectividad homogéneas, así como la verificación de las prestaciones interferométricas. La planificación de estas actividades está en fase de consolidación en base a la disponibilidad y posición de los dispositivos anteriormente mencionados.

#### Referencias

- Del Castillo, J. Gómez, B. de Porras, R. Sánchez, S. Castellanos, G. Larrañaga, J.R. 2014. PAZ Calibration and Performance Update Based on Antenna Model and Instrument Monitoring Capabilities. *EUSAR 2014 Proceedings*, Berlin, Alemania, 03-05 Junio.
- Labriola, M. Sánchez, J. Closa, J. Solana, A. 2012. Qualification and Validation Campaign of the PAZ Front-End Panel. *EUSAR 2012 Proceedings*. Nuremberg, Alemania, 23-26 Abril.
- Mittermayer, J. Younis, M. Metzger, R. Wollstadt, S. Márquez, J. Meta, A. 2010. TerraSAR-X System Performance Characterization and Verification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(2), 660-667. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2009.2026742>
- Werninghaus, R. Buckreuss, S. 2010. The TerraSAR-X Mission and System Design. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(2), 606-614. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2009.2031062>
- Krieger, G., Moreira, A., Fiedler, H., Hajnsek, I., Werner, M., Younis, M., Zink, M. 2007. Tan-DEM-X: A satellite formation for high resolution SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(11), 3317-3341. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.900693>