

Informe sobre la presencia de *Trichodesmium* spp. en aguas de Canarias, en el verano de 2017

Javier Arístegui^{1,2}, Antonio J. González-Ramos^{1,3}, Mar Benavides⁴

¹*Servicio Integral de Tecnología Marina (SITMA), ULPGC*

²*Instituto de Oceanografía y Cambio Global (IOCAG), ULPGC*

³*División de Robótica y Oceanografía Computacional (SIANI), ULPGC*

⁴*Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Mediterranean Inst. of Oceanography (MIO), France*



Las Palmas de Gran Canaria, a 2 de Septiembre de 2017

Resumen ejecutivo

1. *Trichodesmium* spp. **no es una cianobacteria invasora**. Vive en aguas de Canarias durante todo el año, como filamentos (“tricomas”) aislados, con abundancias bajas en aguas turbulentas, o formando colonias con abundancias más elevadas, en zonas protegidas del sur de las Islas, más cálidas y encalmadas.
2. Los **aumentos anómalos de temperatura, disminución de viento** (incrementando la estratificación del agua) y **aportes de polvo sahariano**, favorecen que *Trichodesmium* se agregue en superficie, eleve sus tasas de fotosíntesis y fijación de N₂, y aumente su tasa de reproducción formando acumulaciones masivas (**blooms**) de **millones de tricomas por litro**, que suelen conducir en pocos días a un proceso de “**muerte celular programada**” (PCD) por estrés lumínico y oxidativo, liberando grandes cantidades de productos al medio (entre ellos, materia orgánica disuelta, pigmentos, amonio y otros metabolitos).
3. El episodio del **bloom del verano del 2017 se ha producido por las mismas causas naturales que los episodios de bloom anteriores en 2004 y 2011**, debido a las altas temperaturas del agua de mar, disminución del viento y deposición de aerosoles (calima). La **diferencia** de este año con los anteriores reside en que estas **condiciones han perdurado**, de forma más o menos continuada, al menos durante 3 meses (junio, julio y agosto), manteniendo el desarrollo de los *blooms*.
4. Los *blooms* **comenzaron a observarse por las islas occidentales**, debido a que la temperatura del agua se elevó por encima de los 23°C, antes que en las islas orientales. A partir de finales de julio, el ascenso de temperaturas en las islas orientales provocó que el *bloom* se extendiera también a las costas de Gran Canaria; sobre todo en agosto, cuando la temperatura del agua en todo el archipiélago era superior a 23°C.
5. Las imágenes aéreas tomadas desde el helicóptero del “GES” y de satélite indican que los *blooms* **se formaron en aguas abiertas**, se acumularon en zonas de convergencia (manchas o líneas horizontales) y **fueron arrastrados hacia las costas**, siguiendo los patrones conocidos por modelos de alta resolución de circulación costera a pequeña escala (como filamentos y remolinos).
6. **No hay ninguna evidencia de que el agua procedente de vertidos residuales en la costa haya podido reactivar o producir estos blooms** costeros de *Trichodesmium*. El desarrollo de los *blooms* ha seguido un patrón coherente en todas las islas, por las causas naturales antes indicadas, independientemente de que **estuvieran o no** potencialmente **afectados por áreas con vertidos**; es decir, se observaron tanto alrededor de islas con muchos vertidos (Tenerife), como en islas o

zonas costeras sin vertidos (sur de El Hierro y La Gomera). De hecho, una vez arrastradas las manchas a la costa, quedaban a menudo retenidas en playas, bahías y muelles, adquiriendo el agua un aspecto lechoso y de olor desagradable de color verde o púrpura, lo que indica que el *bloom* estaba en fase terminal (PCD), **sin capacidad de reactivarse por ningún aporte de nutrientes**, vertiendo al medio gran cantidad de materia orgánica, amonio y otros metabolitos.

7. **El trabajo de los investigadores israelíes Rahav & Bar-Zeev**, publicado recientemente en la revista “*Scientific Reports*”, y que se ha utilizado como argumento para justificar la relación entre la formación del *bloom* de *Trichodesmium* y las aguas residuales alrededor de las Islas, **no es extrapolable a las aguas de Canarias**, por diversas razones que se detallan en el informe; a destacar, las importantes diferencias medioambientales entre las aguas costeras de Canarias e Israel. Por otro lado, este trabajo **no demuestra** que los vertidos urbanos **puedan generar blooms masivos** de *Trichodesmium* como los encontrados en Canarias, **ni que las tasas de fijación de N₂ aumentan significativamente** como para generar estos *blooms*.
8. En cualquier caso, recomendamos **llevar a cabo experimentos con muestras naturales** (no solo de la cianobacteria *Trichodesmium*, sino también incluyendo a bacterias y a otros organismos del fitoplancton marino que potencialmente pueden formar *blooms* tóxicos). Es necesario conocer el **efecto que los vertidos pueden tener sobre las poblaciones planctónicas**, y cómo estas pueden afectar a las aguas del Archipiélago Canario y a las actividades socioeconómicas que se desarrollan en ellas (**turismo, recreación, pesca y acuicultura**).
9. Durante la fase terminal de los *blooms*, *Trichodesmium* vierte al medio enormes **cantidades de amonio, pigmentos y materia orgánica**, junto con otros metabolitos secundarios como **toxinas**. Apenas hay una decena de estudios que hayan tratado los efectos de la toxicidad de *Trichodesmium*, y **no conocemos casos registrados de toxicidad directa sobre personas** (más allá de procesos de dermatitis, irritación de mucosas o estrés respiratorio). Las actuaciones en países con una cultura ambiental y sanitaria avanzada, como Australia, **recomiendan simplemente no bañarse cerca de manchas de *Trichodesmium***, e informan del carácter **nocivo pero no tóxico** en humanos de la cianobacteria.
10. La liberación al medio de carbono y nitrógeno en exceso puede, sin embargo, provocar el **crecimiento de especies tóxicas de otros tipos de fitoplancton (“mareas rojas” de dinoflagelados)**, como se viene reportando desde hace más de dos décadas en el Golfo de México. Recomendamos, por lo tanto, **estudiar la conexión entre estos procesos**, que puede llevar al desarrollo de “mareas rojas” tras el colapso y hundimiento de los *blooms* de *Trichodesmium*.

Introducción: La fascinante vida de *Trichodesmium*

La **cianobacteria** colonial *Trichodesmium* spp. está considerada como uno de los principales organismos marinos fijadores de nitrógeno a nivel global, contribuyendo con casi la mitad del nitrógeno de origen nuevo fijado en los océanos (cerca de 100 toneladas de nitrógeno por año). **Su rol en los ciclos biogeoquímicos marinos, y por lo tanto en la regulación del clima y en el secuestro de carbono de origen antropogénico, es fundamental** (Carpenter *et al.*, 1992; Bergman *et al.*, 2012).

Trichodesmium es un organismo **diazotrófico**; tiene la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico (N_2), a diferencia de la mayoría de los organismos del fitoplancton marino, que dependen de otras formas de nitrógeno, como amonio o nitratos, para su crecimiento. Esto le permite **proliferar en la mayor parte de los océanos tropicales y subtropicales**, donde la casi ausencia en superficie de nitratos o amonio, debido a la estratificación de las aguas (que reduce de forma drástica el aporte de nitratos desde las aguas profundas), limita el crecimiento del resto de organismos fotosintéticos.

Diversos trabajos de laboratorio y de campo han demostrado que el **fósforo y el hierro** pueden limitar el crecimiento y la fijación de N_2 en *Trichodesmium*, aunque **la limitación de estos compuestos varía entre regiones y poblaciones de cianobacterias** (e.g. Sañudo-Wilhelmy *et al.*, 2001; Mills *et al.*, 2004; Sohm *et al.*, 2008; Moore *et al.*, 2009; Chappell *et al.*, 2010). Por otro lado, se ha visto recientemente que *Trichodesmium* puede adquirir un comportamiento **mixotrófico** (alimentándose de compuestos orgánicos), aunque **apenas afecta las tasas de fijación de N_2** (Benavides *et al.*, 2017). El hierro es un cofactor esencial, no solo para el proceso fotosintético, sino también para la fijación de N_2 ; ya que el complejo enzimático “**nitrogenasa**”, encargado de catalizar este proceso, requiere de grandes concentraciones de hierro. La nitrogenasa es sensible al oxígeno. Con el fin de proteger las enzimas del oxígeno, *Trichodesmium* realiza la asimilación de N_2 al mediodía, desacoplada de la fotosíntesis, cuando el consumo de oxígeno por la respiración es más elevado y, por lo tanto, el efecto inhibitor del oxígeno sobre la nitrogenasa se reduce.

Las células de *Trichodesmium* se agrupan en filamentos (**tricomas**), que pueden alcanzar más de 100 células/tricoma. Los tricomas, a su vez, pueden agregarse en forma de densas **colonias** (constituidas por decenas de tricomas) que pueden presentar diferentes formas. La turbulencia del agua impide la agregación de tricomas en colonias, mientras que la estratificación acusada del agua puede llevar a la formación de enormes acumulaciones superficiales, de hasta millones de tricomas L^{-1} , denominadas “**blooms**”.

La biología de esta cianobacteria es fascinante. El genoma de *Trichodesmium* spp., a diferencia de otros grupos de cianobacterias unicelulares no diazotróficas (como

Prochlorococcus o *Synechococcus*), es muy “flexible” y está en continua “expansión”, lo que explicaría **adaptaciones a distintas condiciones ambientales**; como la capacidad de asimilación de distintos compuestos de hierro o fósforo en poblaciones de diferentes regiones oceánicas de los Océanos Pacífico, Atlántico o Índico (Bergman *et al.*, 2012; Walworth *et al.*, 2015).

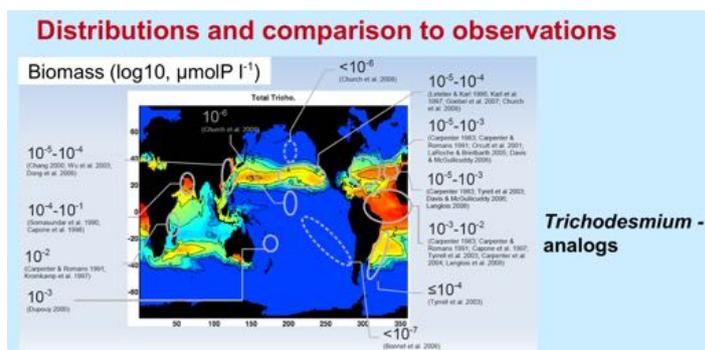
Aunque los tricomas individuales tienen capacidad de fijar N₂, la **disposición en colonias les confiere ventajas adaptativas** significativas. Las colonias representan pequeños ecosistemas donde conviven virus, bacterias, otros microorganismos eucariotas, protozoos y copépodos. **Esta comunidad epibionte es la que le confiere tanta plasticidad metabólica a *Trichodesmium*** (Frischkorn *et al.*, 2017). Por ejemplo, la flora bacteriana asociada es capaz de producir **sideróforos**, pequeñas moléculas peptídicas, quelantes de hierro, que solubilizan el ion hierro Fe³⁺ (con muy poca solubilidad) a complejos de Fe²⁺, que son transportados posteriormente por *Trichodesmium* al interior de sus células (Achilles *et al.*, 2003). Las colonias pueden además capturar granos de polvo con altas concentraciones de hierro, procedente de la deposición atmosférica de polvo del desierto (Rubin *et al.*, 2011), proceso que no parece viable para los tricomas aislados (Benavides *et al.*, 2013).

La disposición en colonias también facilita las **migraciones verticales diarias** en la columna de agua, esenciales para el desarrollo de esta cianobacteria (White *et al.*, 2006). En aguas oligotróficas, donde el fósforo y otros micronutrientes necesarios para su crecimiento sólo se encuentran disponibles por debajo de la termoclina (a menudo a más de 100 m de profundidad), las colonias se hunden regulando su flotabilidad mediante las vacuolas de gas que poseen en su interior. En las aguas superficiales cálidas e iluminadas las colonias realizan la fotosíntesis para obtener la energía necesaria para llevar a cabo la fijación de N₂; un proceso energéticamente muy costoso. El carbono y nitrógeno fijado se almacena como gránulos de glucógeno y cianoficina, lo que le permite a la colonia ganar lastre y hundirse en profundidad en busca de **fosfatos** (Bergman *et al.*, 2012). Una vez metabolizado el “lastre” en las aguas profundas, frías y oscuras, ganan flotabilidad de nuevo y retornan a las capas superficiales iluminadas para volver a realizar la fotosíntesis y fijar N₂. No todas las colonias, sin embargo, realizan migraciones diarias. Pueden almacenar fósforo en estructuras subcelulares (gránulos de polifosfato), lo que les permite distribuir en el tiempo este exceso de fósforo. *Trichodesmium* puede también obtenerlo hidrolizando compuestos de **fósforo orgánico** disuelto (fosfoesteres o fosfonatos), por medio de enzimas específicas (fosfatasa alcalina y fosfonato deshidrogenasa). Esto le confiere una ventaja adaptativa en zonas donde hay limitación de fósforo inorgánico o el coste energético de su adquisición es elevado.

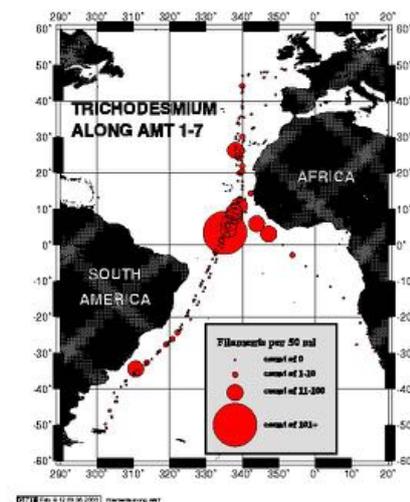
Trichodesmium tiene su **óptimo de crecimiento a temperaturas entre 23 y 30°C** (dependiendo de las especies y condiciones ambientales), pudiendo formar *blooms*

superficiales muy extensos (e.g. Dupuoy *et al.*, 2011; Mantas *et al.*, 2011). Sin embargo, también se ha observado esporádicamente en aguas más frías de afloramientos costeros (Benavides *et al.*, 2011) o incluso en el Ártico (Díez *et al.*, 2012), pero en densidades muy bajas y con tasas de fijación de N₂ muy pequeñas; ello hace pensar que estas colonias o tricomas han podido ser transportados por advección desde otras regiones donde las condiciones para su desarrollo son más favorables.

La razón evolutiva y las ventajas adaptativas de por qué *Trichodesmium* forma extensos *blooms* superficiales no están claras. **La formación de *blooms* superficiales está relacionada con elevadas temperaturas, disminución de la turbulencia del agua, una fuerte estratificación de la columna de agua y, generalmente, con la deposición de aerosoles** (e.g. Orcutt *et al.*, 2001; Sabeur *et al.*, 2016). Hay registros de *blooms* de *Trichodesmium* en los tres grandes océanos, pero **los más extensos se dan en aguas tropicales y subtropicales del Océano Atlántico y en Pacífico Sur Occidental (Figura 1), coincidiendo con plumas de aerosoles atmosféricos**, que depositan, entre otros compuestos, abundantes cantidades de polvo mineral que contiene compuestos de hierro y fósforo (inorgánico y orgánico).



Comparación del modelo de distribución de *Trichodesmium*, con observaciones de campo. Observar que el Atlántico subtropical y tropical presenta las biomásas más elevadas (Follows *et al.*, 2007)



Abundancias de filamentos/50 ml de *Trichodesmium* a través del Atlántico Norte, obtenido de 7 campañas cruzando el Océano Atlántico (Atlantic Meridional Transects; AMT). Datos del NOC (UK)

Figura 1

Durante la **formación de un bloom**, la intensa irradiación superficial sobre células repletas de nutrientes, provoca en un principio el crecimiento exuberante de las poblaciones de *Trichodesmium*, que se acumulan en superficie por el aumento de la estratificación del agua; a menudo, formando largas extensiones en forma de hilera (“slicks”), o en los márgenes de filamentos y remolinos, donde converge el agua. Al cabo de unos días, el fuerte **estrés lumínico y oxidativo** (sumado a menudo al **estrés por agotamiento de nutrientes**) lleva a las células a incrementar la fabricación de

“**caspasas**” (proteínas del grupo cisteín-proteasas), que juegan un papel fundamental en la inducción de la apoptosis, lo que se denomina coloquialmente “**Muerte Celular Programada**” (PCD: “*Programmed Cell Death*”), que lleva al colapso de un *bloom* en pocos días (Berman-Frank *et al.*, 2004, Spungin *et al.*, 2016). En esta situación, la expresión de muchos genes asociados con la flotabilidad y la producción de vesículas de gas se reduce, las células incrementan su vacuolización, el ADN se desnaturaliza, los tricomas se fragmentan y las células empiezan a exudar grandes cantidades de **partículas exopoliméricas** transparentes (lo que confiere un **aspecto lechoso** al agua), **amonio** (lo que le da el **olor fuerte** al agua), y a verter sus **pigmentos** (como ficoeritrina) al medio (de aquí el **color verde y rosa de los blooms en fase terminal**), antes de colapsar y **hundirse de forma masiva**, contribuyendo en gran medida al secuestro de carbono y nitrógeno en mares tropicales y subtropicales (Capone *et al.*, 2005; Sandel *et al.*, 2015). Aunque el mantenimiento de la PCD puede parecer que ejerce una presión negativa en la selección natural, algunos autores piensan que debe conferir alguna **ventaja selectiva** para la supervivencia de la especie (Berman-Frank *et al.*, 2004).

La flexibilidad y plasticidad del genoma de *Trichodesmium* spp., así como su excelente adaptación a aguas cálidas, con altas intensidades de luz y bajas concentraciones de nitratos, hace de esta cianobacteria un competidor excelente en escenarios futuros de un océano global más cálido y oligotrófico (Bergman *et al.*, 2012).

Trichodesmium en Canarias: eventos históricos de blooms

Trichodesmium spp. vive en aguas de Canarias, al igual que en otras zonas subtropicales del Atlántico Norte, durante **todo el año**. En **regiones expuestas**, abatidas por el viento, se encuentra, principalmente, como **tricomas sueltos**, en pequeña abundancia (< 1 tricoma L^{-1}) y con tasas de fijación de N_2 bajas o muy bajas ($< 0.1-0.5$ $nmol\ N\ L^{-1}\ d^{-1}$) (Benavides *et al.*, 2011; 2013a; 2013b; 2016). En **regiones protegidas del viento**, como en las estelas de agua cálida y encalmada al sur de Tenerife, Gran Canaria o La Gomera, no hay registros de *Trichodesmium* en muestreos dirigidos, pero sí pruebas indirectas, que demuestran que vive formando **colonias** que pueden migrar al menos hasta 150 m de profundidad en busca de fosfatos, como se ha visto en otras regiones del Océano Atlántico occidental (Orcutt *et al.*, 2001; Olson *et al.*, 2015). La **Figura 2** muestra un denso recubrimiento de colonias de *Trichodesmium* alrededor de una trampa de sedimento fondeada en 2005 a 150 m de profundidad en el sur de Gran Canaria, recuperada al cabo de 6 meses. Por otro lado, es frecuente encontrar (al menos durante los meses de primavera, verano y otoño) colonias de *Trichodesmium* en la superficie del mar al sur de Gran de Canaria, en las zonas de convergencia del frente donde cizalla el viento con la isla.

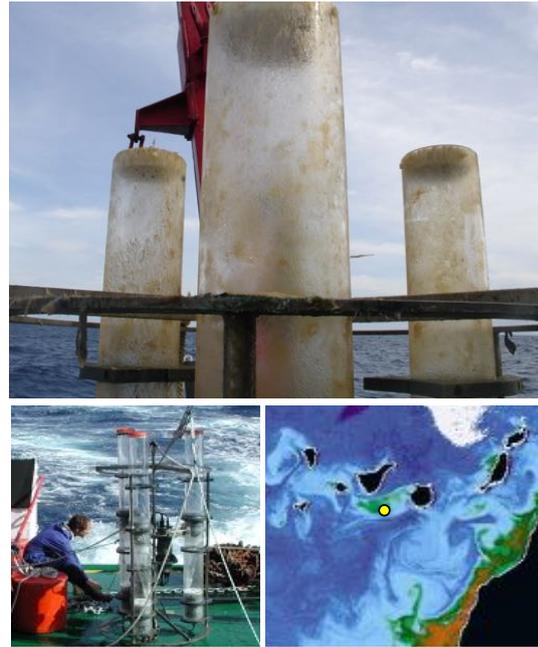


Figura 2

Recuperación de una "trampa de sedimento" fondeada a 150 m de profundidad al suroeste de Gran Canaria durante 6 meses (verano-otoño, 2005), completamente recubierta de colonias de *Trichodesmium*. Comparar con la trampa antes del fondeo (Fotos: J. Aristegui)

Al suroeste del archipiélago canario (**al sur del 25°N**), donde la temperatura superficial del agua es más elevada, y coincidiendo con la disminución en la intensidad de los vientos alisios y el aumento en la estratificación de las aguas, se producen frecuentemente **extensas proliferaciones superficiales de *Trichodesmium***, descritas en campañas oceanográficas llevadas a cabo por investigadores canarios desde el año 1989 (Hernández-León *et al.*, 1999), y que en ocasiones han alcanzado valores de al menos 30.000 tricomas L⁻¹ (Benavides *et al.*, 2016).

En Canarias tenemos conocimiento de **dos intensos episodios de blooms (agosto de 2004 y octubre de 2011)**, anteriores al de este año, coincidiendo en ambos casos con una **subida considerable de la temperatura del agua (>23°C)**, una **disminución drástica de la velocidad del viento**, una **estratificación acusada e intensas deposiciones de polvo mineral sahariano** -que se sabe que aportan grandes cantidades de **hierro** (Bonnet & Guieu, 2006; Theodosi *et al.*, 2010; Gelado-Caballero *et al.*, 2012) y **fósforo** (Ridame & Guieu, 2002; Pulido-Villena *et al.*, 2010; Chien *et al.*, 2016) a la superficie del océano, necesarios para el desarrollo masivo de estas cianobacterias. Tanto en el año 2004 como en 2011, el *bloom* afectó sobre todo a las costas de las **islas más orientales**, coincidiendo con el transporte este-oeste de aerosoles, aunque también hubo incidencias en las islas occidentales (Ramos *et al.*, 2005). Ambos *blooms* **desaparecieron a los pocos días**, una vez que aumentó la intensidad del viento, desapareció la calima, y la agitación del agua descendió la

temperatura superficial del océano, rompiendo con ello la fuerte estratificación de la columna de agua.

Blooms masivos de *Trichodesmium*, similares a los encontrados en Canarias se han descrito para aguas costeras del **norte de Túnez**, en el Mediterráneo (con concentraciones de hasta 720 millones de tricomas L⁻¹), asociados a temperaturas >24°C, intensidades de viento <5 m/sg, y deposición intensa de aerosoles procedentes del norte de África (Sabeur *et al.*, 2016); **condiciones muy similares a las registradas en los blooms de 2004, 2011 y 2017 en Canarias.**

La **deposición de aerosoles**, por sí sola, **no siempre favorece el crecimiento de *Trichodesmium*** y el desarrollo de *blooms*. En una serie temporal llevada a cabo en la estación ESTOC (al norte de Gran Canaria), Benavides *et al.* (2013) observaron que, tras un episodio intenso de deposiciones de aerosoles, las bacterias **unicelulares diazotróficas**, y no *Trichodesmium*, obtenían beneficio de los nutrientes asociados al polvo sedimentado, ya que *Trichodesmium* no podía agregarse en colonias por la **turbulencia del agua**, para obtener de forma eficiente el hierro (Rubin *et al.*, 2011).

Cronología y causas del desarrollo del *bloom* de 2017

Cronología de la aparición y extensión del *bloom* en aguas costeras

El **11 de junio** se recibe en la *Viceconsejería de Medio Ambiente*, a través de la RedPROMAR, las primeras llamadas y fotos de la presencia de manchas o espumas muy dispersas de color amarillento o parduzco en **El Hierro y Tenerife**. Las muestras, recolectadas por el personal de la reserva marina de El Hierro, fueron analizadas e identificadas como *Trichodesmium erythraeum** el 23 de junio. Era el **inicio del evento** a sotavento de estas dos islas, que se ha mantenido de forma permanente, con diverso grado de afección a la costa, desde entonces hasta la actualidad (**Figura 3**). En los dos casos se observaron diversas intensificaciones del evento, con una reactivación más acusada a partir del **23 de agosto**, que se mantiene hasta la actualidad (1 de septiembre). Una semana más tarde (**19 de junio**) se recibe notificación en el 112 del aeropuerto del sur de Tenerife, indicándonos que hay manchas en el mar en la costa del aeropuerto (eran filamentos de tamaño considerable, pues fueron observadas desde los aviones al despegar y aterrizar), desde unos 300 m hasta al menos 11,5 millas náuticas mar adentro. A lo largo del mes de junio se suceden las observaciones continuas de largos filamentos por toda la costa SW de Tenerife, siendo a partir del **14 de julio** cuando se empieza a ver, mar adentro, algunas manchas en la costa norte de la isla (Playa de

*La especie fue identificada como *Trichodesmium erythraeum*, por sus características morfológicas; pero debido a las dificultades de identificar las especies de este género sin llevar a cabo pruebas moleculares, la denominaremos simplemente *Trichodesmium* hasta tener los análisis de ADN.

Almáciga) y filamentos en la costa de Radazul (E de Tenerife). En el SW de Tenerife, grandes extensiones decoloradas afectan al litoral de Los Gigantes (entre Los Gigantes y Teno el efecto de las corrientes introduce en la costa los filamentos, los concentra y acumula).

Esta situación en el entorno de Los Gigantes dura hasta el 3 de agosto. Un fuerte mar de fondo los días siguientes produce grandes espumas que cubren la playa de Los Cristianos por la mañana del 9 de agosto. A partir del **15 de agosto** empieza a afectar de forma generalizada a todo el litoral norte de la isla. **El 20 de agosto** sucede una nueva llegada masiva a la costa de Los Gigantes y comienzan a verse largos filamentos, especialmente entre Santa Cruz y Güímar, que afectarán de forma importante la costa de Radazul a partir del **26 de agosto**, siendo limpiada con el inicio del viento dos días mas tarde.

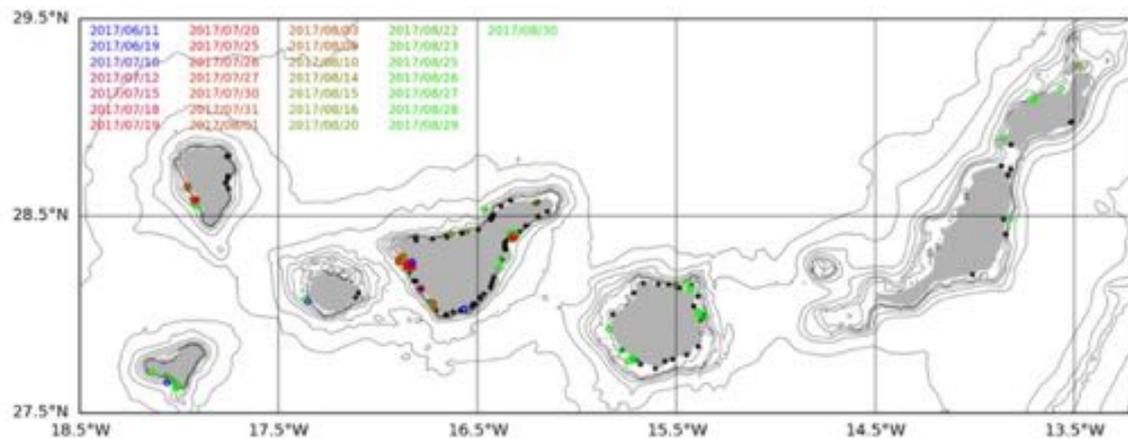


Figura 3 Distribución cronológica de las observaciones de manchas costeras de *Trichodesmium* en Canarias, en el verano de 2017

A partir del **10-19 de julio** se suceden los avistamientos de manchas o filamentos en el SW de **La Gomera, La Palma y Gran Canaria**, que se han extendido hasta la actualidad (1 de septiembre).

A partir del 26 de agosto se inician las observaciones (incluso desde la costa) de grandes filamentos de gran extensión en el norte de Gran Canaria con el mar en calma. Los días siguientes se divisan en el entorno de La Isleta (28-29 de agosto), litoral de Las Palmas de GC y Telde, hasta la actualidad. El inicio del fuerte viento el 31 de agosto, dispersa las manchas en el este de la isla, sólo quedando algunas manchas acantonadas en costa en el interior de la Playa de Las Canteras.

Tras un aviso de observaciones, entre el **28 y 29 de agosto**, en el entorno de Puerto Calero (**Lanzarote**), se sobrevuela Lanzarote y Fuerteventura. Hasta este momento no se tenía constancia de su presencia en las islas occidentales. Los resultados de estos vuelos muestran escasa presencia en el litoral de Lanzarote, con manchas pequeñas en el norte, sur y oeste de Lanzarote y ninguna en Fuerteventura (sólo hay una notificación de una pequeña mancha en Puerto del Rosario el día 29 de agosto).

Causas de la formación y desarrollo del *bloom* en las Islas

Las causas de la formación del *bloom* de *Trichodesmium* en Canarias fueron las **temperaturas anormalmente elevadas entre junio y agosto, la reducción considerable de la intensidad del viento, con la casi desaparición del alisio, unido a diferentes episodios de intrusiones de aerosoles.**

Los partes meteorológicos de la AEMT dejan constancia de estas anomalías:

JUNIO 2017: Temperaturas del aire superiores a los valores normales, varios episodios cálidos de **temperaturas anormalmente altas** de muy corta duración y un episodio cálido considerado “**ola de calor**” entre los días **22 y 26**. En aguas costeras, las temperaturas medias del agua superficial del mar, registradas por las boyas de Gran Canaria y Tenerife Sur, fueron **las más altas —en junio— en los últimos diez años**. No hubo intrusión de calima, algo infrecuente en este mes.

JULIO 2017: Temperaturas medias del aire ligeramente superiores a los valores normales, dos episodios cálidos de **temperaturas anormalmente altas**, el del 27 – 28 de julio. (Las temperaturas alcanzadas el 28 hacen de él el día más cálido en lo que se llevaba de año y también el más tórrido en un mes de julio desde el 30 de julio de 2009). Las temperaturas superficiales del agua del mar registradas el día 28 en la boya de Gran Canaria y en la boya de Tenerife **Sur son los más altos en un mes de julio desde 1998**. La temperatura media del mar [22,3° en el litoral norte y 22,7° en las costas meridionales] fue también **la más alta de los últimos quince años** en un mes de julio. La **velocidad media del viento ha sido inferior a la media** en las zonas a más de 1000 m de altitud y un 20 – 25% inferior a lo normal en las costas del SE de Tenerife y de Gran Canaria. Se registran 3 intrusiones de calima.

AGOSTO 2017: Sin disponer de los datos, todo apunta a **temperaturas medias del aire superiores a los valores normales, varios episodios de temperaturas anormalmente altas**, alguno se podría considerar ola de calor, temperaturas superficiales del agua del mar superiores a las normales, menos viento del normal y

varias irrupciones de calima.

En las últimas décadas, **la temperatura superficial del agua en Canarias ha ido aumentando progresivamente, y lo seguirá haciendo en el futuro** debido al Calentamiento Global. Arístegui *et al.* (2009) describen un aumento de 1°C entre 1998 y 2007 (Figura 4), por lo que la temperatura en la actualidad ha debido ascender al menos otro grado más. La evidencia de este aumento de temperatura se ha visto reflejada en la invasión, y acantonamiento en las Islas, de una gran variedad de especies marinas en los últimos años procedentes de regiones más cálidas y tropicales.

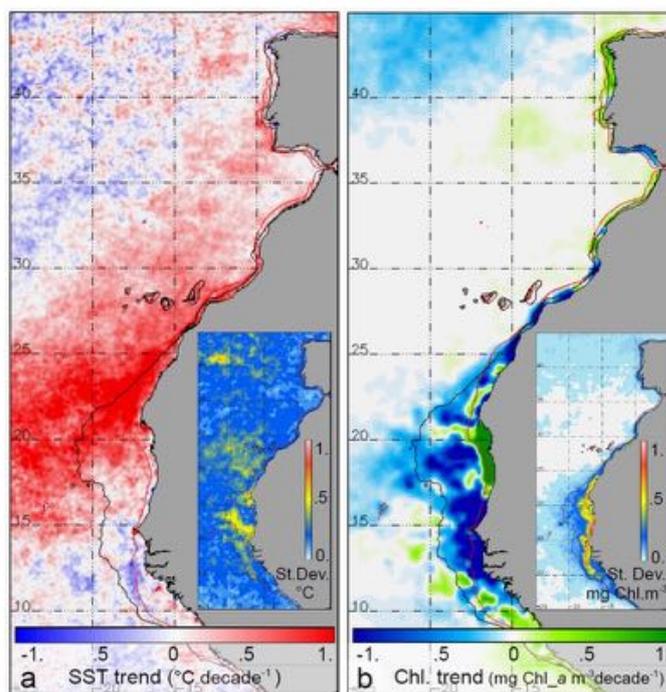


Figura 4 Tendencias decadales en (a) temperatura superficial y (b) clorofila superficial, obtenidas a partir de datos de AVHRR y SeaWiFS para el periodo 1998-2007 (Arístegui *et al.*, 2009)

El verano de 2017 ha sido también especialmente **anómalo por la ascensión de la Zona de Convergencia Atlántica Intertropical (ITCZ)**, la región donde convergen los vientos Alisios del norte y del sur del Atlántico, y que ha podido afectar al debilitamiento del Alisio en las Islas durante el verano, así como a un aumento de aerosoles finos procedente del desierto de Mauritania. Las razones probablemente se deban a cambios climáticos con variabilidad decadal-interdecadal, pero no es lugar aquí para discutirlo.

La **Figura 5** compara la distribución de la carga de aerosoles entre los meses de junio-agosto de 2016 y 2017. Se observa (i) que el **frente sur de la distribución de aerosoles** (límite entre la banda azul claro y el fondo blanco, que marca el límite norte de la ITCZ)

está más desplazado hacia el norte en 2017 que en 2016, y (ii) que, aunque la carga de polvo es más intensa en 2016 (colores más oscuros), en 2017 afectó de forma más extensa al Archipiélago, produciendo intrusiones finas pero constantes de aerosoles, a menudo procedentes desde la región de Mauritania, siguiendo un giro horario y afectando primero a las islas más occidentales (Figura 6, panel derecho superior). Esto se puede observar claramente en los vídeos (no incluidos en este informe) de la evolución temporal de la calima durante los diferentes días del verano.

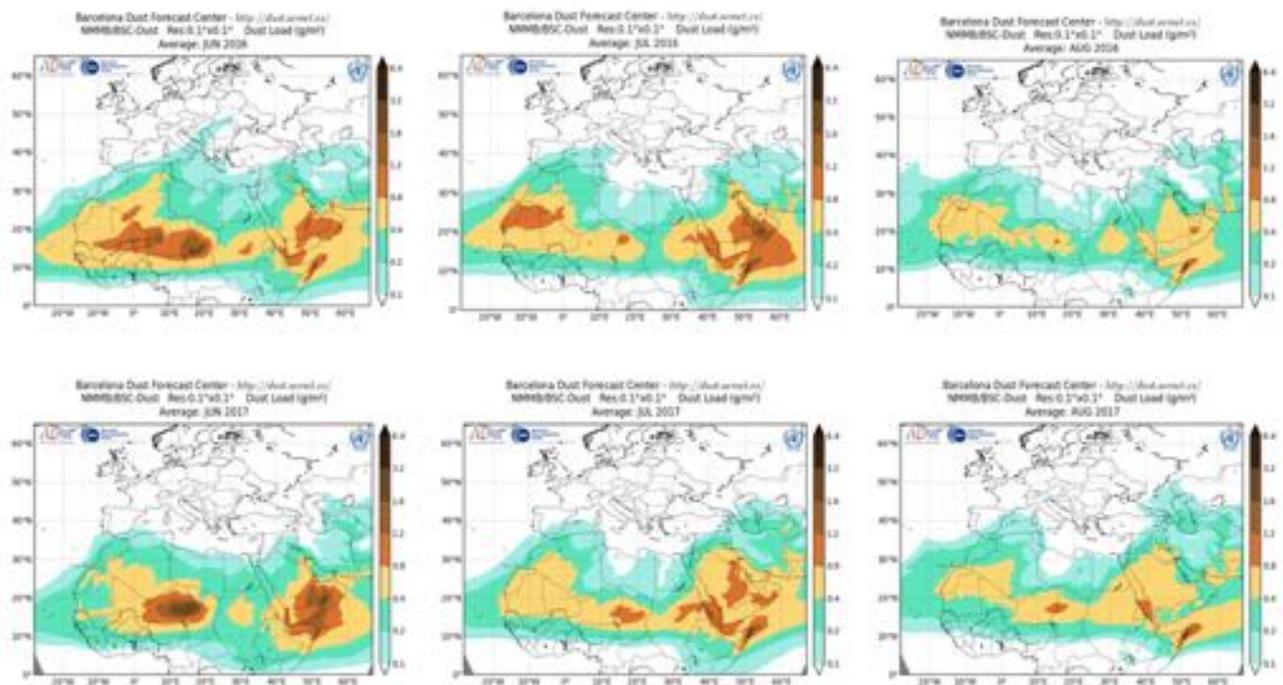


Figura 5

Carga de polvo (calima) en g/m^2 en la Cuenca Noroccidental Africana (Junio-Julio-Agosto de 2016 y 2017) obtenidas del Sistema de Predicción de aerosoles del sistema Aeronet (Centro de Supercomputación de Barcelona-AEMET). <https://dust.aemet.es/>.

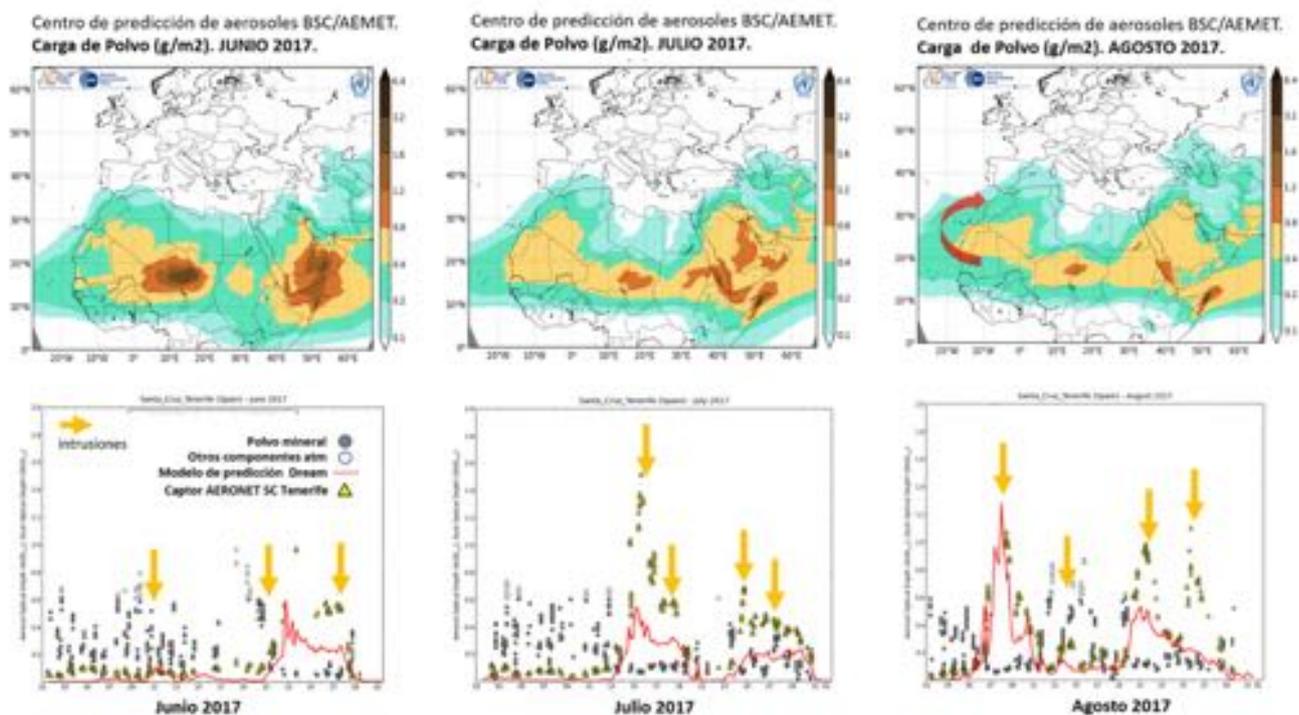


Figura 6

Panel superior: Carga de polvo (calima) en g/m^2 en la Cuenca Noroccidental Africana (Junio-Julio-Agosto de 2017) (ver Figura 5)

Panel inferior: Intrusiones de polvo para los mismos meses, obtenidas del Sistema de Predicción de aerosoles y de los registros de la estación Aeronet in situ ubicada en S/C de Tenerife (BSC/AEMET). <https://dust.aemet.es/>. Las flechas amarillas marcan las intrusiones más significativas

Comparando también los años 2016 y 2017, se puede observar que **en 2017 la temperatura fue más alta (Figura 7), la intensidad de viento fue más reducida (sobre todo en las islas más occidentales) y la profundidad de la capa de mezcla (un índice del calentamiento y estratificación del agua, necesario para la acumulación de los blooms de *Trichodesmium*) fue menor (Figura 8).**-

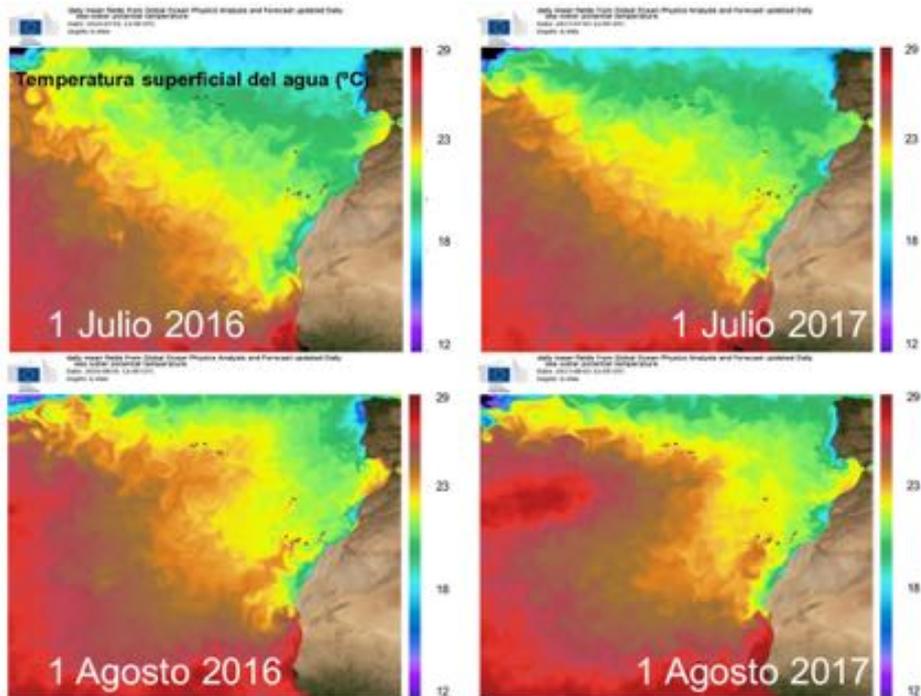


Figura 7

Comparación de la temperatura superficial del agua entre Julio y Agosto de 2016 y 2017. Se puede observar el aumento de temperatura en 2017 en la región de Canarias, afectando sobre todo a las islas más occidentales. Datos obtenidos del "Operational Mercator global ocean analysis and forecast system at 1/12 degree" (Copernicus)

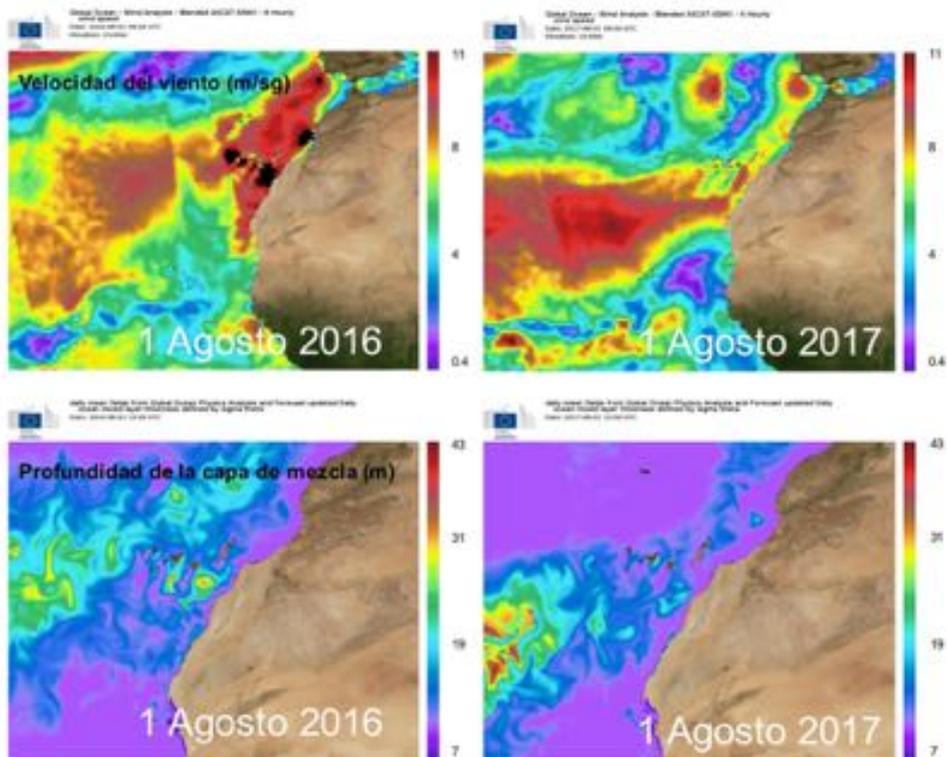
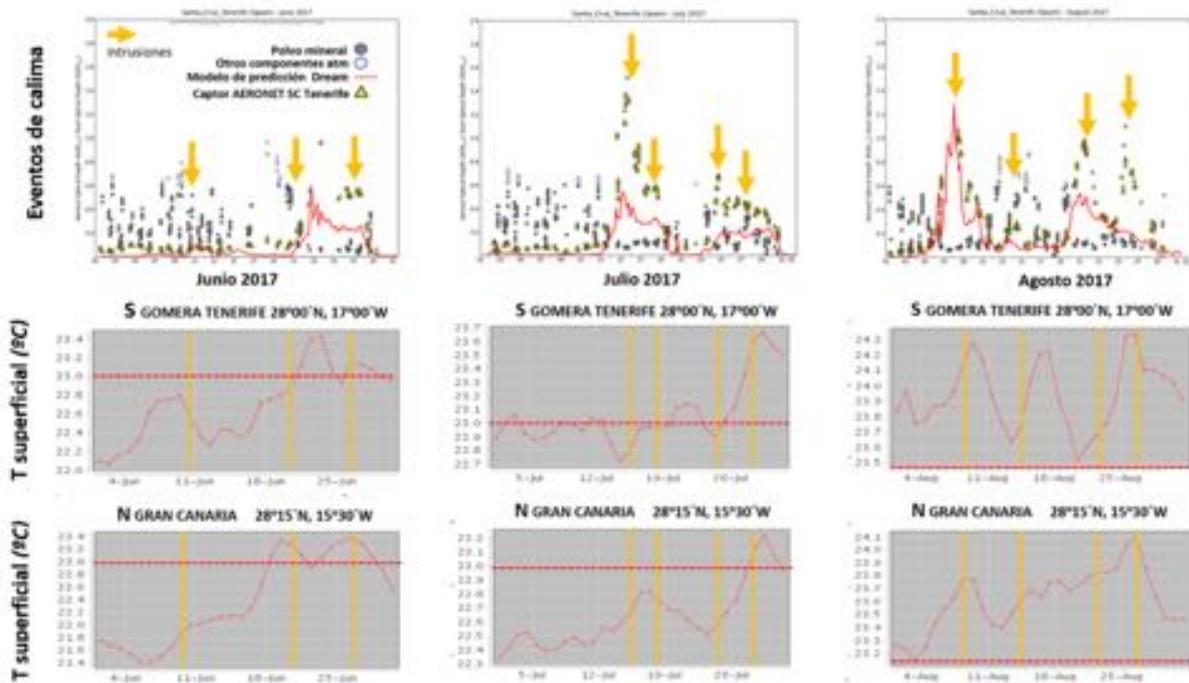


Figura 8

Comparación de la velocidad del viento y profundidad de la capa de mezcla entre Agosto de 2016 y 2017. Se puede observar la disminución de viento y de la profundidad de la capa de mezcla en la región de Canarias. Datos obtenidos del "Operational Mercator global ocean analysis and forecast system at 1/12 degree" (Copernicus)



Panel superior: Intrusiones de polvo para los meses de Junio-Agosto, obtenidas del Sistema de Predicción de aerosoles y de los registros de la estación Aeronet in situ ubicada en S/C de Tenerife (BSC/AEMET). <https://dust.aemet.es/>. Las fechas y líneas amarillas marcan las intrusiones más significativas
 Paneles inferiores: Temperatura Superficial del Mar (Junio-Agosto 2017) en 2 estaciones correspondientes al S del canal Tenerife-Gomera y al N de Gran Canaria). Sistema Copernicus (<https://marine.copernicus.eu>).

Figura 9

Las primeras observaciones del *bloom* de *Trichodesmium* a partir del 11 de junio en El Hierro y Tenerife, coinciden con una subida de la temperatura del agua hasta cerca de 23°C y un episodio de entrada de calima (Figura 9). Las siguientes observaciones de manchas extensas observadas el 19 de junio frente al aeropuerto sur de Tenerife también coinciden con una nueva subida de temperatura y un nueva intrusión de aerosoles.

Durante el mes de julio, las **islas más occidentales**, con temperaturas cercanas a los 23°C y afectadas por diversas intrusiones de polvo (sobre todo en la segunda quincena) siguen manteniendo estos *blooms*, con avistamientos no solo en Tenerife, sino también en La Gomera, La Palma, El Hierro y la zona de calma del sur de Gran Canaria.

En las **islas orientales**, las temperaturas más suaves en junio y julio no permiten desarrollos masivos como los observados en las islas occidentales, aunque es probable que se estuvieran formando *blooms* en aguas abiertas (no observados cerca de la costa) coincidiendo con las olas de calor de finales de junio y julio. En agosto, la temperatura en todas las islas es superior a 23°C y el *bloom* se extiende hacia las costas de Gran Canaria, con un repunte en todo el Archipiélago a partir del 24 de agosto, tras subir de nuevo la temperatura hasta >24°C y tras varios episodios de calima (Figura 9).



Figura 10a

Imágenes de blooms de *Trichodesmium* tomadas desde el "Helicóptero del Grupo de Emergencias y Salvamento (GES) del Gobierno de Canarias" en la costa noreste de Tenerife



Figura 10b

Imágenes de blooms de *Trichodesmium* tomadas desde el "Helicóptero del Grupo de Emergencias y Salvamento (GES) del Gobierno de Canarias" en la costa noreste de Tenerife

Las imágenes aéreas tomadas por el “Grupo de Emergencias y Salvamento (GES) del Gobierno de Canarias” (Figuras 10a,b), confirman inequívocamente que los *blooms* se forman en aguas abiertas, acumulándose bien en hileras (*slicks*) o manchas, en zonas de convergencia de masas de agua, siendo transportadas a la costa por corrientes secundarias asociadas a procesos a submesoescala (como filamentos o remolinos). Cerca de la costa, *Trichodesmium* queda retenido en playas, bahías y puertos, donde forma manchas de tonos verdosos o rosáceos, adquiriendo el agua un aspecto lechoso y de fuerte olor a amonio. Esto indica que las colonias están en fase terminal autocatalítica (PCD), vertiendo todo tipo de productos al medio.

Un ejemplo excelente lo suministra la imagen de La Gomera, del día 29 de agosto, tomada por el satélite Sentinel-2 (ESA, Copernicus) (Figura 11). En esta imagen se puede apreciar el bloom de *Trichodesmium* en fase activa (o al menos no senescente), en las aguas abiertas alrededor de la isla, y filamentos extensos del bloom al sur de la isla, mostrando un color rosado, probablemente debido a la excreción de los pigmentos, lo que indicaría que el bloom está en esa zona en fase terminal (PCD).

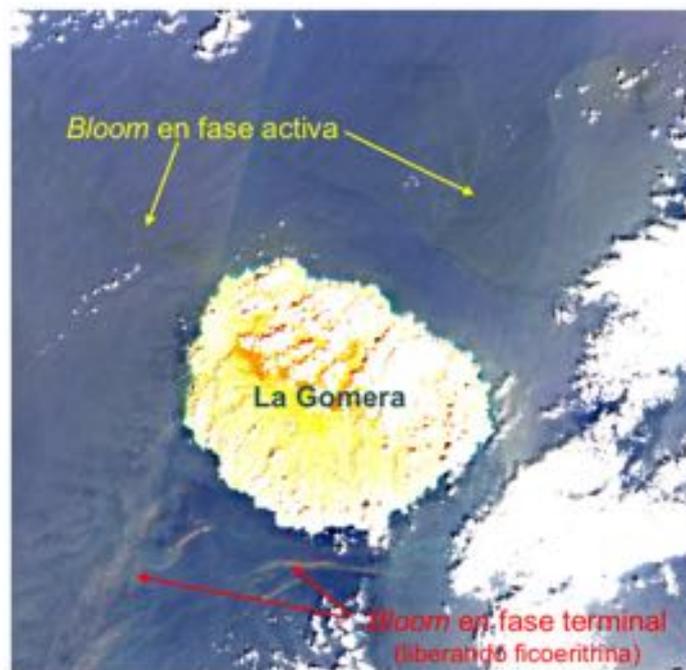


Figura 11 Imagen Radiométrica de Sentinel-2 (ESA; Copernicus) del 29 de Agosto de 2017, mostrando claramente el extenso bloom oceánico de *Trichodesmium* alrededor de la Isla de La Gomera, con parte de las poblaciones en fase terminal autocatalítica, liberando ficoeritina al mar (color rojo de las bandas y manchas)

¿Existe relación entre el desarrollo del *bloom* y vertidos costeros de aguas residuales?

Tal y como se ha documentado en el apartado anterior, **el desarrollo del *bloom* a lo largo del verano fue por causas naturales**, comenzando en las islas occidentales (donde la temperatura fue más elevada, el viento más débil y la incidencia de calima más acusada), y extendiéndose hacia las islas orientales, con más incidencia a finales de agosto, cuando las condiciones en éstas últimas fueron adecuadas para el desarrollo del *bloom*. Los modelos de corrientes y **vorticidad a escala de 1 km de resolución** (Evan Mason, sin publicar; Figura 12) explicarían cómo los *blooms* oceánicos pueden ser **transportados hacia la costa**, incluso desde el sur de las Islas hacia el norte de las mismas, por corrientes costeras. Las fotografías tomadas desde helicóptero (Figuras 10a,b) muestran largas manchas en forma de filamentos de muchos kilómetros de longitud en aguas abiertas y otras más reducidas cerca de la costa rodeando estructuras de pequeña escala, como remolinos, conectadas con las anteriores, lo que **apoya la hipótesis de que las cianobacterias fueron transportadas en superficie desde aguas abiertas hacia las zonas costeras** por medio de corrientes locales y procesos a escala espacial reducida.

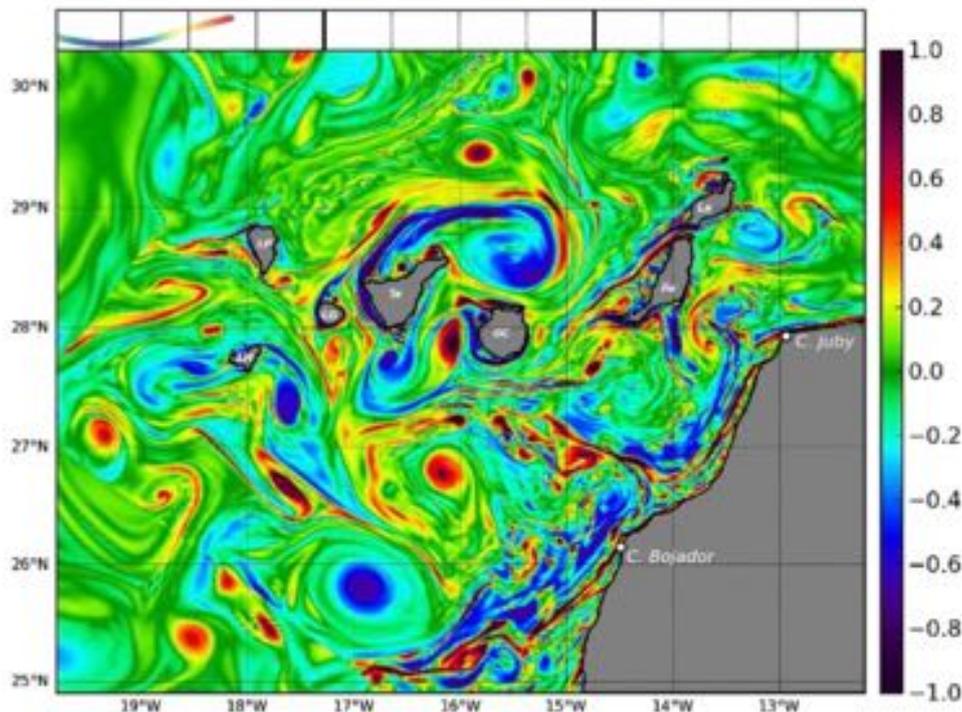


Figura 12

Fotograma de un modelo climatológico de vorticidad de 1 km de resolución (Evan Mason, sin publicar), indicando la circulación costera a pequeña escala (vorticidad negativa; color azul), lo que explicaría el desplazamiento de blooms de *Trichodesmium* desarrollados en las regiones más protegidas del sur de las islas hacia el norte de Tenerife y Gran Canaria, o la aproximación de blooms oceánicos hacia la costa.

No hay ninguna evidencia del efecto de los vertidos de aguas residuales sobre la formación de *blooms* o de su reactivación. De hecho, la reactivación de los *blooms* (más bien la aparición de nuevos *blooms* de *Trichodesmium* a lo largo del verano) **ha coincidido siempre con episodios de aumento de temperatura, disminución de viento y entrada de aerosoles.** Por otro lado, estos *blooms* costeros **se han presentado tanto en zonas afectadas por vertidos** (e.g. costa este de Tenerife), **como en zonas donde no hay presencia de vertidos** (e.g. Mar de las Calmas, al sur de El Hierro, o la Gomera, donde los *blooms* han sido muy intensos y constantes durante todo el verano).

Cabe destacar también que la **mayoría de las colonias de *Trichodesmium* cuando llegaban a la costa parecían estar en fase celular autocatalítica (PCD)**, como lo demuestra la intensa exudación de compuestos exopoliméricos, amonio y pigmentos (que daba lugar a manchas de aspecto lechoso, con tonalidades verdes y rosas (Figuras 10b y 11) y fuerte olor). **Esto indica que los *blooms* no solo no estaban reactivados, sino en fase terminal.**

Pero, a pesar de la falta de evidencias durante el *bloom* de este verano, **¿cabe la posibilidad de que un vertido costero pueda servir de fuente de nutrientes a *Trichodesmium* y producir o reactivar un *bloom* como el aparecido este verano en Canarias?**

Entre la literatura revisada no hemos encontrado **ningún trabajo que demuestre de forma concluyente el desarrollo de *blooms* masivos, como los encontrados en Canarias, debido a vertidos.**

Recientemente, se ha publicado un artículo en la revista “*Scientific Reports*”, titulado “**Sewage outburst triggers *Trichodesmium* bloom and enhance N₂ fixation rates**” (Rahav & Bar-Zeev, 2017), que merece la pena comentar y poner en contexto en relación al *bloom* de Canarias, ya que en las redes sociales y en parte de la prensa de Canarias se ha utilizado como argumento para justificar una posible vinculación del *bloom* con vertidos de aguas residuales.

1. Las **condiciones del estudio** de Rahav & Bar-Zeev son **completamente distintas** a las de Canarias. Se muestreó en las aguas ultraoligotróficas de la costa de Israel, donde *Trichodesmium* no es un componente destacable de la comunidad planctónica -de hecho no lo es en todo el Mediterráneo- durante el invierno, a temperaturas entre 18 y 20°C, por debajo de las temperaturas óptimas de crecimiento y desarrollo de *Trichodesmium* (>23°C).
2. Se estudió **1 sola estación** a la salida de un vertido municipal masivo (miles de litros /h de agua sin tratar) por **sobrecarga del sistema** de drenaje de una planta depuradora de residuos, que duró **5 días**, liberando gran cantidad de nutrientes

inorgánicos y orgánicos a la zona costera de forma anómala, superior al caudal de vertidos habitual durante el funcionamiento rutinario de la planta. No se indica dónde está la estación emplazada, pero en cualquier caso **no se muestreó ninguna estación más de control** (no afectada por el vertido) para contrastar los efectos sobre las poblaciones locales de *Trichodesmium* y conocer **la extensión del efecto del vertido**.

3. Entre las conclusiones de su trabajo destacan que se forma un *bloom* de *Trichodesmium* justo durante el vertido, pero los **datos que aportan no avalan lo que se entiende en la literatura científica por un bloom**. Dan abundancias máximas promedio de alrededor de 1500 tricomas L⁻¹. Estos **valores son extremadamente bajos** si se compara con el *bloom* de este verano en Canarias, o los registrados en otras regiones del Mar Mediterráneo, donde los *blooms* (desarrollados por causas naturales) llegan a albergar hasta **cientos de millones de tricomas por litro** (Sabeur *et al.*, 2016).
4. A pesar de que indican que aumentan las **tasas de fijación de N₂** durante el vertido, los valores son **extremadamente bajos** (<0.7 nmol N L⁻¹ d⁻¹), similares a los que se pueden encontrar en aguas del norte de Canarias durante el año (Benavides *et al.*, 2011), y un orden de magnitud inferior a lo que se encuentra al sur de Canarias, sobre 25°N (Benavides *et al.*, 2013), lo que sugiere que las colonias de *Trichodesmium* encontradas en el vertido de la costa israelí estaban probablemente en **mal estado y poco activas**.
5. Los autores reconocen en su trabajo que las tasas de fijación de N₂ son muy bajas y sugieren que *Trichodesmium* se alimenta de la materia orgánica del vertido (por **mixotrofia**), basándose en una publicación reciente de Benavides *et al.* (2017), donde se ve que *Trichodesmium* en cultivos puede asimilar compuestos orgánicos. Sin embargo, en esta misma publicación Benavides *et al.* (2017) describen que la **mixotrofia no afecta las tasas de fijación de N₂**, por lo que sería un mecanismo de supervivencia “basal”, que no podría mantener el desarrollo de un *bloom*.

En resumen, creemos que **este estudio no es extrapolable a las aguas de Canarias**, por las razones antes mencionadas, **ni demuestra que los vertidos urbanos pueden generar blooms masivos de *Trichodesmium*, ni aumentar significativamente las tasas de fijación de N₂**.

No obstante, el trabajo de Rahav & Bar-Zeev **plantea una cuestión que sería recomendable investigar** en regiones de vertidos continuados (como es el caso de Canarias), mediante experimentos y trabajos de campo que demuestren o descarten la posibilidad de que los vertidos tengan influencia **no solo sobre el crecimiento de *Trichodesmium*, sino también sobre poblaciones de bacterias y fitoplancton marino**

que puedan desarrollar *blooms* (incluso “mareas rojas”). Es preciso llevar a cabo experimentos de fijación de carbono y N₂ en poblaciones de fitoplancton y *Trichodesmium* creciendo cerca y lejos de zonas de vertidos (o en cultivos con agua de vertidos y agua sin contaminar). Para ello, hace falta estudiar, entre otros factores, **la composición química del vertido, su distribución espacial y dispersión con los vientos y corrientes marinas**, así como el estado metabólico de las poblaciones de bacterias, cianobacterias y fitoplancton. Altas concentraciones de nitrógeno, o relaciones N/P altas en el vertido pueden inhibir el crecimiento de organismos diazotróficos como *Trichodesmium* y favorecer el crecimiento de otras algas fotosintéticas (tanto pelágicas como bentónicas). Es necesario cuantificar la concentración (y biodisponibilidad) de los compuestos del vertido (nitrógeno y fósforo inorgánico y orgánico, carbono orgánico disuelto, vitaminas y metales traza), para poder entender la respuesta de *Trichodesmium* y fitoplancton fotosintético, y su capacidad de usar residuos como fuente de nutrientes.

Toxicidad de *Trichodesmium*

Trichodesmium libera al medio, sobre todo durante la fase terminal de un *bloom*, **enormes cantidades de nitrógeno (en forma de amonio), pigmentos y carbono orgánico disuelto (principalmente como partículas exopoliméricas)**. También libera multitud de **metabolitos secundarios, como toxinas**, incluyendo trichotoxinas (Schock *et al.*, 2011), paliotoxinas (Kerbrat *et al.*, 2011) y neurotoxinas (Cox *et al.*, 2005). Muchas de estas toxinas se piensa que tienen un efecto disuasorio sobre sus predadores (Layton *et al.*, 2008), aunque hay poca información al respecto. **Apenas una decena de estudios han tratado la toxicidad de *Trichodesmium*** en las últimas dos décadas (ver referencias bibliográficas). Se han detectado efectos neurotóxicos y hepatotóxicos en ratones (Kerbrat *et al.*, 2010) y en larvas de crustáceos (Detoni *et al.*, 2016). En la mayoría de los casos, las cantidades de toxinas producidas por *Trichodesmium* son demasiado bajas para afectar letalmente a estos organismos, aunque sí se ha observado mortandad en el crustáceo *Artemia salina* (Narayana *et al.*, 2014; Detoni *et al.*, 2016).

Estudios en aguas de Brasil han citado algunos **efectos adversos en humanos ocasionados por el contacto físico con *blooms* de *Trichodesmium*, como dermatitis, irritación de mucosas y estrés respiratorio, aunque no hay casos registrados de toxicidad directa sobre personas**. De hecho, las actuaciones en países con una cultura ambiental y sanitaria avanzada, como Australia, **recomiendan simplemente no bañarse cerca de manchas de *Trichodesmium*, e informan del carácter nocivo pero no tóxico en humanos de la cianobacteria:**

https://www.ehp.qld.gov.au/coastal/ecology/lyngbya-updates/index.html#trichodesmium_spp

La liberación al medio de carbono y nitrógeno en exceso puede, sin embargo, provocar el **crecimiento de especies tóxicas de fitoplancton (mareas rojas)**. Esto se viene describiendo desde hace más de dos décadas en la región del Golfo de México donde, tras los *blooms* de *Trichodesmium*, se desarrollan “mareas rojas” del dinoflagelado tóxico *Karenia brevis*, induciendo a una gran mortandad de peces y organismos marinos (ver referencias en Lenos & Heil, 2010). Sería por lo tanto **necesario monitorizar este tipo de eventos tras los blooms masivos de Trichodesmium**, como el que se ha producido este verano en Canarias y realizar actuaciones de gestión similares a las que se llevan a cabo en la costa oeste de Florida:

https://nccospublicstor.blob.core.windows.net/projects-attachments/225/ian_newsletter_394.pdf

Referencias bibliográficas

- Achilles KM, Church TM, Wilhelm SW, Luther GW, Hutchins DA (2003) Bioavailability of iron to *Trichodesmium* colonies in the western subtropical Atlantic Ocean. *Limnol Oceanogr* 48: 2250–2255.
- Arístegui J, Barton ED, Alvarez Salgado XA, Santos AMP, Figueiras FG, Kifani S, Hernández-León S, Mason E, Machu E, Demarcq H (2009) Sub-regional ecosystem variability in the Canary Current upwelling (Review). *Prog. in Oceanog.* 83: 33-48.
- Benavides M, Agawin N, Arístegui J, Ferriol P, Stal LJ (2011) Nitrogen fixation by *Trichodesmium* and small diazotrophs in the subtropical northeast Atlantic. *Aquat Microb Ecol* 65:43–53.
- Benavides M, Arístegui J, Agawin NSR, López Cancio J, Hernández-León S (2013a) Enhancement of nitrogen fixation rates by unicellular diazotrophs vs. *Trichodesmium* after a dust deposition event in the Canary Islands. *Limnol Oceanogr* 58:267–275.
- Benavides M, Bronk DA, Agawin NSR, Pérez-Hernández MD, Hernández-Guerra A, Arístegui J (2013b) Longitudinal variability of size-fractionated N₂ fixation and DON release rates along 24.5°N in the subtropical North Atlantic. *J Geophys Res Oceans* 118:3406–3415.
- Benavides M, Voss M (2015) Five decades of N₂ fixation research in the North Atlantic Ocean. *Frontiers in Marine Science* 2:1–40.
- Benavides M, Moisaner PH, Daley MC, Bode A, Arístegui J (2016) Longitudinal variability of diazotroph abundances in the subtropical North Atlantic Ocean. *J Plankton Res* 38:662–672.
- Benavides M, Berthelot H, Duhamel S, Raimbault P, Bonnet S (2017) Dissolved organic matter uptake by *Trichodesmium* in the Southwest Pacific. *Sci Rep* 7:41315.
- Berman-Frank I, Bidle KD, Haramaty L, Falkowski PG (2004) The demise of the marine cyanobacterium, *Trichodesmium* spp., via an autocatalyzed cell death pathway. *Limnol Oceanogr* 49: 997–1005.
- Bergman B, Sandh G, Lin S, Larsson J, Carpenter EJ (2012) *Trichodesmium* - a widespread marine cyanobacterium with unusual nitrogen fixation properties. *FEMS Microbiol Rev* 37:286–302.
- Bonnet S, Guieu C (2006) Atmospheric forcing on the annual iron cycle in the western Mediterranean Sea: a 1-year survey. *J. Geophys. Res.* 111, C09010.
- Capone DG, Burns JA, Montoya JP, Subramaniam A, Mahaffey C, Gunderson T, Michaels AF, Carpenter EJ (2005) Nitrogen fixation by *Trichodesmium* spp.: An important source of new nitrogen to the tropical and subtropical North Atlantic Ocean. *Global Biogeochemical Cycles* 19:GB2024.
- Carpenter EJ, Bergman B, Dawson R, Siddiqui PJ, Söderbäck E, Capone DG (1992)

Glutamine synthetase and nitrogen cycling in colonies of the marine diazotrophic cyanobacteria *Trichodesmium* spp. *Appl Environ Microbiol* 58:3122–3129.

- Chappell PD, Webb EA (2010) A molecular assessment of the iron stress response in the two phylogenetic clades of *Trichodesmium*. *Environ Microbiol* 12:13–27.
- Chien C-T, Mackey KRM, Dutkiewicz S, Mahowald NM, Prospero, JM, Paytan A (2016) Effects of African dust deposition on phytoplankton in the western tropical Atlantic Ocean off Barbados. *Global Biogeochem. Cycles*, 30: 716–734.
- Díez B, Bergman B, Pedrós-Alió C, Antó M, Snoeijs P (2012) High cyanobacterial nifH gene diversity in Arctic seawater and sea ice brine. *Environ Microbiol Rep* 4: 360–366. doi: 10.1111/j.1758-2229.2012.00343.x.
- Dupouy C, Benielli-Gary D, Neveux J, Dandonneau Y, Westberry TK (2011) An algorithm for detecting *Trichodesmium* surface blooms in the South Western Tropical Pacific. *Biogeosciences*, 8: 3631-3647.
- Follows MJ, Dutkiewicz S, Grant S, Chisholm SW (2007) Emergent biography of microbial communities in a model ocean. *Science* 135: 1843-1846.
- Frischkorn KR, Rouco M, Van Mooy BA, Dyhrman ST (2017) Epibionts dominate metabolic functional potential of *Trichodesmium* colonies from the oligotrophic ocean. *ISME J*:1–12
- Gelado-Caballero MD, López-García P, Prieto S, Patey MD, Collado C, Hernández-Brito JJ (2012) Long-term aerosol measurements in Gran Canaria, Canary Islands: Particle concentration, sources and elemental composition, *J. Geophys. Res.* 117, DOI: 10.1029/2011JD016646.
- Hernández-León S, Postel L, Arístegui J, Gómez M, Montero M.F, Torres S, Almeida C, Kühner, E, Brenning U, Hagen E (1999) Large-scale and mesoscale distribution of plankton biomass and metabolic activity in the Northeastern Central Atlantic. *Journal of Oceanography* 55: 471-482.
- Lenos JM, Heil CA (2010) A historical analysis of the potential nutrient supply from the N₂ fixing marine cyanobacterium *Trichodesmium* spp. to *Karenia brevis* blooms in the eastern Gulf of Mexico. *J Plankton Res* 32:1421–1431 *mnol Oceanogr*:856–869.
- Mantas VM, Pereira AJSC, Morais PV (2011) Plumes of discolored water of volcanic origin and possible implications for algal communities. The case of the Home Reef eruption of 2006 (Tonga, Southwest Pacific Ocean). *Remote Sensing Environment*, 115: 1341-1352.
- Mills MM, Ridame C, Davey M, La Roche J, Geider RJ (2004) Iron and phosphorus co-limit nitrogen fixation in the eastern tropical North Atlantic. *Nature* 429:292–294.
- Moore CM, Mills MM, Achterberg EP, Geider RJ, LaRoche J, Lucas MI, McDonagh EL, Pan X, Poulton AJ, Rijkenberg MJA, Suggett DJ, Ussher SJ, Woodward EMS (2009) Large-scale distribution of Atlantic nitrogen fixation controlled by iron availability. *Nature Geosci* 2:867–871.
- Olson EM, Dyhrman ST, Waterbury JB, Davis CS, Solow AR (2015) Author's Accepted

- Orcutt KM, Lipschultz F, Gundersen K, Arimoto R, Michaels AF, Knap AH, Gallon JR (2001) A seasonal study of the significance of N₂ fixation by *Trichodesmium* spp. at the Bermuda Atlantic Time-series Study (BATS) site. Deep-Sea Res Part II 48:1583–1608.
- Pulido-Villena E, Rérolle V, Guieu C, (2010). Transient fertilizing effect of dust in P-deficient LNLC surface Ocean. Geophys. Res. Lett. 37, L01603.
- Rahav E, Bar-Zeev E (2017) Sewage outburst triggers *Trichodesmium* bloom and enhance N₂ fixation rates. Scientific Reports 7:4367, DOI:10.1038/s41598-017-04622-8.
- Ramos AG, Martel A, Codd GA, Soler E, Coca J, Redondo A, Morrison LF, Metcalf JS, Ojeda A, Suárez S, Petit M (2005) Bloom of the marine diazotrophic cyanobacterium *Trichodesmium erythraeum* in the Northwest African Upwelling, Mar. Ecol. Prog. Ser. 301: 303-305.
- Ridame C, Guieu C (2002) Saharan input of phosphate to the oligotrophic water of the open western Mediterranean Sea. Limnol. Oceanogr. 47:857-869.
- Rubin M, Berman-Frank I, Shaked Y (2011) Dust- and mineral-iron utilization by the marine dinitrogen-fixer *Trichodesmium*. Nature Geoscience 4:529–534
- Sabeur HI, Wafa F-S, Asma H, Malika BH (2016) Long term characterization of *Trichodesmium erythraeum* blooms in Gabès Gulf (Tunisia). Continental Shelf Research 124: 95-103.
- Sandel V, Kiko, R, Brandt P, Dengler M, Stemmann L, Vandromme P, Sommeer U, Haus (2015) Nitrogen fuelling the pelagic food web of the Tropical Atlantic. PLoS ONE 10(6): e0131258. doi:10.1371/ journal.pone.0131258.
- Sañudo-Wilhelmy SA, Kustka AB, Gobler CJ, Hutchins DA, Yang M, Lwiza K, Burns J, Capone DG, Raven JA, Carpenter EJ (2001) Phosphorus limitation of nitrogen fixation by *Trichodesmium* in the central Atlantic Ocean. Nature 411:66–69.
- Sohm JA, Mahaffey C, Capone DG (2008) Assessment of relative phosphorus limitation of *Trichodesmium* spp. in the North Pacific, North Atlantic, and the north coast of Australia. Limnol Oceanogr:2495–2502
- Spungin D, Pfreundt U, Berthelot H, Bonnet S, AlRoumi D, Natale F, Hess WR, Bidle KD, Berman-Frank I (2016) Mechanisms of *Trichodesmium* demise within the New Caledonian lagoon during the VAHINE mesocosm experiment. Biogeosciences 13: 4187-4203.
- Theodosi C, Markaki Z, Mihalopoulos N (2010) Iron speciation, solubility and temporal variability in wet and dry deposition in the Eastern Mediterranean. Mar. Chem. 120:100–107.
- Walworth N, Pfreundt U, Nelson WC, Mincer T, Heidelberg JF, Fu F, Waterbury JB, Glavina del Rio T, Goodwin L, Kyrpidis NC, Land ML, Woyke T, Hutchins DA, Hess WR, Webb EA (2015) *Trichodesmium* genome maintains abundant, widespread noncoding DNA in situ, despite oligotrophic lifestyle. Proc Natl Acad Sci USA 112:4251–4256.

- White AE, Spitz YH, Letelier RM (2006b) Modeling carbohydrate ballasting by *Trichodesmium* spp. Mar Ecol Prog Ser 323: 35–45.

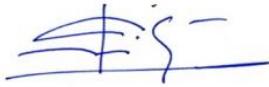
Capítulo de toxicidad

- Affe HJ, Barboni S (2012) Cianobacterias potencialmente tóxicas de importancia em Saúde Pública. RevInter Revista Intertox de Toxicologia
- Bertin MJ, Wahome PG, Zimba PV, He H, Moeller PDR (2017). Trichophycin A, a Cytotoxic linear Polyketide isolated from a *Trichodesmium thiebautii* bloom. Mar. Drugs 15:10. doi:10.3390/md15010010
- Cox PA, Banack SA, Murch SJ, Rasmussen U, Tien G, Bidigare RR, Metcalf JS, Morrison LF, Codd, GA, Bergman B (2005) Diverse taxa of cyanobacteria produce β -N-methylamino-L-alanine, a neurotoxic amino acid. PNAS, 102:14
- de J Affe HM, Caires TA, da Silva EM, de C Nunes JM (2016) Floración de *Trichodesmium erythraeum* en la región costera tropical de Brasil. Rev biol mar oceanogr 51:175–179
- Detoni AMS, Costa LDF, Pacheco LA, Yunes JS (1999) Toxic *Trichodesmium* bloom occurrence in the southwestern South Atlantic Ocean. Toxicon 110:51–55
- Hawser SP, Codd GA (1992) The toxicity of *Trichodesmium* blooms from Caribbean waters. In: Carpenter EJ, Capone DG (eds) Marine pelagic cyanobacteria: *Trichodesmium* and other Diazotrophs, p 319–329
- Kerbrat A-S, Darius HT, Pauillac S, Chinain M, Laurent D (2010) Detection of ciguatoxin-like and paralyzing toxins in *Trichodesmium* spp. from New Caledonia lagoon. Marine Pollution Bulletin 61:360–366
- Layton BE, D'Souza AJ, Dampier W, Zeiger A, Sabur A, Jean-Charles J (2008) Collagen's triglycine repeat number and phylogeny suggest an interdomain transfer event from a devonian or silurian organism into *Trichodesmium erythraeum*. J Mol Evol 66: 539–554.
- Lenos JM, Heil CA (2010) A historical analysis of the potential nutrient supply from the N₂ fixing marine cyanobacterium *Trichodesmium* spp. to *Karenia brevis* blooms in the eastern Gulf of Mexico. Journal of Plankton Research, 32: 1421–1431.
- Narayana S, Chitra J, Tapase SR, Thamke V, Karthick P, Ramesh C, Murthy KN, Ramasamy M, Kodam KM, Mohanraju R (2014) Toxicity studies of *Trichodesmium erythraeum* (Ehrenberg, 1830) bloom extracts, from Phoenix Bay, Port Blair, Andamans. Harmful Algae 40:34–39
- Proença L, Tamanaha MS (2009) Screening the toxicity and toxin content of blooms of the cyanobacterium *Trichodesmium erythraeum* (Ehrenberg) in northeast Brasil. J Venom Anim Toxins Incl Trop Dis 15:204–215
- Schock TB, Huncik K, Beauchesne KR, Villareal TA, Moeller PDR (2011) Identification of Trichotoxin, a Novel Chlorinated Compound Associated with the Bloom Forming Cyanobacterium, *Trichodesmium thiebautii*. Environ Sci Technol 45:7503–7509

Agradecimientos

Desde el inicio del evento, la colaboración desinteresada, continúa y comprometida de los ciudadanos y colaboradores de la RedPROMAR ha sido fundamental para su seguimiento, notificando observaciones, enviando imágenes o recogiendo muestras. A todos ellos nuestro agradecimiento como ejemplo de ciencia ciudadana. De la misma forma, agradecemos la información aportada por la coordinación y vigilantes de las reservas marinas de La Palma y El Hierro, los inspectores de la DG de Salud Pública, el “Grupo de Emergencias y Salvamento (GES) del Gobierno de Canarias” y la DG de Protección de la Naturaleza. Gracias también a Josep Coca (SITMA) por su ayuda en el procesamiento de la imagen Sentinel-2 y los mapas de vertidos, y a Evan Mason por el fotograma de su modelo de vorticidad.

Las Palmas de Gran Canaria, a 2 de Septiembre de 2017



Javier Arístegui Ruiz



Antonio J. González Ramos



Mar Benavides Gorostegui