

La altimetría aplicada a la hidrología

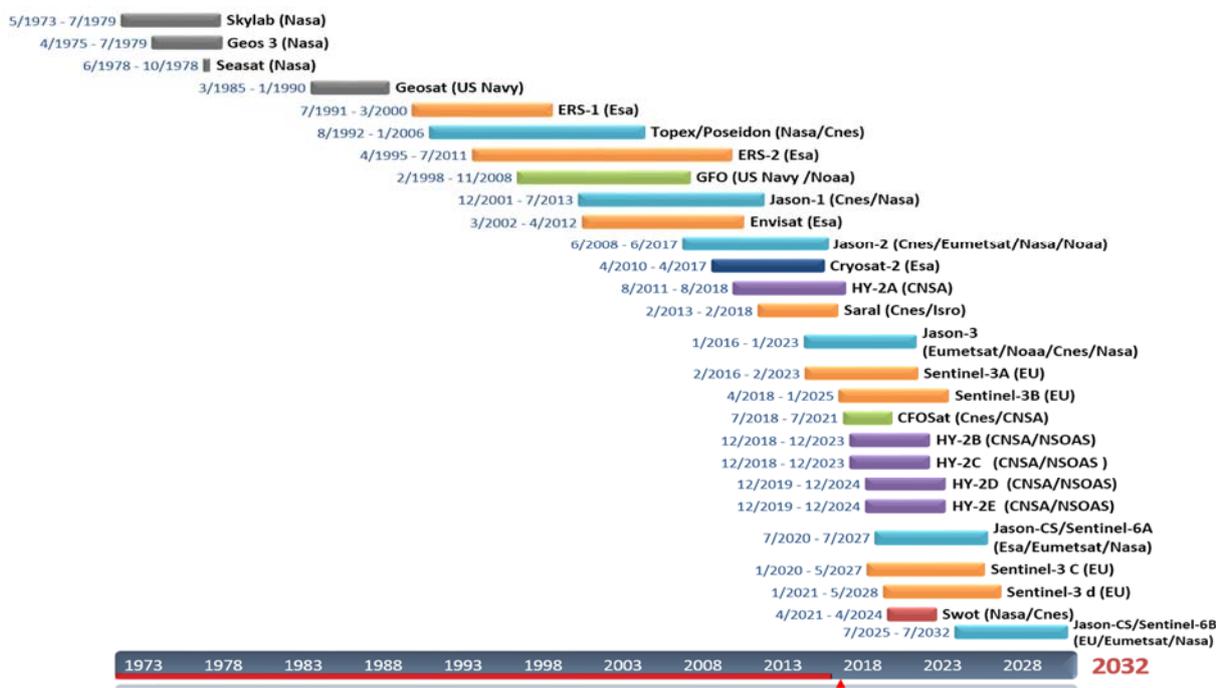


La altimetría de radar por satélite fue concebida y desarrollada en la década de 1970 para estudiar la variabilidad espaciotemporal del nivel de los océanos. En la actualidad, los radares altímetros miden la altura instantánea de la superficie bajo la posición vertical del satélite (nadir) con una precisión del orden de varios centímetros en océano. A diferencia de los sistemas pasivos de medición, que utilizan la radiación emitida por el sol o la Tierra, los radares son sistemas activos que utilizan su propia fuente de radiación, una circunstancia que ofrece numerosas ventajas: precisión de las mediciones, capacidad de observación tanto de día como de noche, etc. Además, las longitudes de onda utilizadas permiten su uso con independencia de las condiciones meteorológicas (es posible medir a través de las nubes, siempre que se corrijan determinados efectos).

Pero la altimetría de radar también permite medir la altitud de las grandes masas de agua continentales y los ríos, una capacidad que puede complementar a las redes de mediciones hidrométricas ya existentes o incluso sustituir determinadas estaciones hidrométricas consideradas poco fiables o poco eficaces (por ejemplo, por ofrecer unos plazos de entrega de la información demasiado prolongados). La altimetría espacial permite realizar mediciones del nivel de los cursos de agua y los lagos sin intervención humana sobre el terreno, más allá de las actividades de calibración, manteniendo un marco de referencia único, con cobertura global y con una sostenibilidad garantizada en el tiempo.

La altimetría hoy: medir la altura de la superficie

Se han realizado mediciones espaciales de altimetría de radar de forma ininterrumpida desde la década de 1990, con dos series de satélites que han ido tomando el relevo sucesivamente desde entonces (la serie ERS-1, ERS-2, Envisat, Saral, y la serie Topex/Poseidon, Jason-1, 2, 3). Durante este mismo periodo se han lanzado otros satélites de altimetría (GFO, HY-2A y en especial Cryosat-2). Con anterioridad a esa fecha incluso se lanzaron algunos satélites (Seasat, Geosat), pero estos no se utilizan en hidrología. Sentinel-3 constituye una nueva serie con una nueva órbita, iniciada en febrero de 2016 y destinada a prolongarse en el tiempo; el primer satélite (3A) fue lanzado en febrero de 2016.



Cronología de las misiones altimétricas

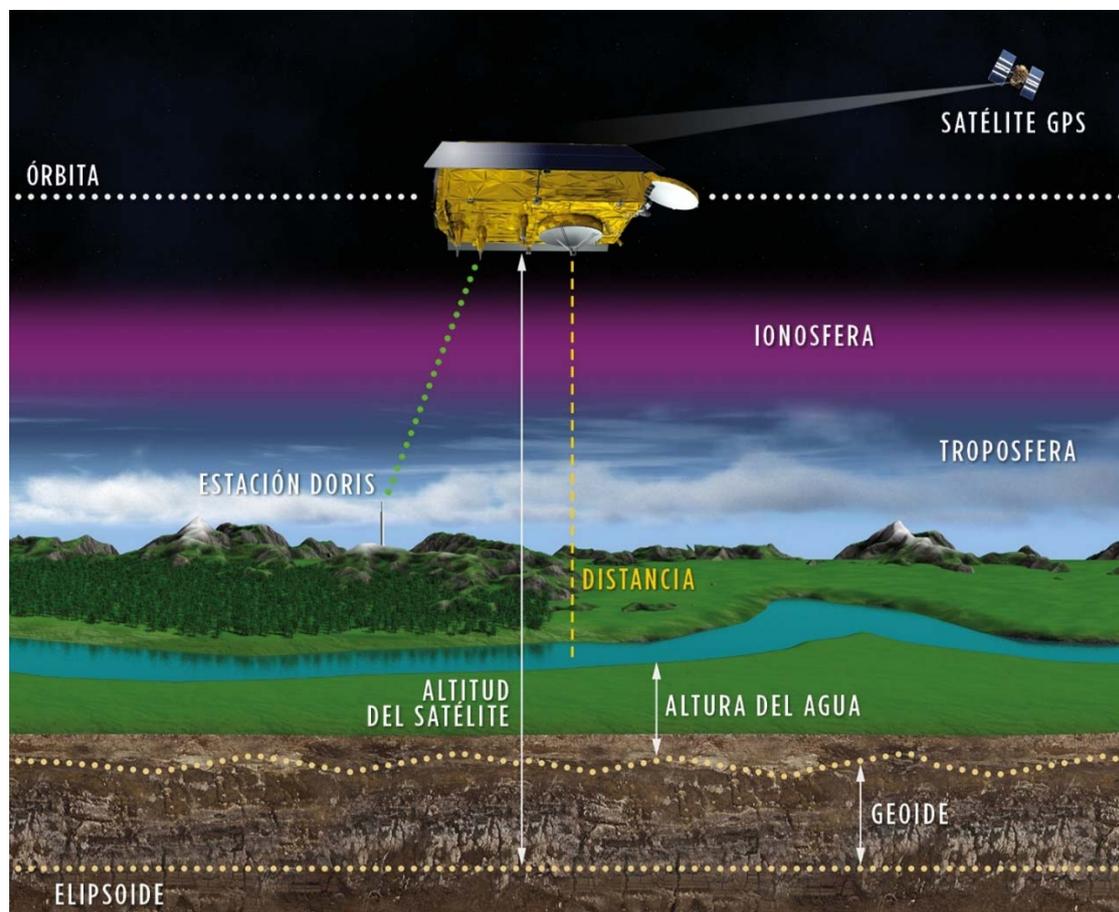
En la actualidad, todas las misiones altimétricas realizan mediciones únicamente en el nadir (el eje vertical bajo el satélite), por lo que proporcionan observaciones con una extensión espacial muy reducida. Esta constituye la principal limitación de estas misiones.

A día de hoy se utilizan dos técnicas: la altimetría «convencional» en las misiones Topex/Poseidon, todas las Jason, Saral o Envisat, denominada «LRM» (*Low Resolution Mode*, modo de baja resolución), y la altimetría «SAR» (*Synthetic Aperture Radar*, radar de apertura sintética), también denominada *Delay-Doppler Altimetry* (altimetría con efecto Doppler), que se utiliza en Cryosat-2 y las Sentinel-3.

El satélite Swot, cuyo lanzamiento está previsto para 2021, llevará a bordo una técnica nueva, la altimetría de barrido amplio, que permitirá observar los cursos y superficies de agua en dos dimensiones.

Dicho de forma simplificada, en estas dos técnicas se utiliza una onda de radar emitida por el satélite directamente hacia la tierra, que se refleja en la superficie (constituyendo el agua el mejor «espejo» posible, por lo menos cuando está en calma). Se mide el tiempo que tarda la onda en hacer el trayecto de ida y vuelta entre el satélite y la superficie; conociendo la velocidad de propagación de esta onda (la velocidad de la luz), se deduce la distancia entre el satélite y la superficie. El principio se asemeja al de la reflexión de las ondas sonoras. Cuando uno grita en dirección a un objeto capaz de reflejar el sonido de la voz, por ejemplo un cañón o una gruta, se oye el eco de la propia voz. Si conocemos la velocidad del sonido en el aire, es posible estimar la distancia teniendo en cuenta el tiempo que requiere el sonido en hacer el trayecto de ida y vuelta (por eso se habla también, por analogía, de «eco» de radar).

Además, a través de diversos instrumentos de a bordo (Doris, GPS, reflector láser), puede conocerse con gran precisión la altitud y la posición del satélite. Haciendo la resta correspondiente, se deduce una altura de la superficie respecto de una referencia, y en especial se observan las variaciones de dicha altura al pasar sucesivamente el satélite por encima de un mismo punto. La referencia utilizada en los datos de base es un elipsoide, es decir, una forma geométrica semejante a una esfera con los polos achatados, no muy distinta de la de la Tierra. No obstante, en hidrología se utiliza con mayor frecuencia el geoide, una superficie de igual gravedad (equipotencial del campo de gravedad), que se acerca más a la forma real de la Tierra, al estar deformada por relieves. En general, una superficie de referencia (geoide) viene dada junto a los datos altimétricos, aunque existan otras fuentes que aportan un geoide con mayor precisión. El uso de esta referencia permite obtener la altitud de la superficie de agua y, por tanto, de la pendiente, una variable primordial para la hidrología.



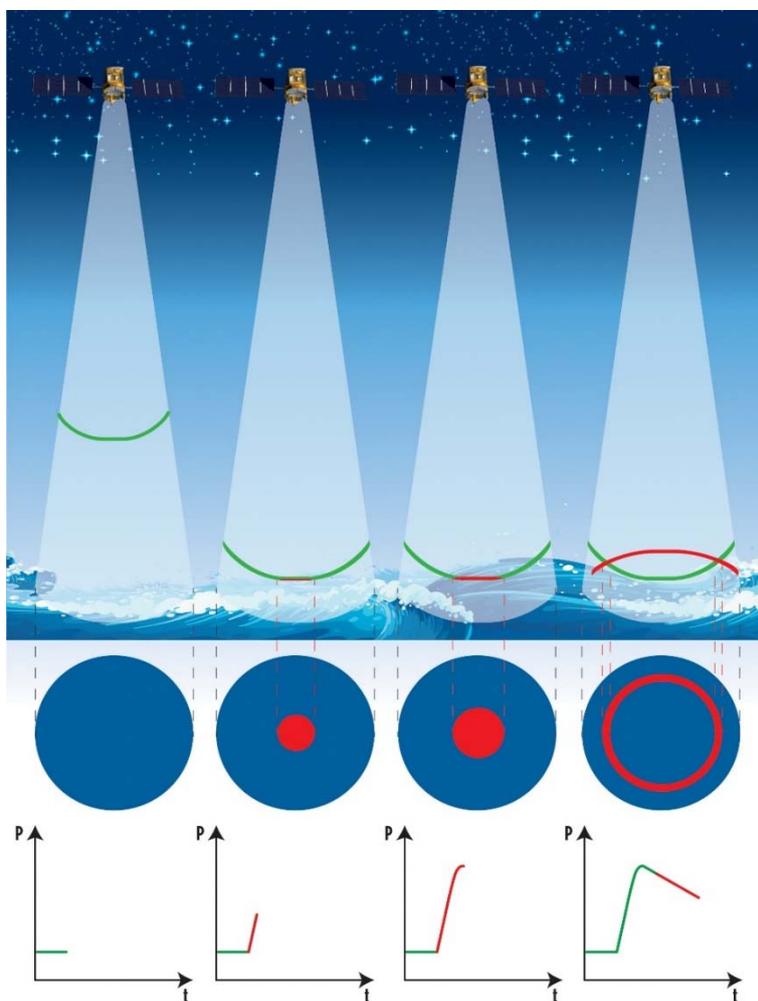
Principio de la altimetría

Pero esto no es más que un esquema que simplifica mucho las cosas. Por una parte, porque hay que tener en cuenta una serie de factores que influyen en la velocidad de la onda, y corregirla en consecuencia, corrección que se aplica utilizando modelos (sobre todo meteorológicos) y, eventualmente, mediciones auxiliares efectuadas por instrumentos a bordo del satélite (o no), pero sobre todo en océanos. Pero también porque, para hablar con propiedad, dicho tiempo de ida y vuelta no se cronometra. En efecto, la superficie reflectante rara vez es perfectamente plana, y la onda posee una extensión («mancha en el suelo») y una duración. Todo ello hace que el eco de vuelta no llegue instantáneamente en un momento determinado, sino que se escalone en el tiempo, con una amplitud que varía. Por tanto, se trabaja con la forma del eco de radar en función del tiempo; es lo que en altimetría se denomina la «forma de onda».

Los ecos de radar en la altimetría convencional

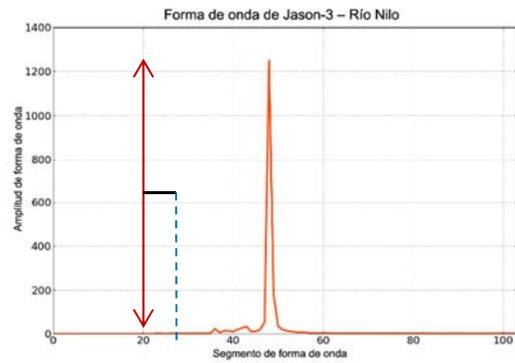
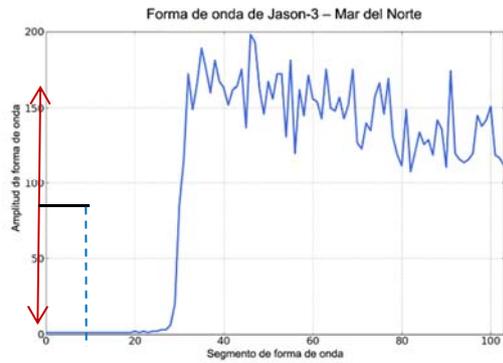
Los satélites en cuestión son: ERS-1 y 2, Topex/Poseidon, GFO, Jason-1, Envisat, Jason-2, Saral, HY-2 y Jason-3 (así como sus precursores).

La altimetría «convencional» tiene en cuenta la reflexión del haz emitido en su conjunto, o al menos el que retorna a la antena del satélite.



Eco de altimetría convencional en océano. En la parte superior, puede verse una ilustración esquemática del satélite y la onda emitida, con la onda reflejada en rojo. En la parte central, lo que ocurre en la superficie (en este caso, de un océano con una superficie plana). Abajo, el eco (o forma de onda) recibido por el altímetro, correspondiendo la parte roja de la curva a la etapa esquematizada justo arriba.

La parte que asciende bruscamente de este eco es la que se utiliza para determinar la distancia (el punto a media altura). La superficie de los anillos rojos es idéntica a la del círculo; la pendiente descendente de la curva está vinculada a la ganancia de la antena del altímetro.



Eco clásico en océano (izquierda) y en río (derecha). Sólo el primero es objeto de una representación completa en forma de ecuación [Brown, 1977]. El segundo, sin embargo, permite extraer la información temporal utilizando (en ambos casos) el tiempo del punto a media altura de la subida brusca observada en los dos casos.

Habida cuenta de la diversidad de ecos generados por las superficies hidrológicas, que pueden ir desde un único pico hasta una serie de picos múltiples, más o menos imbricados, se han tratado de elaborar clasificaciones en el marco de diversos proyectos. En la siguiente figura se muestran las clases utilizadas en el marco de la clasificación de los datos de Jason-2. Algunas clases se corresponden con ecos en océano o superficies de agua bastante extensas (clase 1, ecos de Brown). Los ecos en ríos tienden a integrarse en la clase 2 o en clases con más ruido (pero, precisamente por ello, más difíciles de interpretar, como la clase 23, o incluso no explotables en absoluto, como la clase 3). Los lagos helados pueden producir ecos de la clase 13.

<p>Clase 1</p> <p>Ecos de Brown</p>	<p>Clase 2</p> <p>Ecos de pico</p>	<p>Clase 3</p> <p>Ecos con mucho ruido</p>	<p>Clase 4</p> <p>Ecos lineales</p>	<p>Clase 5</p> <p>Ecos con pico al final</p>	<p>Clase 6</p> <p>Ecos de pico muy amplio</p>
<p>Clase 12</p> <p>Ecos Brown + pico</p>	<p>Clase 23</p> <p>Pico + ruido</p>	<p>Clase 13</p> <p>Brown + perturbación del flanco anterior</p>	<p>Clase 24</p> <p>Brown + pico + variación lineal</p>	<p>Clase 15</p> <p>Brown + aumento del flanco anterior</p>	<p>Clase 0</p> <p>CS32</p>
<p>Clase 21</p> <p>Ecos Brown + pico</p>	<p>Clase 35</p> <p>Flanco anterior al final + ruido</p>	<p>Clase 16</p> <p>Brown + meseta con fuerte descenso</p>	<p>Clase 99</p> <p>??</p> <p>Duda</p>		

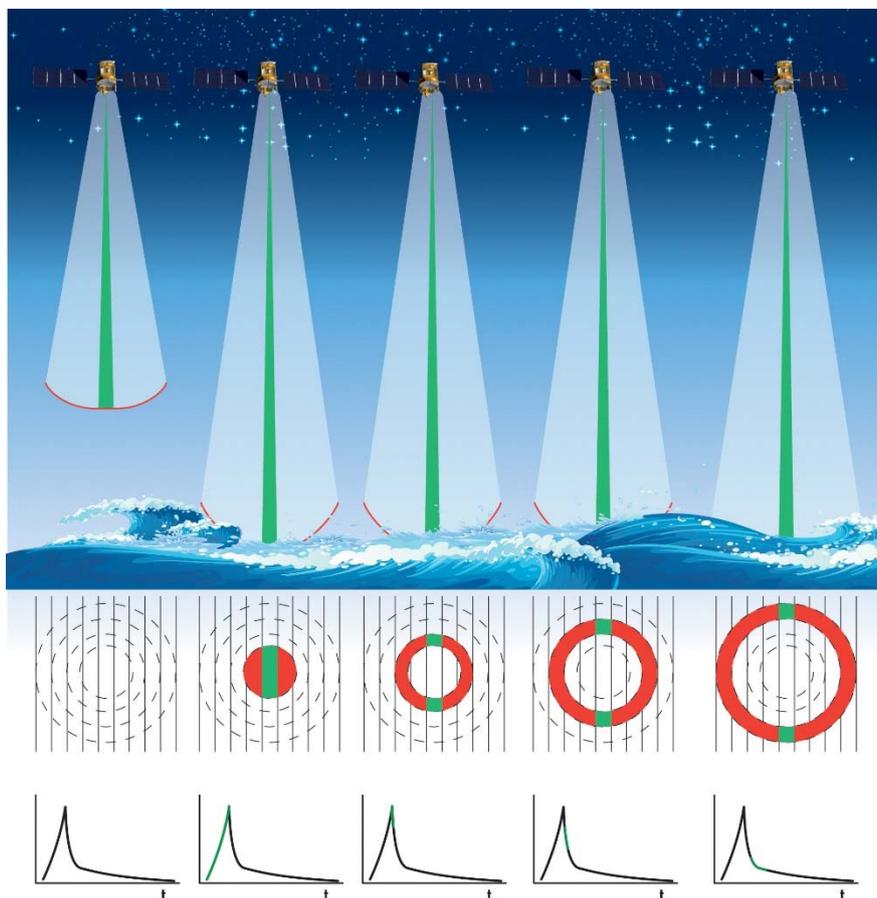
Diferentes formas de eco (clases de formas de onda, altimetría convencional); la clase 2 es la que encontramos típicamente en un curso de agua simple, la clase 1 («Brown») es la forma clásica en océano.

Los ecos de radar en la altimetría con efecto Doppler

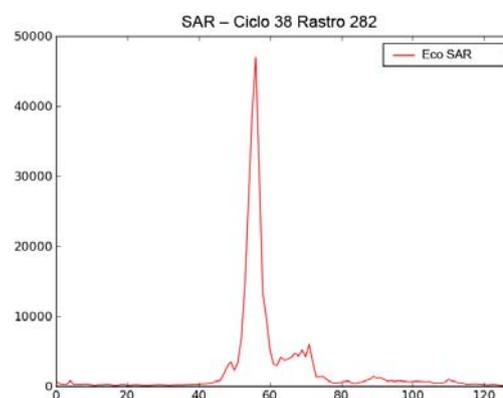
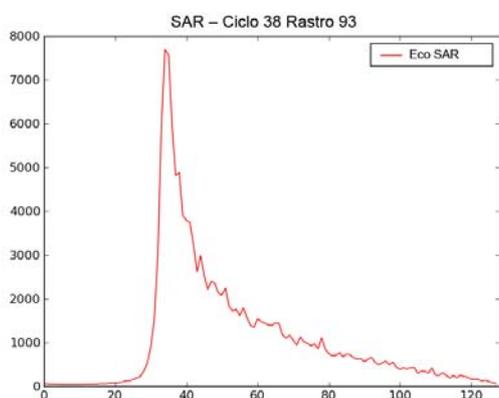
Los satélites en cuestión son: Cryosat-2, Sentinel-3 (A y B), en el futuro Sentinel-3 (C y D), y Jason-CS/Sentinel-6.

El sonido emitido por un objeto en movimiento parece más o menos agudo en función de la velocidad a la que se aproxima, y más o menos grave en función a la velocidad a la que se aleja. Es lo que se denomina efecto Doppler (o Doppler-Fizeau, cuando hablamos de radiación electromagnética).

La altimetría «SAR» hace uso de este efecto Doppler para discriminar las reflexiones procedentes de la parte posterior o de la parte anterior del haz emitido: si vienen de la parte posterior, todo ocurre como cuando el satélite se aleja; si vienen de la parte anterior, el satélite se acerca. Así, se obtiene una especie de corte «en tramos» perpendiculares a la trayectoria del satélite de la mancha en el suelo convencional y, por tanto, una mayor resolución espacial, al menos en la dirección en la que avanza el satélite.



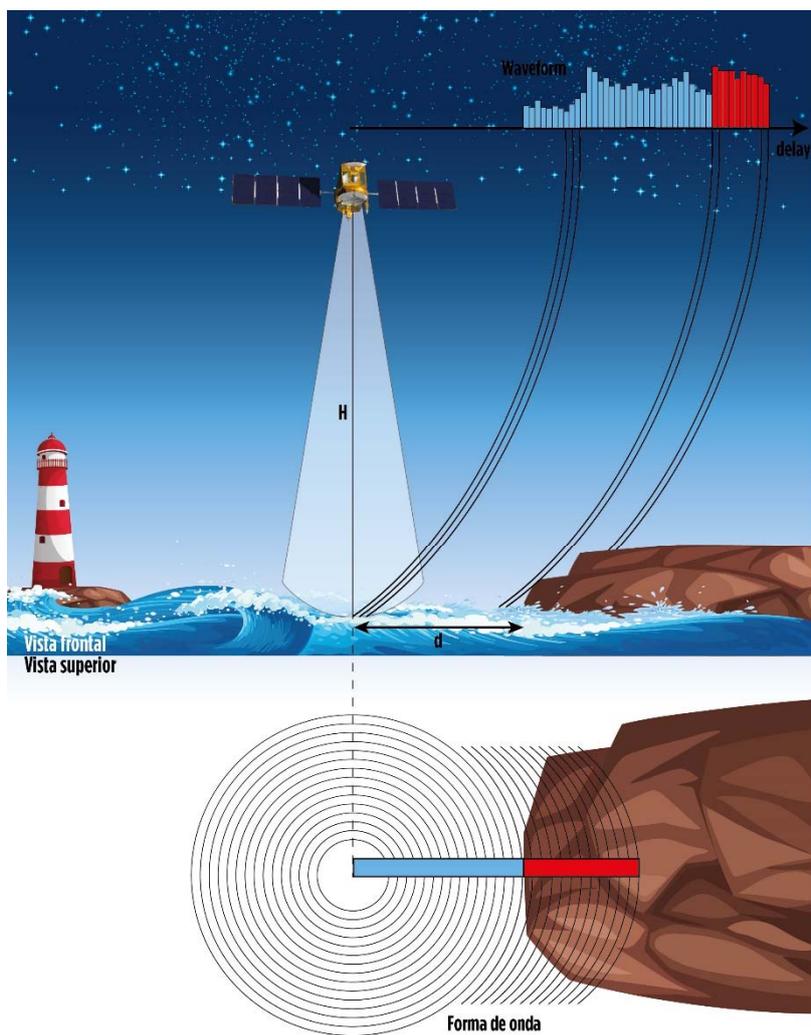
Formación de un eco mediante altimetría Doppler (en océano); allí donde la altimetría convencional mostraba una cuasimeseta tras la subida (porque la superficie de todos los anillos representados es igual), el eco en altimetría Doppler decrece. (Créditos Cnes/CLS, extraído de una presentación de K. Rayney)



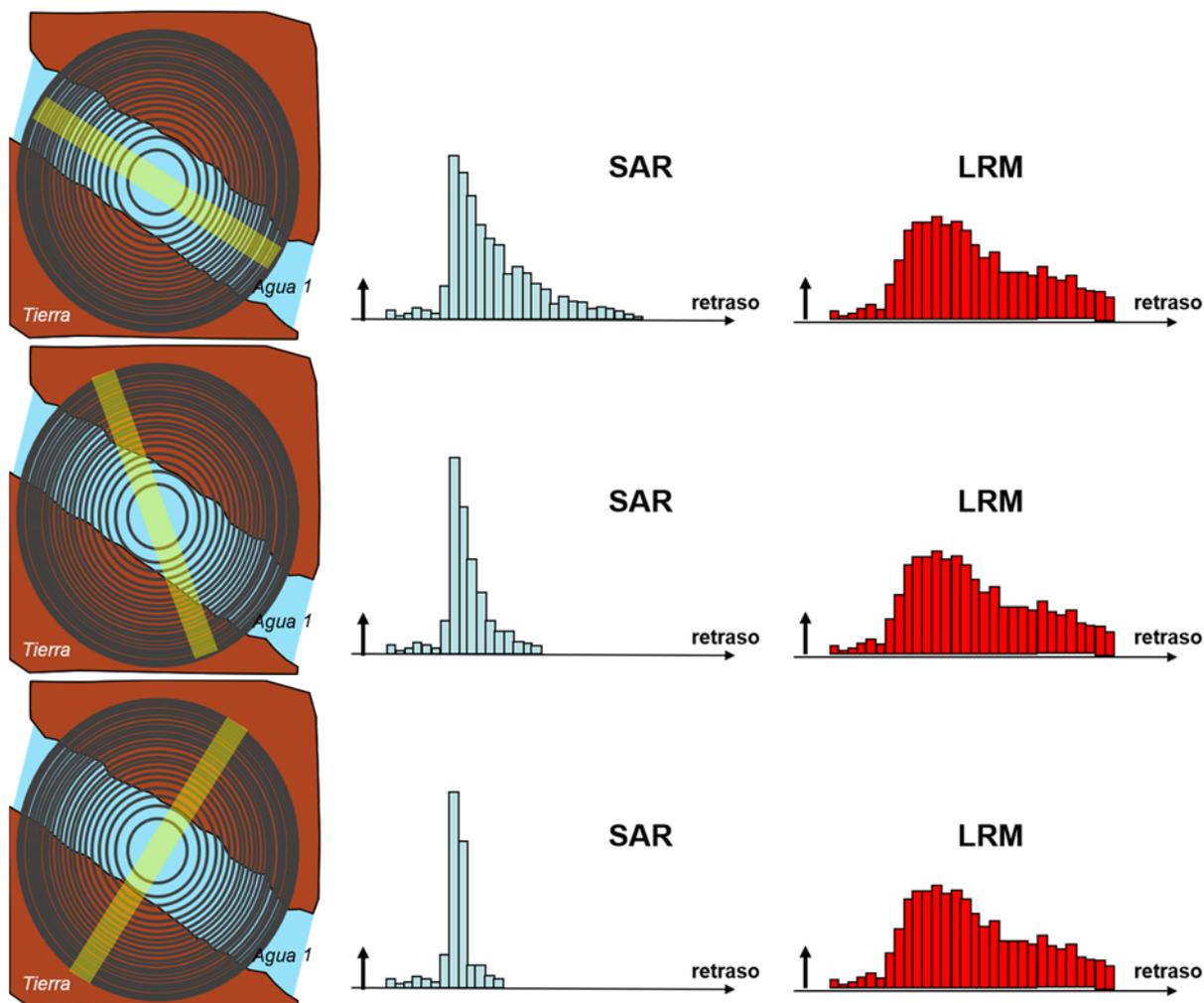
Eco de altimetría Doppler en océano (izquierda) y en río (derecha).

¿Sobre qué se refleja la onda de radar del altímetro? (o: ¿qué se observa realmente?)

La «huella» (o «mancha en el suelo»), es decir, la zona sobre la que se refleja la onda de radar antes de volver al altímetro, depende de la altitud del satélite (723, 790 o 1.336 km), de la resolución del alcance de una forma de onda (vinculada a la banda ancha del altímetro), de la apertura y la ganancia de la antena, y de la duración de la medición (o el número de «alcances»). Así, pues, el radio de la «huella» puede oscilar entre los 4,8 y los 9,5 km. Esto genera superficies de aproximadamente 290 km² para un Jason (a 1.336 km de altitud) y 100 km² para Saral. Utilizando la técnica con efecto Doppler, que permite dividir esta superficie en varios «tramos», la zona observada se reduce considerablemente, estabilizándose en los 5 km² aproximadamente. Si centramos nuestra atención en los ríos e incluso en los pequeños lagos, es prácticamente seguro que en zonas de este tipo no solo haya agua. Dicho esto, si tenemos en cuenta únicamente el frente de subida y los primeros alcances del eco, limitamos en cierta medida esta superficie, pero puede perderse información.



En caso de que la mancha en el suelo incluya tierras, el eco podría verse sujeto a perturbaciones, que irán en aumento cuanto más reflectante sea el suelo



Ecós en modos SAR o clásico (LRM) según las respectivas posiciones de la trayectoria del satélite (perpendicular a los rectángulos del modo SAR) y del curso de agua.

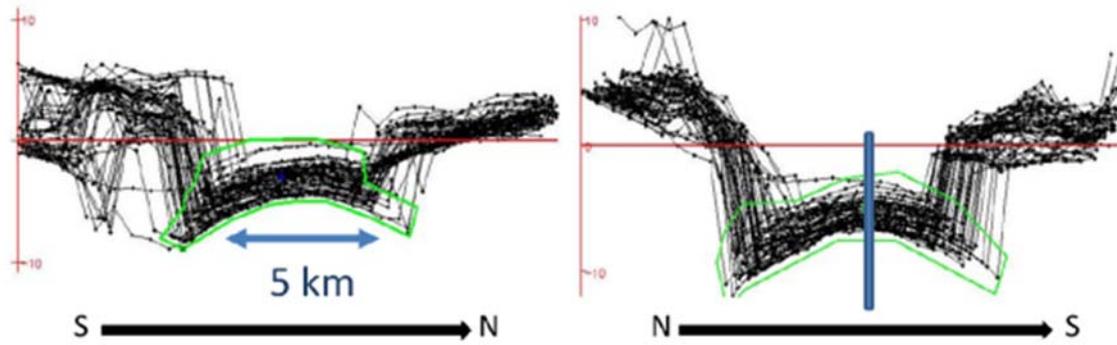
Las condiciones de obtención de mediciones altimétricas en grandes lagos y mares interiores son muy similares a las condiciones oceánicas. Con superficies de agua lo bastante extensas, y siempre que la posición esté lo suficientemente alejada de las riberas y los relieves que las rodean, se obtienen sobre todo ecos denominados «de Brown».

En los cursos de agua, la señal es más compleja teniendo en cuenta el carácter heterogéneo de las superficies observadas. La reflexión se produce sobre una mezcla de superficies de diferentes tipos y con diferentes capacidades reflectantes, como el agua libre, los bosques, las llanuras aluviales, etc. Esto tiene importantes consecuencias para la forma del eco, y en consecuencia para la capacidad de extraer los datos deseados del mismo, sobre todo la distancia, por lo que las mediciones poseen una precisión menor. Todos los datos altimétricos procedentes de superficies heterogéneas deben ser reelaborados para arrojar una medición suficientemente precisa de la elevación de la superficie. Esta reelaboración recibe el nombre de *retracking* y hace uso de algoritmos específicos (Ice1, Ice3, Sealce...). Es posible ajustarla utilizando algoritmos diferentes dependiendo del tipo de forma de onda, lo que también permite limitar la zona tenida en cuenta en la observación centrándose únicamente en el inicio del eco (los primeros «alcances»).

Estos algoritmos de *retracking* se basan en enfoques empíricos, al no existir ningún modelo analítico más allá del océano abierto (modelo de Brown). Actualmente hay investigaciones en curso para mejorar estos algoritmos. Uno de los enfoques que está siendo desarrollado hace uso de un modelo numérico de terreno (MNT) y de mapas de rugosidad (Legos). Otro centra su atención en las formas de onda previas y posteriores a la tratada (Legos/Ifremer), basándose en el principio de que deben ser similares.

Además, ocasionalmente se observan reflexiones en superficies con poca pendiente y gran capacidad reflectante (por ejemplo una playa de arena mojada), como por ejemplo orillas, que reflejan la onda de radar. En este caso, el

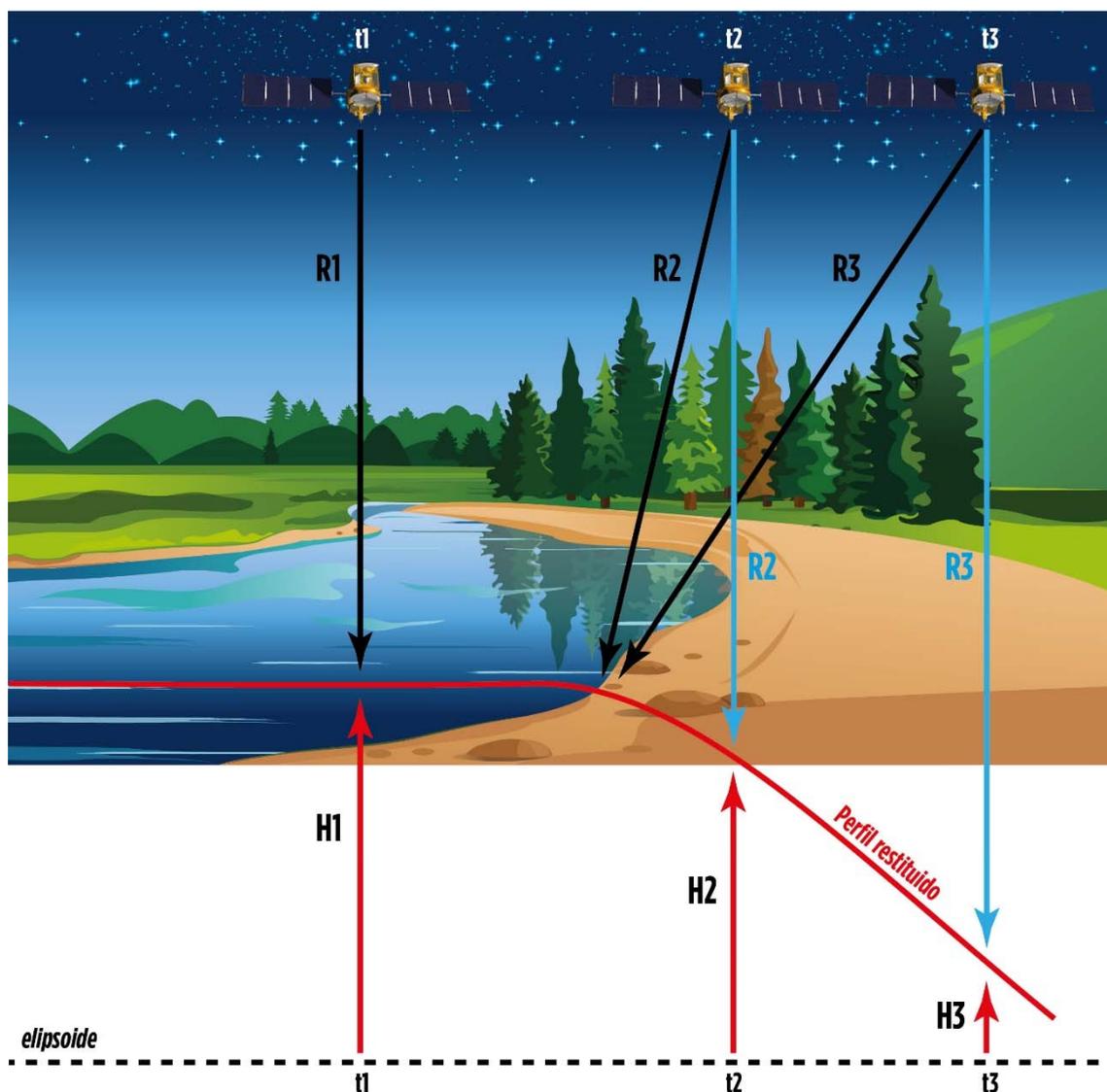
altímetro recibe una señal que no refleja el nivel del agua (ni siquiera el de la orilla, ya que no procede del nadir), sino una reflexión «parásita».



Ejemplo de enganche persistente en el río Paro (Créditos S. Calmant, IRD)

Los perfiles hidrológicos de los lagos, ríos y zonas aluviales obtenidos mediante altimetría por satélite se consideran planos o ligeramente inclinados debido a la pendiente de la superficie de agua. Sin embargo, en muchos perfiles hidrológicos se observan estructuras parabólicas giradas hacia arriba. Este artefacto, que se conoce como enganche (*hooking*), tiene lugar cuando el altímetro sigue midiendo una superficie reflectante que acaba de sobrevolar a pesar de no estar ya ubicado sobre ella. Esto supone una ampliación del tiempo de trayecto de ida y vuelta de la onda, lo que genera una subestimación de la altura altimétrica (sobrestimación de la distancia satélite-superficie). Detectando estas parábolas es posible, tras aplicar las correcciones geométricas que proceda, aumentar la cantidad de observaciones del curso de agua, y por tanto reducir la incertidumbre asociada a la medición. Esto reviste un interés especial en el caso de los cursos de agua que, por su reducida anchura, posibilitan un número menor de observaciones por parte del satélite (véase la imagen incluida más abajo, en la que puede verse cómo, gracias al citado «enganche», pueden tomarse datos del estrecho río (barra azul) a lo largo de varios kilómetros).

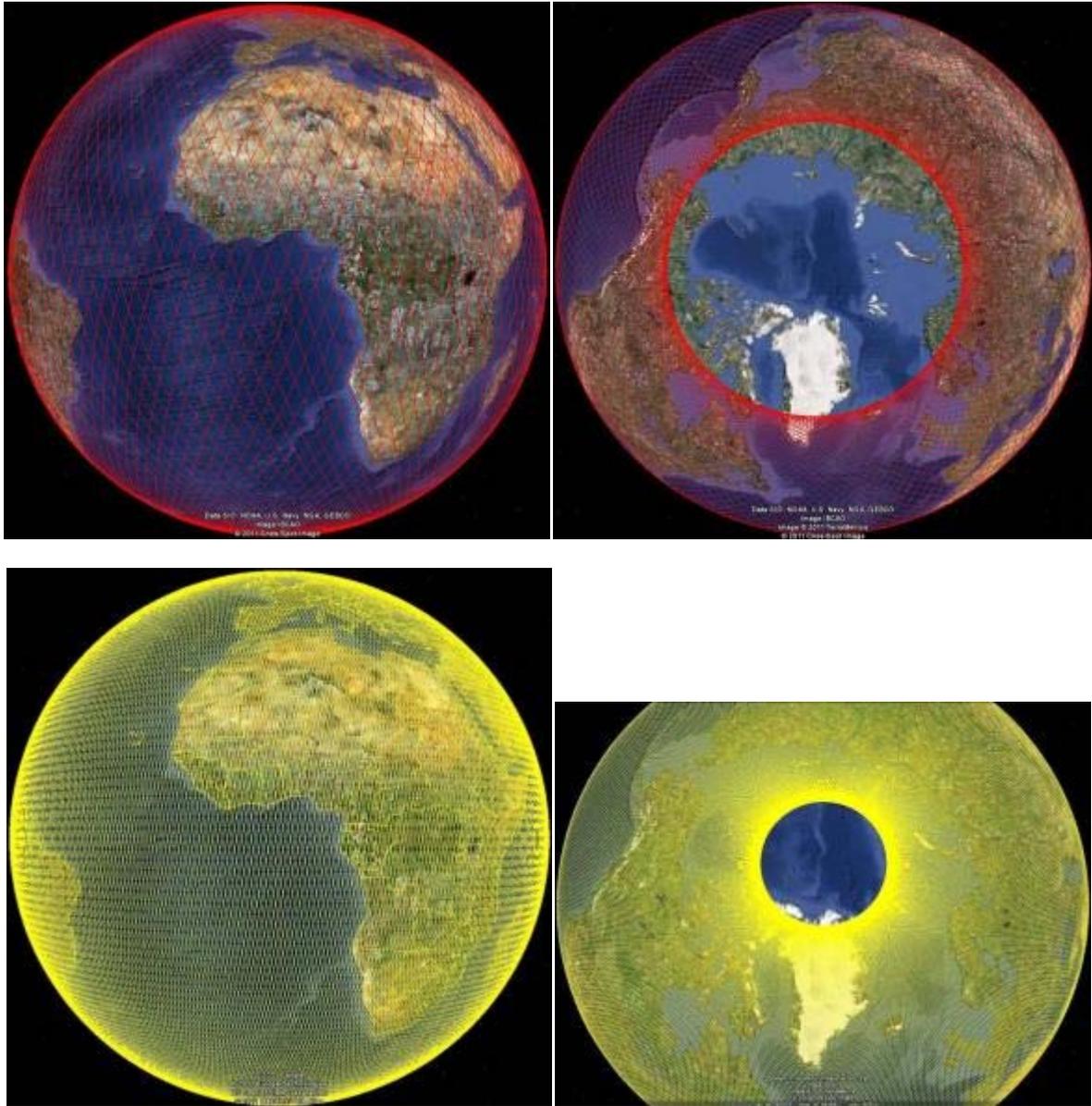
Para eliminar los ruidos aleatorios, se utiliza una media o una mediana de las mediciones individuales de la superficie de agua. En general, los datos altimétricos se suministran con dos resoluciones diferentes, a menudo en el mismo fichero; la primera recibe el nombre de «1 Hz» y proporciona promedios de mediciones por segundo. La segunda, cuya frecuencia depende del satélite (10, 20 o 40 Hz), incluye únicamente promedios sobre $1/10^{\text{e}}$, $1/20^{\text{e}}$ o $1/40^{\text{e}}$ de segundo, proporcionando de esta forma mediciones más cercanas entre sí pero con más ruido. Esto se corresponde con una medición cada 700 m (Topex/Poseidon), 350 metros (Envisat, los Jason...) y 175 metros (Saral) aproximadamente.



Principio esquemático de los enganches persistentes; la realización de observaciones «de lado» alarga la distancia medida, lo que conlleva la percepción errónea de una elevación de la superficie.

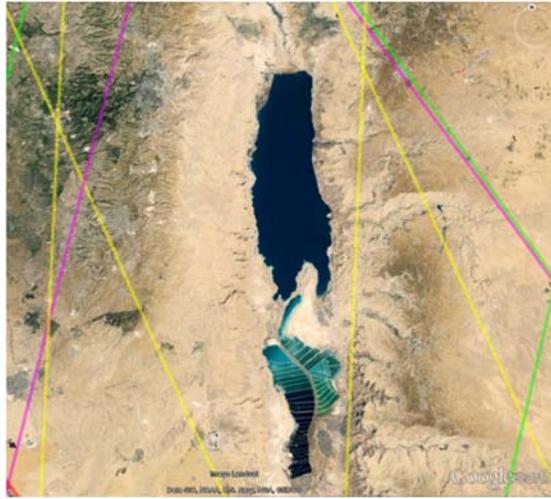
Cobertura espaciotemporal de las mediciones

La altimetría actual no es una técnica de elaboración de imágenes: el satélite «sondea» lo que se encuentra directamente bajo él. Además, la órbita de un satélite altimétrico se elige tratando de alcanzar un buen equilibrio entre muestreo espacial y muestreo temporal: si un satélite pasa con frecuencia por encima de un mismo punto (muestreo temporal elevado), cubrirá menos territorio que con un periodo más prolongado (muestreo temporal más limitado).



Rastros en el suelo de Jason (arriba) y Saral (abajo). En el caso de los Jason, la malla es a todas luces menos ajustada y las mediciones están más alejadas de los polos, pero el tiempo de revisita es de 10 días, lo que permite observar variaciones con frecuencias más elevadas.

De esta forma, puede obtenerse una malla más o menos ajustada, pero que nunca cubrirá la superficie en su totalidad. Cabe la posibilidad de que un satélite concreto no pueda observar en absoluto determinadas masas de agua de grandes dimensiones, como por ejemplo el mar Muerto o el lago de Hourtin (Gironde, Francia).



Rastros de Jason-1, Envisat y GFO en torno al mar Muerto.

Para resolver este problema, una de las soluciones consiste en asociar varios satélites. Desde este punto de vista, las iniciativas emprendidas desde hace más de veinte años en el sentido de asociar satélites con órbitas repetitivas invariables a 10 días, 35 días y más, permite prever en el futuro tratamientos con fines hidrológicos de los archivos generados a lo largo de tres generaciones de emparejamiento de satélites (Topex/Poseidon/ERS-1 y 2, Jason-1/Envisat, Jason-2/Saral). A partir de ahora, Jason-3 y Sentinel-3A, y en breve Sentinel-3B, deberían garantizar una cobertura espaciotemporal única, que se prolongará durante el próximo decenio (Jason-CS, Sentinel-3 C y D).



Rastros de los satélites Sentinel-3A y 3B, de nuevo sobre el mar Muerto.

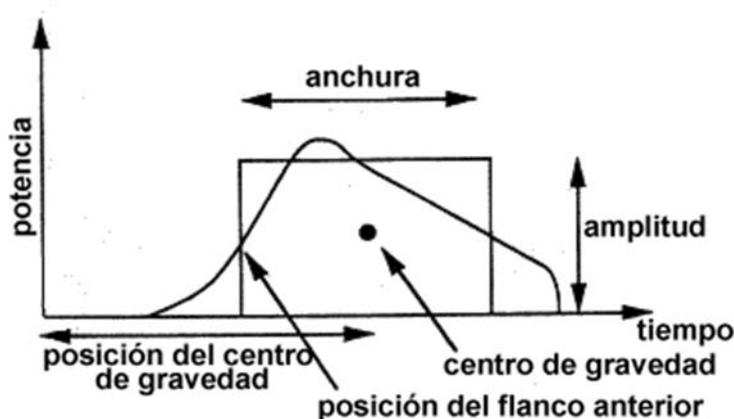
Otro enfoque, utilizado en el caso de los ríos, consiste en modelar lo que ocurre aguas abajo de las mediciones tomadas por el satélite. Para ello, se utiliza la medición espacial como si hubiese una estación hidrológica instalada en el lugar en el que el rastro en el suelo se cruza con el curso de agua, combinándola con datos meteorológicos. La aportación de las observaciones altimétricas es especialmente importante en el caso de las cuencas transfronterizas, al permitir a los países situados aguas abajo contar con información sobre el estado de las variables hidrológicas en las secciones situadas aguas arriba de las cuencas.

No obstante, el reducido muestreo temporal hace que las mediciones altimétricas no puedan utilizarse directamente para la alerta rápida en caso de crecida. Ahora bien, sí pueden utilizarse para dar una alerta precoz aguas abajo (<http://floodlist.com/asia/bangladesh-expand-servir-satellite-flood-warning-system>), así como, *a posteriori*, para comprender y modelar este tipo de eventos.

Del eco a la altura de la superficie hidrográfica

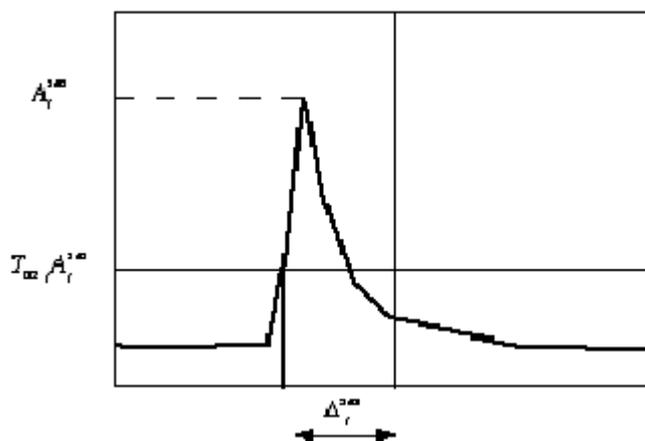
Como ya se ha mencionado, la distancia satélite-superficie se deduce del eco de radar. En un eco típico de océano (o lago grande), la estimación se basa en la abscisa del punto situado a media altura de la parte en fuerte pendiente (el frente de subida) (se tiene en cuenta la distancia tomada a media altura de las olas). En casos de mayor complejidad, sobre todo cuando hay varios «picos», como suele ocurrir en aguas continentales, las cosas se complican y se utilizan otros algoritmos denominados de *retracking* para estimar esta distancia.

- Algoritmos basados en un método de valor de umbral:
 - Ice1 (Wingham et al., 1986): creado en un primer momento para estudiar los casquetes polares. El principio consiste en definir un rectángulo cuyo centro de gravedad concuerda con el de la forma de onda. A continuación, se toma la abscisa del primer punto cuya potencia alcance un porcentaje determinado de la amplitud de dicho centro de gravedad (en este caso, el 30%)



Principio del algoritmo Ice1 (según Wingham et al. 1986)

- Ice3 funciona según el mismo principio que Ice1, pero con un análisis centrado en una parte limitada de la forma de onda (dejando de lado la parte final del eco).
- Sea-Ice (Laxon, 1994): algoritmo utilizado para estudiar los hielos marinos

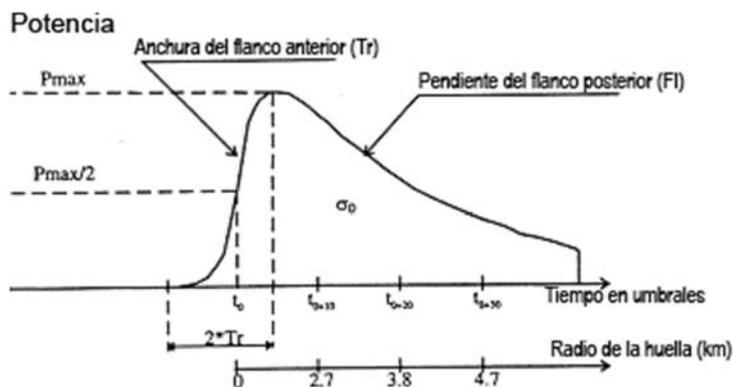


Principio del algoritmo Sea Ice (Laxon, 1994)

Estos tres algoritmos de *retracking* son empíricos (y no se basan en leyes físicas matematizadas); no tienen en cuenta las características de cada instrumento, y tan solo proporcionan la distancia satélite-superficie y el coeficiente de retrodifusión, no los demás parámetros que pueden extraerse de los ecos. Ice1 es el que más se

utiliza en aplicaciones hidrológicas. Ice3 mejora estos resultados, pero tan solo se proporciona a los usuarios en el caso de Jason-2.

- Algoritmo basado en el ajuste de las formas de onda reales con modelos teóricos de forma de onda
 - Ocean [Brown, 1977]: algoritmo de base utilizado desde las primeras misiones altimétricas. Se utiliza un algoritmo de estimación de máxima verosimilitud (MLE, por las siglas en inglés de *Maximum Likelihood Estimation*) que se basa en tres o incluso cuatro parámetros («MLE3» o «MLE4»).
 - Ice2 [Legrésy y Rémy, 1997]: creado para estudiar el casquete polar de la Antártida y el casquete glaciar de Groenlandia



Forma de onda teórica investigada por Ice2

- Red3 analiza solo una parte del eco (-10; +20 muestras en relación con el frente de subida) con un estimador de máxima verosimilitud (resuelto con tres parámetros: distancia, amplitud y compuesto Sigma).
- Océ3 funciona según el principio de máxima verosimilitud con tres parámetros (MLE3), pero con un eco previamente filtrado para reducir el ruido.

A excepción de Ice2, estos métodos son idóneos, sobre todo, para el océano, y eventualmente para lagos o masas de agua de grandes dimensiones.

- Método de reconocimiento de formas: se seleccionan las formas de onda en función de su aspecto, y a continuación se aplica un algoritmo de reelaboración adaptado a cada uno de los tipos identificados.
- El *retracker* adaptativo combina varias mejoras comprobadas en el marco de diferentes proyectos. Utiliza un parámetro de rugosidad de la superficie que permite tener en cuenta diferentes tipos de superficie. Adapta su análisis a la longitud útil del eco, dependiendo de su clase. También tiene en cuenta la respuesta impulsional real del instrumento, en vez de un impulso teórico. De esta forma se obtiene una aproximación óptima a la forma de onda, y ello con independencia de las superficies sobre las que se refleje la onda, sin recurrir a diferentes algoritmos, y proporcionando al final todos los parámetros que es posible extraer de los ecos (distancia satélite-superficie, pero también pendiente del frente de subida y amplitud, pendiente del flanco).

De la altura de la superficie a las variables hidrográficas

En general, el altímetro no sigue los ríos a lo largo de todo su curso, sino que los cruza en diferentes puntos; es por este motivo que se define la noción de «estación virtual»: todo ocurre como si hubiese una estación de medición en el lugar en el que, de media, el satélite cruza el curso de agua. A continuación, esta medición puede utilizarse como una medición *in situ*, con la salvedad de que no se conoce necesariamente la profundidad exacta del curso de agua

en ese punto; se trabaja, por tanto, más con variaciones de la altura que con la profundidad (altura absoluta respecto del fondo del lecho del curso de agua). Respecto de las bases de datos *in situ* clásicas, la altimetría por satélite proporciona observaciones con una resolución espacial más importante (incluso en el caso de que los puntos de observación posibles estén predeterminados por la órbita escogida, habrá más puntos que estaciones *in situ*) pero con una resolución temporal menor. No obstante, ocurre con mucha frecuencia que las bases de datos *in situ* tan solo se actualizan periódicamente, de forma que los únicos datos disponibles en tiempo cuasirreal son las observaciones por satélite.

Las mediciones de altura pueden combinarse con imágenes ópticas o imágenes de radar obtenidas por otros satélites (Spot, Pléiades, etc., y Sentinel-3, Sentinel-2, Sentinel-1, CosmoSkyMed, TerraSAR, etc.) para determinar la extensión de una superficie de agua. De esta forma, se calculan las variaciones del volumen de agua.

Además, el caudal de un curso de agua puede calcularse a partir de la altura, en combinación con otros datos. Se han desarrollado modelos de mayor o menor complejidad (curvas de tarado altura/caudal, modelos hidráulicos, métodos de asimilación, etc.), que integran más o menos datos auxiliares (batimetría, etc.). Por lo general, los métodos se basan en la existencia de una relación unívoca entre la variación de altura y la variación de caudal. Estudios recientes relativos a numerosas cuencas de todo el mundo han puesto de manifiesto que es posible obtener los caudales partiendo de las alturas de agua. La misión Swot se ha preparado, como uno de sus componentes principales, para mejorar estos estudios. Las interacciones entre meteorología y altimetría ofrecen buenas perspectivas para el conocimiento del caudal.

La cuestión de la precisión

La precisión de la medición altimétrica en hidrología depende en gran medida de la superficie o curso de agua que desee observarse, así como de su entorno cercano. Cabe tener en cuenta aspectos tales como la geometría del rastro en el suelo respecto del agua, las orillas y sus relieves, la vegetación, etc.

La precisión de las mediciones altimétricas en masas de agua continentales se ve afectada por varios factores. Una de las posibles causas de error son las correcciones medioambientales. Más importantes aún son las incertidumbres inducidas por la amplitud del haz del radar. Dado su tamaño, de varios kilómetros, la mayoría de los ecos proceden de una mezcla de agua, islas y riberas (cuando estas son planas). Tanto estas mezclas como la gran capacidad de reflexión de los ecos en el nadir sobre superficies de agua lisas dificultan el cálculo de la altura utilizando los algoritmos existentes. Los resultados obtenidos con unos u otros dependen del entorno de la estación virtual (vegetación, relieve, tipo de lecho, riberas encajadas o planas...). Además, la experiencia demuestra que los sesgos detectados en relación con una estación virtual lo serán también para un detector (una misión).

La distancia satélite-superficie se estima con una precisión de 2 centímetros en océanos. En los grandes lagos (superficies de agua de grandes dimensiones que el altímetro «percibe» como un océano), la precisión es de aproximadamente 5 cm. En los cursos de agua, la precisión de los altímetros convencionales no suele bajar de los 15-20 cm en el caso de las mejores estaciones virtuales (es decir, las que presentan el mejor contraste radiométrico, y con cursos de agua de más de un kilómetro de ancho), y puede alcanzar los 60-80 cm en el caso de las estaciones virtuales menos precisas. Las tecnologías SAR e InSAR empiezan a ser objeto de estudios, que arrojan resultados *a priori* mejores que la altimetría clásica, pero que siguen dependiendo de un gran número de factores asociados al curso de agua y su entorno.

Por último, cabe señalar que los datos altimétricos se suministran en diferentes plazos tras la medición. El plazo más rápido es de 2 h; luego, entre 24 y 48 h; y por último, entre 30 y 75 días. Estos plazos adicionales permiten recabar datos auxiliares (sobre todo modelos meteorológicos), pero en especial calcular con mayor precisión la altitud, ya que, con más tiempo, es posible conocer la trayectoria del satélite en su órbita, lo que permite realizar cálculos más

precisos. En las superficies hidrológicas, la mejora entre los datos a 24/48 h y los datos a 30 días puede no ser significativa. La elección entre estos tipos de datos dependerá, en consecuencia, del tipo de uso que vaya a hacerse de ellos: un uso operativo (que requiere una entrega rápida de los datos) o un estudio a largo plazo (en cuyo marco sólo los datos con el plazo más largo estarán disponibles a lo largo de toda la vida útil de un satélite).

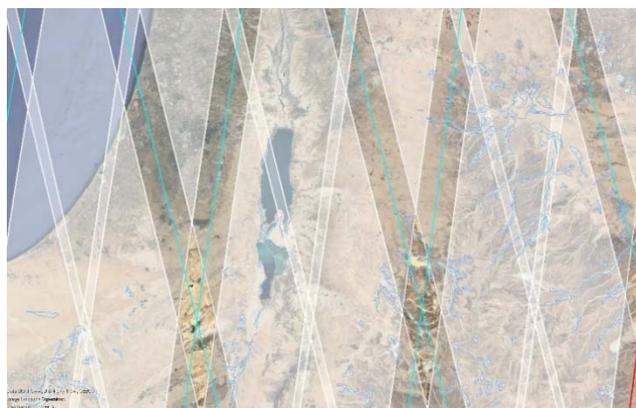
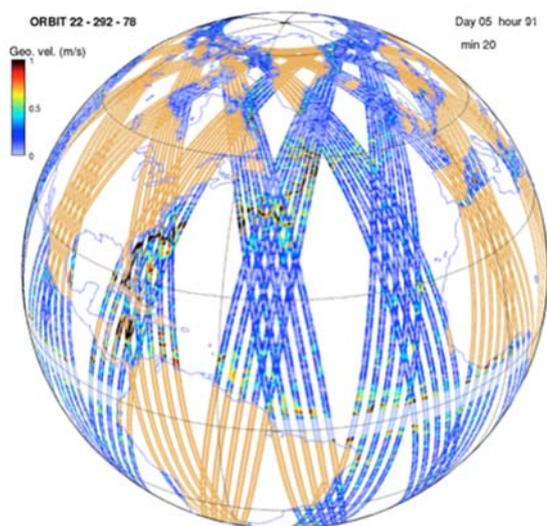
Datos disponibles

En altimetría clásica aplicada a la hidrología, existen dos grandes categorías de datos:

- Los datos de tipo *Geophysical Data Records* (GDR) y *Sensor Geophysical Data Records*, que contienen todos los elementos necesarios para calcular una altura de agua cada 1 s y 1/20^º s a lo largo del rastro de cada satélite; en la actualidad, estos datos se suministran en formato «NetCDF», autodescrito y estandarizado (lo que aún no es el caso de todos los datos de la década de 1990). También existen variantes con algoritmos muy recientes, que pueden revestir mayor interés para la hidrología. Estos datos son completos, pero bastante complejos de utilizar.
- Datos de alturas de agua «precalculados», en determinados cursos de agua y lagos, a menudo suministrados en formato de texto (en concreto csv). Son mucho más sencillos de utilizar, pero no se calculan en todas partes. Estas bases de datos, que son de acceso libre y gratuitas, tienen como objetivo realizar un inventario de las alturas de agua por satélite del máximo de cursos de agua posibles para brindar a los diversos usuarios (gobiernos, institutos de investigación, oficinas de proyectos, etc.) la posibilidad de realizar un seguimiento de los recursos hidráulicos (por ejemplo, hydroweb.theia-land.fr).

Un mañana marcado por Swot

La futura misión altimétrica Swot (siglas en inglés de *Surface Water and Ocean Topography*, Nasa/Cnes/CSA/UKSA) será de todo punto diferente a las anteriores. Más concretamente, Swot no solo suministrará mediciones de altura, sino que también podrá estimar anchuras o extensiones de agua. Además, el dato será una imagen: una matriz de mediciones que abarcará dos franjas de 50 km a ambos lados de otra franja de 20 km en cuyo centro sólo se realizará la medición clásica en el nadir. Además de la ventaja de obtener un dato en dos dimensiones y, por tanto, en particular, pendientes en todas las direcciones, esto permitirá asimismo cubrir la práctica totalidad de la superficie del globo, sin los agujeros en la malla de los satélites anteriores, o casi.



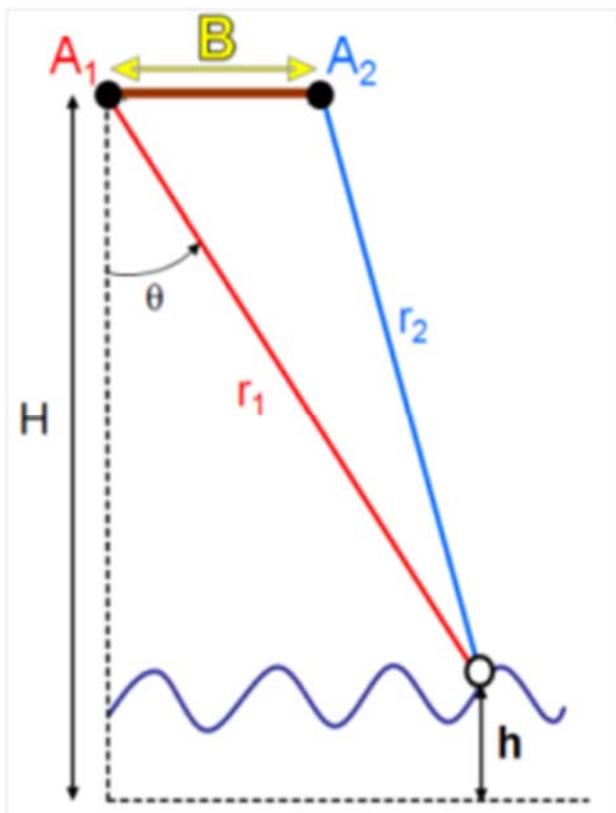
Rastros Swot a 5 días (de los 22 del ciclo completo)

Rastros Swot con zoom en tierras

El satélite tendrá dos antenas a ambos lados del módulo principal. Aunque estas antenas funcionan según el principio de la apertura sintética interferométrica («InSAR»), emiten mucho más cerca del nadir que los otros instrumentos de este tipo, entre 0° y 4° (en comparación con los 30° habituales). Al igual que en los altímetros «en

modo SAR» o «con efecto Doppler», la posición de cada punto de la superficie sobre el que se realiza la reflexión se deduce del efecto Doppler.

La emisión de la onda de radar se efectuará desde una sola de las dos antenas, de forma alterna en dirección a su propio barrido en el suelo y el de la otra antena. La onda es recibida por las dos antenas tras reflejarse en la superficie. Las interferencias entre estas dos ondas permiten medir diferencias de distancia.



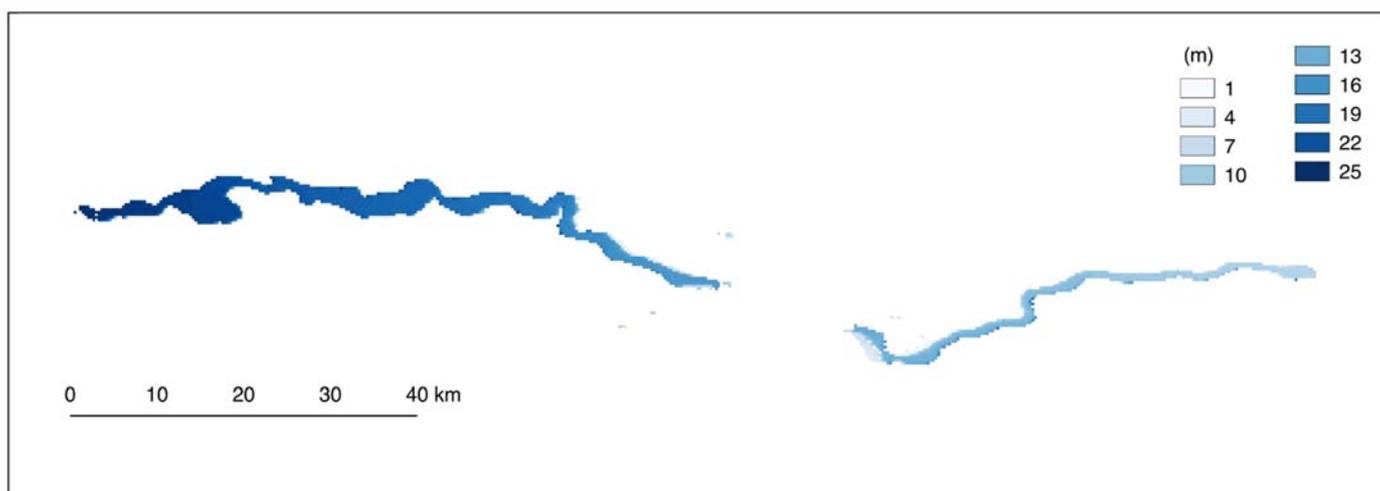
A1 y A2 representan cada uno una antena. B es la distancia entre ambas, invariable y conocida;

r_1 se mide como en la altimetría clásica, mediante el tiempo de ida y vuelta, y H es conocido mediante un sistema de orbitografía.

Por otra parte, el ángulo ϑ se deduce de la medición de la diferencia de fase entre las dos ondas recibidas por cada antena, diferencia que se mide gracias a las interferencias entre dichas ondas. No obstante, por definición, dicha fase tan solo se conoce con un margen de error de 2π . Esta ambigüedad podrá despejarse conociendo la topografía media (MNT).

Una vez conocidas todas estas cantidades, se deduce de todo ello $h = H - r_1 \cos(\vartheta)$

El objetivo anunciado de Swot para 2021 es conseguir una precisión mejor que 10 cm en una superficie de 1 km^2 , para una resolución elemental de 5 m (a lo largo del rastro) x 10-70 m en continente.



Datos Swot simulados en río: Ejemplo de producto de barrido SWOT, Alturas (m) del río Po, Italia (Italia)

Los productos hidrológicos suministrados por Swot

Se han definido cuatro productos principales. El más primario está en formato NetCDF, los otros 3 en formato shapefile, compatible con SIG. Los productos específicos de ríos y lagos están vinculados a bases de datos *a priori*, que se actualizarán en el transcurso de la misión.

Productos de «río»

En una base de datos *a priori* se definen todos los ríos con una anchura de más de 30 m, ya sea en forma de línea fluvial central cortada en secciones de 10 km aproximadamente, o de nodos cada 200 m a lo largo de dicha línea.

En el caso de los ríos identificados en la base de datos *a priori*, por tanto, los productos de «río» se suministran en dos formatos:

- producto por «nodos»: se dan valores estimados en torno a cada nodo como la anchura, la altura o la superficie inundada; estos nodos están separados unos 200 m a lo largo del curso del río;
- producto por «secciones»: se da un dato de altura media, la pendiente media, el caudal medio, etc. en cada una de las secciones fluviales (de unos 10 km aproximadamente).

Estos productos se suministran por paso del satélite.

El producto por «secciones» también se suministra por ciclo, en cuyo caso los valores de las variables se proporcionan en cada uno de los diferentes pasos, tras haber medido la totalidad o una parte de la sección fluvial durante un ciclo entero del satélite (21 días).



Definición de una sección fluvial



Definición de nodos fluviales dentro de una sección

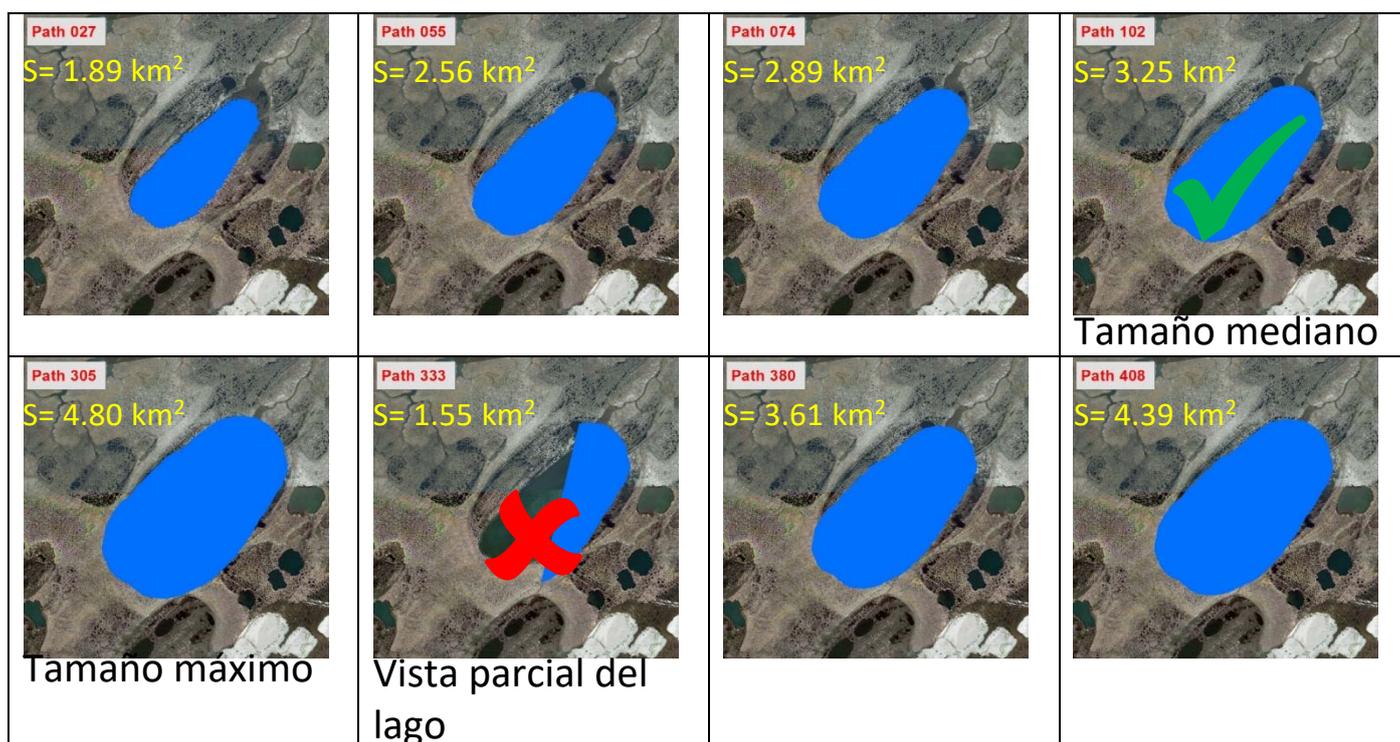
Productos de «lago»

Reciben el tratamiento de «lago» todas las superficies de agua conocidas que no sean ríos y tengan más de una hectárea.

El producto por paso del satélite proporciona datos (altura, superficie, perímetro...) para cada observación de estas superficies de agua.

Para cada objeto que pueda estar vinculado a un elemento de la base de datos de lagos *a priori*, se añade la información de identificación.

El producto por ciclo incluye la mediana del perímetro y la altura media de los lagos en los pasos en que son plenamente visibles (no se tienen en cuenta las observaciones de solo una parte del lago). Se tendrán en cuenta otros casos concretos de mayor complejidad (vistas de diferentes partes del lago en cada paso).

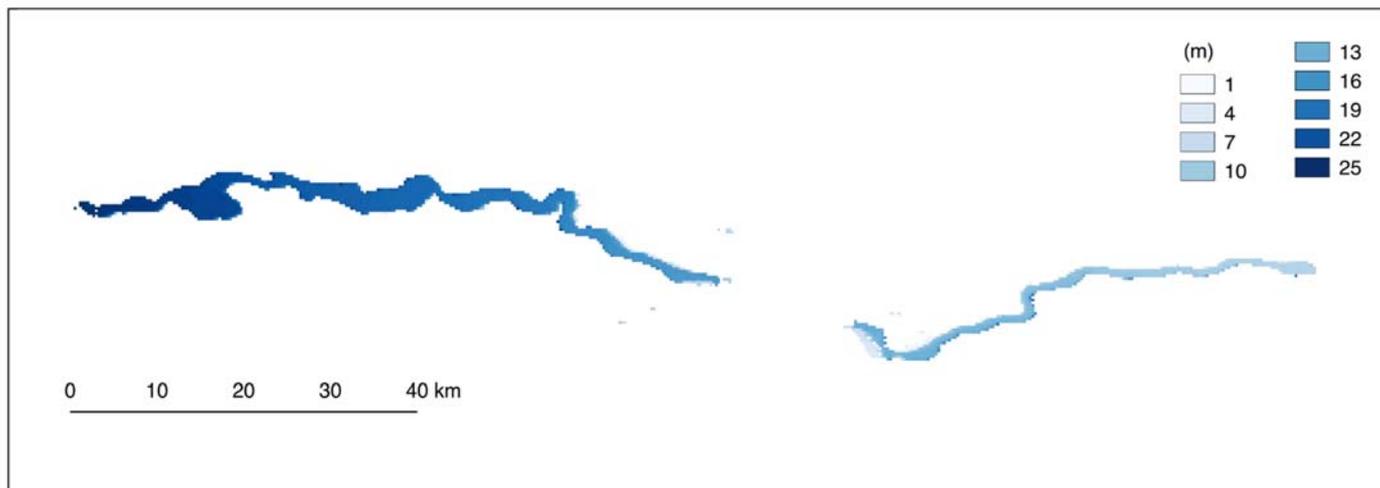


Esquema compuesto multitemporal de tamaño mediano aplicado:

Superficie máx.: 4,80 km², superficie mín.: 1,89 km², superficie desviación estándar: 0,94 km², superficie med.: 3,25 km².

Ilustración de la definición del perímetro de un lago (Imagen cortesía de Y. Sheng)

Producto de «barrido»



Datos Swot simulados en río: Ejemplo de producto de barrido SWOT, Alturas (m) del río Po, Italia (Italia)

A partir del producto de nube de puntos (*pixel cloud*) se generará de forma sistemática un producto de «barrido» (véase el ejemplo del Po incluido más arriba). Estará en formato NetCDF 2D, cubrirá 4 «cuadrantes» de nube de puntos (los 2 barridos y 120 km a lo largo del rastro) y se suministrará en 2 resoluciones: 100 m y 250 m. Los puntos de la *pixel cloud* se proyectan en una matriz regular según una proyección UTM. Se trata de un producto por paso. También podrá generarse previa solicitud (a través del portal de difusión de datos, AC):

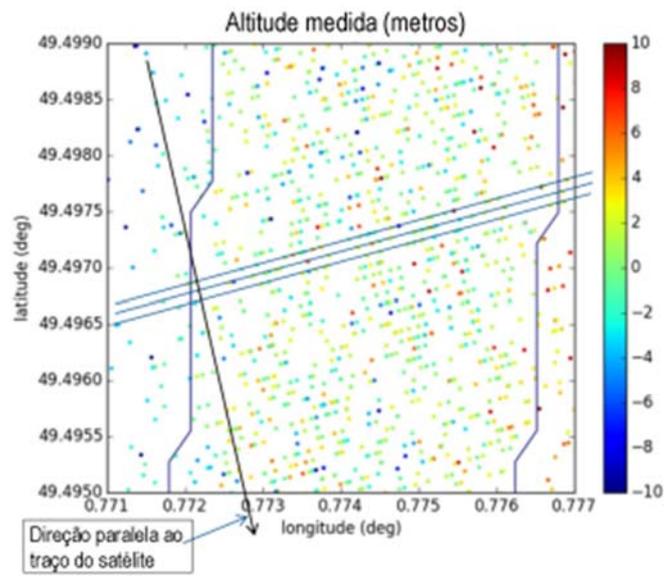
- formato: NetCDF, GeoTiff...
- variables
- resolución (> 100m) y zona definida por el usuario, con sujeción a una limitación del tamaño de los datos descargados.

Producto de «nube de puntos»

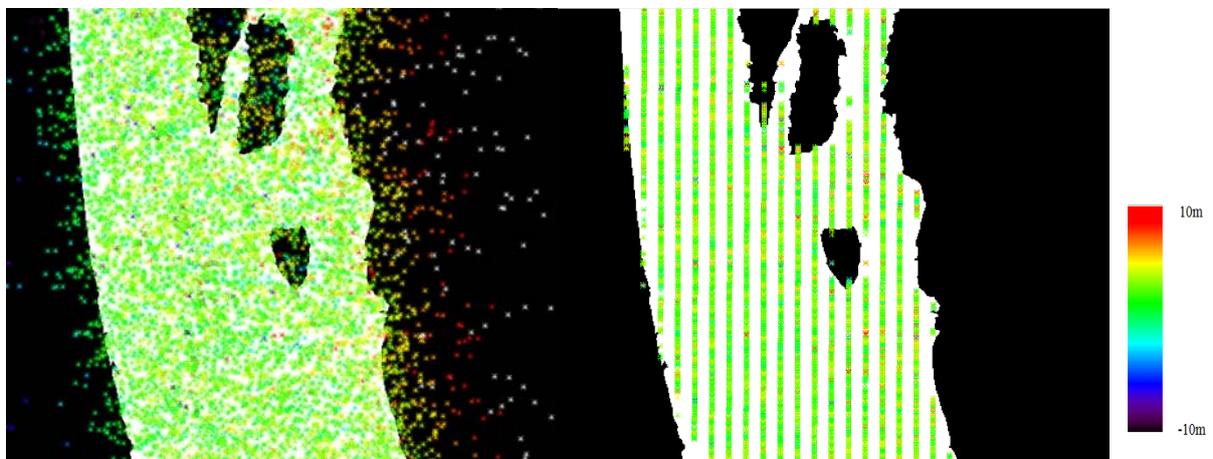
Se trata del producto más básico en las superficies continentales. Un fichero, en formato NetCDF, cubre un «cuadrante», que se corresponde con un lado de barrido (izquierdo o derecho) en 60 km a lo largo del rastro en el suelo del satélite.

El producto proporciona la longitud, latitud, altura, tamaño del píxel y correcciones para cada punto clasificado como agua y para los puntos en una zona tampón en torno a las zonas de agua, así como en zonas incluidas de forma sistemática (definidas según una máscara *a priori*).

Este producto se genera para cada paso del satélite.



producto de nube de puntos en uno de los barridos



(a la izquierda, pixel cloud en bruto, a la derecha, geolocalización mejorada)