

CINCLUS: UN INSTRUMENTO PARA LA TELEDETECCIÓN DE LAS AGUAS CONTINENTALES

A. Ruiz-Verdú, E. De Miguel, C. Robles-González y A. Fernández-Renau.

*Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA),
Ctra. Ajalvir s/n, Torrejón de Ardoz, 28850 Madrid. ruizva@inta.es*

RESUMEN

Cinclus es un fotómetro CCD, cuyo diseño y fabricación están siendo llevados a cabo en el INTA. Consta de cinco bandas espectrales estrechas, ubicadas en la región del rojo e infrarrojo cercano, con alta sensibilidad y resolución radiométrica, optimizadas para la teledetección de la calidad de las aguas continentales. Es un instrumento sencillo, robusto y de pequeño tamaño que, instalado en un satélite de órbita polar heliosíncrona, generará imágenes de al menos 50 km de *swath* y una resolución espacial en torno a 50 m, con coberturas inferiores a 30 días en la Península Ibérica. El proyecto *Cinclus* incluye el diseño del segmento terreno y el desarrollo de algoritmos para la generación de productos de Nivel 3.

ABSTRACT

Cinclus is a CCD photometer that is being designed and built at INTA. It consists of five narrow red-infrared spectral bands with high sensitivity and radiometric resolution, optimized for the remote sensing of inland waters. On board of a sun-synchronous polar satellite, this simple, robust and small instrument will generate images with a swath of at least 50 km, a spatial resolution of about 50 m and coverage of less than 30 days over the Iberian Peninsula. The *Cinclus* project comprises the design of the ground segment and the development of algorithms for Level 3 products generation.

Palabras clave: teledetección, *Cinclus*, calidad del agua, lagos, embalses.

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El estudio de la calidad de las aguas continentales mediante teledetección se basa en la cuantificación de aquellas sustancias disueltas o partículas en suspensión que modifican las propiedades ópticas de la masa de agua. Las moléculas de agua absorben intensamente la radiación infrarroja, limitando el rango espectral de los sensores pasivos a la región visible y al infrarrojo cercano. El resto de *Constituyentes Ópticamente Activos* (OAC), modifican la reflectancia observada mediante procesos de absorción y dispersión (Mobley 1994).

Los OAC de mayor interés son aquellos que informan del estado ecológico de la masa de agua, de su grado de contaminación o de la presencia de microorganismos potencialmente tóxicos. En este grupo se encuentran pigmentos fotosintéticos, como la *clorofila-a*, que se correlaciona con la biomasa total del fitoplancton, o la *ficocianina*, indicador de la presencia de cianobacterias. También son relevantes los sólidos en suspensión y la materia orgánica disuelta (Kirk, 1994). No obstante, la teledetección de todos estos OAC en lagos y embalses no es sencilla, debido a varias causas principales:

- La reflectancia es generalmente muy baja (<5%) lo que exige una elevada resolución radiométrica y una adecuada corrección atmosférica.

- Los máximos de absorción de los pigmentos ocurren en rangos espectrales estrechos (< 20 nm), por lo que se requiere de bandas estrechas para su detección.

- La relación entre la concentración de un OAC y la reflectancia observada es casi siempre no lineal, debido al solapamiento en los espectros de absorción y dispersión de los diferentes OAC.

- En ciertas geometrías de observación, la reflexión especular de la luz solar en la superficie (*sun glint*) puede llegar a impedir la obtención de información de la propia masa de agua.

En la actualidad no existe ninguna misión operativa (no experimental) dedicada al estudio de la calidad de las aguas continentales mediante teledetección desde satélite. Los sensores de aplicación primordialmente oceanográfica, como MERIS, MODIS o SeaWiFS, poseen una resolución espectral y una sensibilidad adecuadas, pero su resolución espacial es insuficiente para estudiar la mayoría de los lagos y embalses de tamaño medio o pequeño. Y los sensores orientados a aplicaciones terrestres, como las series del *Thematic Mapper* o

SPOT, pese a contar con una resolución espacial adecuada, no cuentan con las bandas espectrales ni con la sensibilidad requerida para la teledetección de la calidad del agua (Heiskary *et al.* 2006).

El principal objetivo del proyecto *Cinclus* es el de suplir esa carencia existente en las actuales misiones de observación de la tierra, proporcionando un instrumento específicamente diseñado para la generación de productos dedicados al estudio y gestión de las aguas continentales.

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

El proyecto toma el nombre científico del mirlo de agua (*Cinclus cinclus*), una pequeña ave presente en la Península Ibérica, ligada a masas de agua de alta calidad. Es un proyecto interno del INTA, que involucra al Departamento de Observación de la Tierra, Teledetección y Atmósfera y al Departamento de Programas Espaciales y Ciencias del Espacio. Su objetivo es desarrollar un instrumento sencillo y robusto, basado en tecnologías contrastadas y en desarrollos previos, que pueda ser instalado como carga útil en plataformas espaciales de pequeño tamaño como el satélite *Microsat*, del INTA.

Pese a ser un desarrollo experimental, la vocación del proyecto es la de diseñar una misión de observación de la tierra completa, haciendo especial énfasis en el segmento terreno y en la generación y distribución de productos. Todo el desarrollo se condiciona al objetivo final de que *Cinclus* ofrezca productos de utilidad para los usuarios finales, tanto en el ámbito científico como, fundamentalmente, en el de la gestión del agua.

REQUISITOS DEL INSTRUMENTO

Cinclus se plantea como un instrumento capaz de estudiar la calidad del agua en el ámbito de la Península Ibérica y áreas geográficas similares. Por tanto, sus requisitos han de adecuarse a las características específicas de los lagos y embalses ibéricos.

Aunque los requisitos se han establecido en función de las necesidades de los usuarios, se ha partido de ciertos condicionantes de diseño. Así, se asume que el instrumento se basa en una matriz de detectores (*pushbroom CCD*), con digitalización en 12 bits y un número limitado de bandas (inferior a 6), ubicadas en la región espectral del visible e infrarrojo cercano. Se asume también que se opera en un satélite pequeño de órbita polar heliosíncrona.

Como objetivo principal, el instrumento debe ser capaz de generar mapas temáticos de concentración de clorofila-a y ficocianina en un amplio rango de concentraciones. Adicionalmente, se deben poder obtener mapas de sólidos en suspensión y transparencia del agua.

Para lograr ese objetivo, la aproximación escogida es la aplicación de algoritmos semi-analíticos basados en cocientes de bandas de la región roja e infrarroja del espectro (Gons 1999, Simis *et al.* 2005). Este tipo de algoritmos, están especialmente adaptados a medios eutróficos, donde han sido extensamente validados (Ruiz-Verdú *et al.* 2008). Tan solo requieren un máximo de cuatro bandas espectrales estrechas, por lo que encajan en los principios de diseño de *Cinclus*, que persiguen economizar en el número de bandas para alcanzar los exigentes requisitos radiométricos.

Requisitos espectrales

El instrumento consta de cinco bandas espectrales (Tabla 1). Las cuatro primeras están destinadas a la obtención de productos de calidad de aguas. La quinta banda es necesaria para la corrección atmosférica de las imágenes.

Tabla 1.- Resumen de requisitos espectrales. Se muestran los centros y anchos de banda (FWHM, *Full Width at Half Maximum*).

BANDA	Centro (nm)	FWHM (nm)	Propósito principal
B1	625 ± 2	10 ± 1	Máximo absorción ficocianina
B2	675 ± 2	10 ± 1	Máximo absorción clorofila a
B3	705 ± 2	10 ± 1	Mínimo absorción de pigmentos
B4	780 ± 2	12 ± 1	Cálculo <i>backscattering</i> de partículas
B5	865 ± 2	12 ± 1	Cálculo AOT Separación agua - tierra

Requisitos radiométricos y de calibración

En la definición de los requisitos radiométricos de *Cinclus* se ha contado con el apoyo del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (Ministerio de Fomento). Para establecer el requisito de resolución radiométrica, se ha fijado como

objetivo que el instrumento sea capaz de detectar cambios de $0,5 \text{ mg m}^{-3}$ en la concentración de clorofila-*a* y de 1 mg m^{-3} en la concentración de ficocianina.

Se ha partido de una base de datos de 150 estaciones de muestreo en embales españoles, que incluye medidas radiométricas (espectrorradiómetro ASD FieldSpec FR) y de concentración de pigmentos. Aplicando modelos semi-analíticos (Gons 1999 y Simis *et al.* 2005) se han determinado los cambios en radiancias del agua (radiancias *bottom of atmosphere*, L_{BOA}) que producen los cambios de concentración fijados como objetivo. Esas radiancias se han propagado hasta el nivel del sensor utilizando el código de transferencia radiativa 6S (Vermote *et al.*, 1997). El nivel de ruido óptimo (*Noise Equivalent Radiance*, NE Δ L) se ha estimado para una transmisividad atmosférica de 0,75, para asegurar que el requisito de resolución radiométrica se cumple incluso en condiciones atmosféricas desfavorables.

Los valores de radiancias de referencia al nivel del sensor (radiancias *top of atmosphere*, L_{TOA}) se han extraído de histogramas de radiancias (L_{TOA}) calculados para píxeles de agua continental en escenas MERIS de la Península Ibérica. Los valores máximos se han fijado en función de los exigentes niveles de ruido y de los 12 bits de digitalización. Se asume que un porcentaje de píxeles de tierra (típicamente <5%) quedará saturado, salvo en las bandas 1 y 4, de aplicación casi exclusiva sobre agua. En previsión de que en algún caso no se pueda alcanzar la resolución radiométrica prevista, se ha establecido un umbral mínimo de NE Δ L basado en las recomendaciones del *Internacional Ocean-Colour Coordinating Group* (IOCCG Report Number 3, 2000).

No se consideran mecanismos de calibración en la plataforma, por motivos de espacio y simplicidad de diseño. La calibración se realizará con campañas de medidas in situ (calibración *vicaria*). Se requiere una degradación anual de las radiancias TOA $\leq 2\%$.

Tabla 2.- Resumen de requisitos de resolución radiométrica (en $\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$). En la última columna se indica el valor óptimo de NE Δ L (en negrita) y el mínimo aceptable.

Banda	L_{TOA} ref	L_{TOA} max	NE Δ L
B1	27	80	0.018 0.035
B2	22	120	0.027 0.035
B3	21	120	0.027 0.035
B4	17	50	0.005 0.025
B5	12	140	0.025 0.035

Requisitos geométricos y temporales

El Área Geográfica Principal (AGP) es la Península Ibérica y territorios insulares españoles. Se debe asegurar que toda la fracción de la AGP incluida en cada órbita sea registrada y almacenada en el instrumento.

La resolución espacial depende del FOV (5°), del número de píxeles *across-track* del CCD (1024) y de la altura orbital de la plataforma en la que se instale *Cinclus* (600-850 km). Teniendo en cuenta esos condicionantes, se ha establecido como requisito que el GIFOV sea de 50 ± 15 metros. Esta resolución se considera adecuada para el estudio de la mayoría de las masas de agua ibéricas. En las condiciones previstas de operación, el ancho de imagen será de 50 a 75 km. Este ancho podría duplicarse si se instalan dos instrumentos en paralelo en la plataforma.

El periodo de cobertura geométrica en el AGP deberá ser siempre igual o inferior a 30 días (12 observaciones anuales), con un valor óptimo de 15 días.

DISEÑO DEL INSTRUMENTO

Cinclus se basa en un conjunto óptico principal (teleobjetivo con distancia focal de 550 mm, apertura de 155 mm y número $F \geq 3,5$) que recoge el flujo de luz y lo proyecta en 5 filtros de 10 ó 12 nm de anchura espectral situados frente al plano focal. La luz transmitida por cada filtro es recogida en una fracción del área de un detector CCD bidimensional (*separación en campo*). El detector es un *Frame Transfer CCD* de 1024 x 250 píxeles de 24 x 24 μm (tipo Hamamatsu S7960-1008), con una eficiencia cuántica del 90%.

Las imágenes espectrales se obtienen mediante la adquisición de sucesivos *Frames* sincronizados con el tiempo de integración, que a su vez depende de la velocidad del satélite. Para cada filtro, varias líneas de píxeles *across-track* pueden acumularse digitalmente para mejorar el coeficiente señal ruido (SNR).

SEGMENTO TERRENO

La explotación de las imágenes es el objetivo principal del proyecto *Cinclus*, por lo que el dimensionamiento y diseño del segmento terreno es una tarea prioritaria. Para ello el INTA cuenta con la infraestructura del Centro de Recepción, Proceso, Archivo y Distribución de datos de Observación de la Tierra (CREPAD), que está situado en la Estación Espacial de Maspalomas (Gran Canaria) y cuenta con dos antenas de 1,8 m de diámetro para recepción de datos en banda L y una antena de 10 m de diámetro para recepción en banda X.

En el segmento terreno se implementarán los algoritmos necesarios para las correcciones radiométricas y geométricas de las imágenes, así como para la corrección atmosférica, la georreferenciación y la obtención de productos de calidad de aguas. Se proponen los siguientes productos de Nivel 2:

- Reflectancia del agua.
- Concentración de clorofila-*a*.
- Índice de Clorofila máxima, *MCI* (Gower et al. 2000).
- Índice de Biomasa de Cianobacterias. Basado en algoritmos para la ficocianina (Simis et al. 2005).
- Turbidez y/o transparencia del agua.
- Espesor Óptico de Aerosoles (AOT). Como subproducto de la corrección atmosférica.

A partir de estos productos básicos se plantea la elaboración de productos de Nivel 3, de alto valor añadido, que se ofrecerán a las escalas espaciales y temporales más adecuadas para su uso por los gestores de la calidad del agua.

BIBLIOGRAFÍA

Gons, H. J. 1999. Optical teledetection of chlorophyll *a* in turbid inland waters. *Environmental Science & Technology* 33, 1127–1132.

Gower, J., Hu, C., Borstad, G. and King, S. 2006. Ocean Color Satellites Show Extensive Lines of Floating Sargassum in the Gulf of Mexico. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44, 3619-3625.

Heiskary, S., Olmanson, L., Gitelson, A., and Chipman, J. 2006. Remote Sensing: Does It Have a Role? *LakeLine*, Spring 2006, 27-35.

IOCCG Report No. 3. 2000. Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex, Waters.

Kirk, J. T. O. 1994. Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems. *Cambridge University Press*, Cambridge. U.K.

Mobley, C. D. 1994. *Light and water: Radiative transfer in natural waters*. Academic Press.

Ruiz-Verdú, A., Simis S. G. H., de Hoyos, C., Gons H.J., Peña-Martínez, R. 2008. An evaluation of algorithms for the remote sensing of cyanobacterial biomass. *Remote Sensing of Environment* 112, 3996-4008. doi:10.1016/j.rse.2007.11.019.

Simis, S.G.H., Peters, S.W.M., Gons, H.J. 2005. Remote sensing of cyanobacterial phycocyanin in turbid inland water. *Limnology and Oceanography* 50, no. 1, 237-245.

Vermote, E.F., Tanré, E., Deuzé, J.L., Herman, M. and Morcrette, J.J. 1997. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum 6S: An Overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 35, no. 3, 675-686.