

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN  
NÁUTICA Y TRANSPORTE MARÍTIMO**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

***ESTUDIO SOBRE LA INFLUENCIA DEL  
CAMBIO CLIMÁTICO EN LA  
NAVEGACIÓN***

**Estudiante**  
**Director/Directora**  
**Departamento**  
**Curso académico**

*Mayol, Morell, Joan*  
*Sánchez-Beaskoetxea, Javier*  
*2022/23*

*Bilbao, 06, 06, 2023*

## ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN	3
2 OBJETIVOS	4
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 “Aumento de la corriente del golfo de México”	5
3.2 “Fenómeno de la Amplificación Cuasi-Resonante”	6
3.3 “Tren de borrascas de Enero”	9
4. DESARROLLO DEL TRABAJO	13
4.1 Corriente Atlántica	13
4.1.1 Aceleración del agua en superficie	14
4.1.2 Desaceleración del agua en profundidad	15
4.1.3 Desestabilización del sistema	16
4.1.4 Cold Bob	17
4.2 Amplificación Cuasi-Resonante	18
4.2.1 Corrientes en chorro	20
4.2.2 Fenómeno de la Amplificación	23
4.3 Ciclogénesis explosivas	23
4.3.1 Trenes de borrascas	25
4.3.2 Trenes de borrascas en la península	25
5 CONCLUSIONES	27
6 BIBLIOGRAFÍA	30

## 1. INTRODUCCIÓN

La realización de este Trabajo Final de Máster se va a centrar en entender un poco mejor cómo el calentamiento del planeta Tierra esta afectando a la estabilidad de él mismo y su condicionamiento al mundo marítimo, a través de una serie de noticias de actualidad se van a desarrollar y estudiar para conocer mejor estos efectos.

El cambio climático es uno de los mayores desafíos que enfrenta nuestro planeta en la actualidad. A medida que el clima global experimenta transformaciones significativas, sus efectos se hacen evidentes en diversos aspectos de nuestra vida, incluida la navegación. Los fenómenos meteorológicos extremos, el aumento del nivel del mar, los cambios en las corrientes oceánicas y otros impactos relacionados con el cambio climático están alterando el escenario marítimo de maneras que demandan una atención urgente.

Hasta la fecha tenemos indicios de que los efectos climáticos adversos que se están produciendo van a empeorar las condiciones de vida y en este caso en particular las de la navegación de buques en el futuro, pero realmente estudios que afirmen con certeza lo que puede llegar a ocurrir son casi casi inexistentes. No es la intención de este trabajo dar esas certezas pero si acercarse un poco más a lo que esta pasando actualmente en el planeta.

A través de noticias de actualidad se va a desglosar cómo y en que esta afectando este calentamiento en la formación de bajas presiones que son las que llevan consigo condiciones de viento y mala mar. Se van a tratar temas como son la influencia del calentamiento en la superficie del agua, el deshielo, las corrientes en profundidad,

## **2. OBJETIVOS**

Analizar los principales efectos del cambio climático en la navegación, incluyendo los cambios en los patrones climáticos, los fenómenos meteorológicos extremos y el aumento del nivel del mar, y comprender cómo estos factores impactan en la navegación.

Investigar los riesgos y desafíos específicos que enfrenta la navegación debido al cambio climático, tales como la intensificación de tormentas y la posible reconfiguración de las corrientes oceánicas.

Investigar los procesos atmosféricos y meteorológicos que conducen al desarrollo y la intensificación de las tormentas, como la convección, la inestabilidad atmosférica, los frentes y la interacción entre masas de aire, para comprender los mecanismos que las sustentan.

Analizar los cambios en los patrones de tormentas y su relación con el cambio climático, incluyendo el impacto del calentamiento global en la frecuencia e intensidad de las tormentas, con el fin de evaluar los posibles escenarios futuros y los desafíos que plantea el cambio climático en relación a las tormentas.

Al cumplir con estos objetivos, se busca obtener una comprensión general del cambio climático, sus causas y consecuencias, en la mar.

### 3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

A través de noticias de actualidad que se refieren a cómo esta afectando el cambio climático al planeta

#### 3.1 “Aumento de la corriente del golfo de México” en Prensa Europa-press.

El volumen de agua cálida que mueve la Corriente del Golfo en el Atlántico Norte hacia los mares nórdicos se ha fortalecido en el transcurso de los últimos cien años.

Con este sorprendente aumento de volumen, el transporte de calor total ha aumentado en un 30 por ciento, según Lars H. Smedsrud, profesor de la Universidad de Bergen e investigador del Centro Bjerknes para la Investigación del Clima.

Smedsrud y su equipo han examinado los cambios en relación con el derretimiento del hielo en el Ártico, el derretimiento de los glaciares en Groenlandia y la absorción de CO<sub>2</sub> de la atmósfera. "Si bien esperábamos un aumento en la temperatura, no hay nada sobre el calentamiento global que sugiera un aumento en el volumen de transporte. Pero el aumento es consistente tanto con vientos más fuertes como con la disminución de las capas de hielo marino. Además, vemos un aumento en la vertical y la circulación oceánica horizontal en los mares nórdicos y el Ártico.

La circulación oceánica podría debilitarse en el futuro en la parte vertical de la circulación oceánica en el futuro, la parte conocida como Circulación de Retorno Meridional del Atlántico (Corriente AMOC). “Esto afectaría el sistema de la corriente del Golfo, pero muchas observaciones indican que la parte horizontal no se verá afectada, debido a la disminución de las capas de hielo marino y al aumento de la pérdida de calor a la atmósfera”.

Todavía es incierto cómo evolucionará la circulación oceánica en el futuro, Sin embargo, el estudio también muestra una pérdida constante de hielo marino en el Ártico durante los últimos cien años, lo que ha permitido una mayor absorción de CO<sub>2</sub> de la atmósfera.

“Durante el invierno, el hielo marino aísla el océano cálido del aire frío. Con el derretimiento de hielo marino, aumenta la transferencia de calor al aire. El aire se calienta, los inviernos se vuelven más templados, Esto está directamente relacionado con el aumento del transporte de calor del océano”, explica Smedrud. [1]

### **3.2 “Fenómeno de la Amplificación Cuasi-resonante” en Revista del Aficionado a la Meteorología.**

Durante el verano de 2018, el futuro del cambio climático se convirtió en el presente, según algunos científicos. Unos patrones fundamentales del flujo atmosférico resuenan más a menudo que otros debido al calentamiento global, y el verano de 2019 ha comenzado de la misma forma.

Los patrones de corriente de chorro altamente amplificados y estancados durante períodos inusualmente largos trajeron al planeta una serie de catástrofes meteorológicas notables en 2018: olas de calor sin precedentes en el este de Asia y el norte de Europa, una temporada récord de incendios en California y Washington, y Japón.

La atmósfera de la Tierra tiene dos patrones fundamentales en latitudes medias y en altura, digamos 500 – 300 hPa, que controlan el tiempo en superficie.

Un patrón está formado por una serie de vaguadas y dorsales móviles en forma de ondas en la corriente en chorro llamadas ondas planetarias (o de Rossby), que se desplazan de oeste a este alrededor del mundo a aproximadamente 25 a 40 km/h.

El otro patrón se comporta más como una onda estacionaria, sin movimiento casi estacionaria, y se crea por el calentamiento desigual de las regiones ecuatoriales en comparación con los polos, modulado por la posición de los continentes y océanos.

Es un hecho que el Ártico se calienta, y un nuevo patrón aparece: el patrón cuasi estacionario y amplificado.

Se han publicado varios artículos que muestran que estos dos patrones pueden interactuar y resonar de una manera que se amplifica el patrón de onda estacionaria, lo que hace que las ondas planetarias se “congelen” en sus trayectorias durante semanas, lo que resulta en un período prolongado de calor extremo o inundaciones, dependiendo de sobre dónde se encuentra la parte de alta o baja de la onda.

Debido a que el calentamiento global causado por los humanos, el Ártico se está calentando, al menos, dos veces más rápido que el resto del planeta, y los dos patrones básicos interactúan con mayor frecuencia durante el verano.

En un documento de 2013 de Coumou et al., sobre, ¿Los patrones de flujo atmosférico son favorables para el aumento de tiempo extremo de verano? / Are atmospheric flow patterns favorable for summer extreme weather increasing? se encontró que durante el período de 11 años de 2002 a 2012, se duplicó este patrón de resonancia inusualmente extrema en verano, en comparación con los dos períodos de once años anteriores, de 1991 a 2001 y de 1980 a 1990.



Figura 1. Patrón de resonancia

Ondas más amplias y estancadas están apareciendo con mayor frecuencia, este fenómeno se conoce como Amplificación Cuasi Resonante o Quasi-Resonant Amplification "QRA", y se describe con excelente detalle en una publicación de octubre de 2018 en [realclimate.org](http://realclimate.org) post por Michael Mann.

Varios estudios más recientes han encontrado evidencia adicional de un aumento en los eventos de QRA, incluidos Mann et al. (2017), *Influence of Anthropogenic Climate Change on Planetary Wave Resonance and Extreme Weather Events*, y Lehmann et al. (2015), *Increased record-breaking precipitation events under global warming*.

El estudio de Mann et al. (2017) encontró que los eventos QRA de verano en el promedio de más de 20 modelos climáticos estudiados aumentaron desde el nivel histórico actual de  $\sim 7.5$  eventos / año a  $\sim 11$  eventos / año para finales de siglo, es decir, un aumento de aproximadamente el 50% en el número anual de eventos. Sin embargo, algunos modelos predijeron una triplicación de tales patrones de corrientes de chorro atascadas o estacionarias.

La razón clave de la variación en los diversos resultados del modelo fue la forma en que manejaron las pequeñas partículas de contaminación del aire llamadas aerosoles. Estas



partículas enfrían el globo reflejando la luz solar, principalmente en la latitud media donde se encuentran la mayoría de las fuentes de contaminación. Si los seres humanos limpian el aire instalando dispositivos de control de la contaminación que eliminan estas partículas, las latitudes medias tenderán a calentarse más rápido de lo que lo han hecho, alterando el contraste de temperatura entre los polos y el ecuador para provocar un aumento en los eventos QRA.

El Dr. Mann concluyó en su estudio: “Entonces, ¿hay alguna esperanza de evitar veranos futuros como el verano de 2018? Probablemente no. Pero en el escenario en el que nos alejamos rápidamente de los combustibles fósiles y estabilizamos las concentraciones de gases de efecto invernadero por debajo de 450 partes por millón, nos brinda una probabilidad de aproximadamente el 50% de evitar el calentamiento planetario de 2 ° C, encontramos que la frecuencia de los eventos QRA permanece aproximadamente constante en los niveles actuales.

“Si bien es probable que tengamos que lidiar con muchos más veranos como el 2018 en el futuro, es probable que podamos evitar un mayor aumento en los extremos del clima de verano persistente. En otras palabras, el futuro está todavía en nuestras manos cuando se trata de extremos climáticos veraniegos peligrosos y perjudiciales. "Es simplemente una cuestión de nuestra fuerza de voluntad la transición rápida de combustibles fósiles a energías renovables".

[2]

### **3.3 “Tren de borrascas de Enero” en noticiario El Tiempo**

Gérard, Fien y Hannelore son los nombres de las tres borrascas que se han desarrollado en sólo seis días durante el mes de enero de 2023 y esto obedece a causas meteorológicas que generan bajas con altos impactos en superficie debido al viento, mala mar, rachas huracanadas, precipitaciones, etc.

Ya se han nombrado, hasta la fecha, ocho borrascas con gran impacto social para el periodo 2022-23 por el Grupo de los SMN (Servicio Meteorológico Nacional) Suroeste europeo, formado por los SMN de Portugal (IPMA), Francia (Météo-France), Bélgica (RMI), Luxemburgo (MeteoLux) y España (AEMET). La primera fue Armand nombrada el 19 octubre 2022 por IPMA y la última Hannelore del 19 enero 2023 por Météo- France, según datos de la página de AEMET.

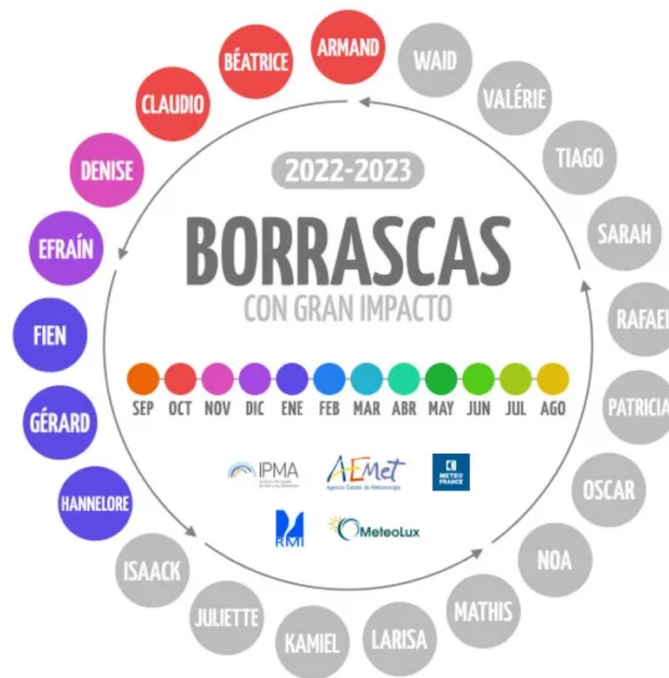


Figura 2. Nombres de borrascas 2022-2023

La última borrasca nombrada en 2022 fue Efraín por el SMN de Portugal, IPMA, el 9 de diciembre por su afectación a las Islas Azores. Fue una borrasca muy especial de mediados de diciembre cuando con sus vientos intensos y húmedos de suroestes y oestes trajeron abundantes lluvias a la fachada occidental de la Península. Además nos protegía de las entradas gélidas del norte que afectarán a otras zonas de Europa.

Tuvo que pasar más de un mes para que una borrasca de nuevo impacto apareciera.

Hay que hacer notar que después de Efraín, el siguiente nombre a usar debió ser Fien, pero por motivos que desconocemos se "coló" el nombre de Gérard. Posiblemente, en las reuniones de coordinación interna de los SMN, AEMET seleccionó con anterioridad a Météo France a Fien, aunque su desarrollo significativo sería a partir del 15 de enero y,

posteriormente, Météo France tuvo que elegir la siguiente, Gérard, aunque se formó antes, pero realmente no se conocen las razones últimas. Para analizar a las próximas tres borrascas se tomarán subjetivamente los mapas no con la fecha de su nombramiento pero sí cuando hubo un centro de bajas bien definido en superficie.

Gérard, la borrasca nombrada por AEMET el 14 de enero de 2023.

La borrasca Gérard se formó al oeste y suroeste de Irlanda sobre aguas abiertas. La baja incipiente en superficie fue sobrevolada en su lado derecho por un chorro polar de vientos del orden de 170 nudos en 300 hPa (a 9.000 m, aproximadamente). La imagen de vapor de agua, mostrada más abajo, muestra una zona oscura típica de los procesos de profundización de la baja e irrupción de aire estratosférico, muy seco.

Fien, la borrasca nombrada por Météo France el 15 de enero de 2023.

Varios senos de bajas presiones se desarrollaron dentro de una descarga de aire frío muy intenso de origen polar marítimo. Uno de estos senos de bajas presiones era Fien, situado al sur de las Islas Británicas. Los fuertes vientos en altura, del orden de 140 nudos o más, se situaban de nuevo a la derecha de la baja. Ambos sistemas interaccionaron para profundizar a Fien de forma rápida en los días siguientes.

Hannelore, la borrasca nombrada por Météo France el 19 de enero de 2023.

Nuevamente una incipiente borrasca atlántica, situada al suroeste de Irlanda, se ve sobrevolada por vientos muy intensos cerca de nuestra latitudes. La borrasca ha pasado desde el norte de la Península hacia el Mediterráneo en un proceso de profundización rápida, generando un temporal intenso de vientos.

En resumen, la presencia y coincidencia de bajas incipientes en niveles bajos, situadas al oeste y suroeste de las Islas Británicas, sobrevoladas por vientos muy intensos superiores a los 100 -150 nudos (185 - 278 km/h) o más, en todos los casos en 300 hPa (chorro polar) en latitudes relativamente bajas generaron las condiciones ideales para el desarrollo de poderosas borrascas sometidas a proceso de profundización, ciclogénesis, muy rápida. Queda

fuera de este trabajo la diagnosis si hubo o no ciclogénesis explosiva en alguna de ellas y durante periodos concretos de tiempo.

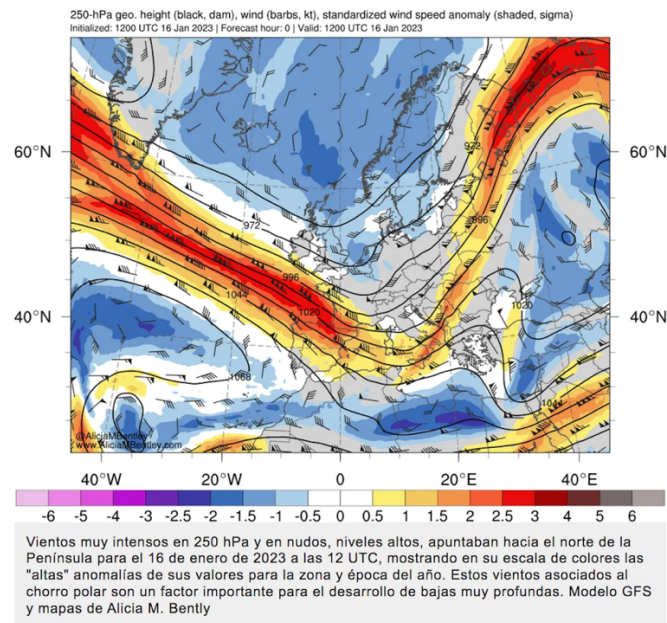


Figura 3. Mapa isóbaras y viento

Hay que destacar los intensos y "anómalos" valores de los vientos en altura, 9-12 km, de baja latitud orientados hacia la Península desde el Atlántico, como se muestra en un ejemplo de un día concreto. Las bajas incipientes en superficie se formaron en lugares próximos, al oeste y suroeste, de las Islas Británicas con desplazamientos en su profundización hacia en norte peninsular.

Vientos muy intensos en 250 hPa y en nudos, niveles altos, apuntaban hacia el norte de la Península para el 16 de enero de 2023 a las 12 UTC, mostrando en su escala de colores las "altas" anomalías de sus valores para la zona y época del año. Estos vientos asociados al chorro polar son un factor importante para el desarrollo de bajas muy profundas. Modelo GFS y mapas de Alicia M. Bently.

Normalmente estas poderosas borrascas, y sus ingredientes para generarlas, suelen situarse en latitudes más altas. Las tres que nos han afectado eran borrascas intensas de baja latitud.

[3]

## 4. DESARROLLO DEL TRABAJO

### 4.1 Corriente Atlántica

A pesar de que para la gran mayoría pasan del todo desapercibidas, las corrientes tienen una importantísima influencia en dos hechos tan importantes como la climatología mundial y las características biológicas de las zonas marítimas próximas; debido a la regulación de la temperatura del agua y al aporte de nutrientes que suponen.

Las corrientes oceánicas trasladan grandes cantidades de calor desde las zonas ecuatoriales hasta las polares; estas unidas a las corrientes atmosféricas son las responsables de que las diferencias térmicas en la Tierra no sean tan fuertes como las que se darían en un planeta sin atmósfera ni hidrosfera. Éstas dan en su totalidad una imagen muy complicada que incluso cartográficamente sólo se puede reproducir por aproximación. [6]

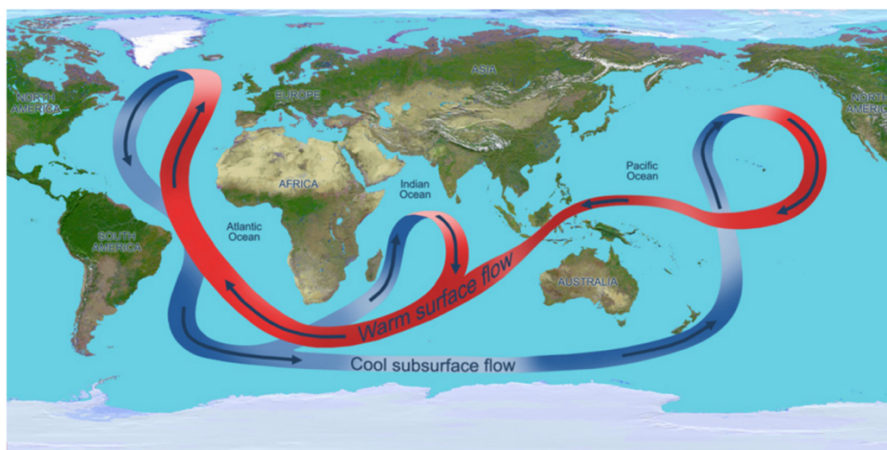


Figura 4. Mapa corrientes oceánicas

Hay dos tipos de corrientes en el océano: las corrientes superficiales, que constituyen el 10% del agua del océano y se encuentran desde los 400 m hacia arriba y las corrientes de agua profunda o la circulación termohalina que afectan el otro 90% del océano. [7]

Las corrientes oceánicas están influenciadas por fuerzas que inician el movimiento de las masas de agua, estas son: el calentamiento solar y los vientos. El balance entre otro tipo de fuerzas influye en la dirección del flujo de las corrientes, la fuerza de Coriolis (que es siempre hacia la derecha en el Hemisferio Norte) y la gravedad la cual se dirige hacia el gradiente de presión. [7]

Vista la importancia de las corrientes en el planeta, las que más determinadamente influyen en Europa son la corriente del Golfo y la AMOC (Circulación de Retorno Meridional del Atlántico), siendo esta primera el motor de la segunda. La circulación básica natural en el Atlántico de estas corrientes es la siguiente; el agua en el ecuador se calienta e impulsada por los alisios sube por la costa Este de Norte América transportando el calor hacia el polo Ártico y la costa europea, en ese momento, hace fundir el hielo que en profundidad baja verticalmente para enfriar el ecuador.

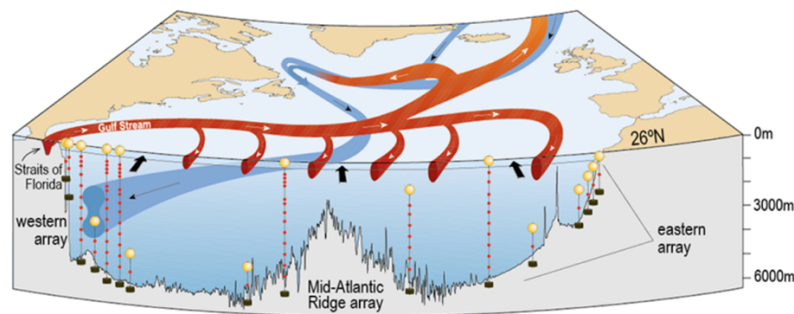


Figura 5. Sección océano Atlántico

Entonces, así como cita el científico Lars H. Smedsrud, debido al Aumento del transporte de calor del 30% por el cambio climático, la corriente del Golfo se está acelerando y la AMOC debilitando. Para tratar de desarrollar la noticia se van a exponer las causas de más gravedad, que son, el calentamiento del agua superficial y el deshielo.

#### 4.1.1 Aceleración del agua en superficie.

Un equipo internacional dirigido por investigadores del Instituto Scripps de Oceanografía de la Universidad de California San Diego utilizó simulaciones de modelos informáticos. Su estudio ha permitido saber que este calentamiento está alterando la mecánica de las circulaciones oceánicas superficiales, haciéndolas más rápidas y más delgadas. [8]

“Nos sorprendió ver que las corrientes superficiales se aceleran en más de las tres cuartas partes de los océanos del mundo cuando calentamos la superficie del océano”, Qihua Peng, autor principal del estudio. [8]

El estudio, publicado en la revista Science Advances, arroja luz sobre una fuerza subestimada

detrás de la velocidad de las corrientes oceánicas globales. Además, ayuda a resolver un debate sobre si las corrientes se están acelerando como resultado del calentamiento global. [8]

Descubrieron que el calentamiento hace que las capas superiores de agua se vuelven más ligeras. La mayor diferencia de densidad de esas capas superficiales cálidas del agua fría debajo limita las corrientes oceánicas rápidas a una capa más delgada, lo que hace que las corrientes superficiales se aceleren en más de las tres cuartas partes de los océanos del mundo. [8]

El viento ha sido el factor principal que los científicos han estudiado para describir y predecir la velocidad de las corrientes, pero el equipo de investigación utilizó un modelo oceánico global para simular lo que sucede cuando las temperaturas de la superficie del mar también aumentan. [8]

#### **4.1.2 Desaceleración del agua en profundidad.**

Según Meteored, durante el último siglo los científicos han observado que la AMOC ha ido disminuyendo su velocidad y que es la primera vez, en mil años, que la corriente tiene una velocidad tan débil. Esta disminución tan drástica de su velocidad apunta hacia un futuro colapso, propiciando graves consecuencias en nuestro clima y en la vida de la Tierra. [9]

Los últimos estudios señalan al cambio climático como el principal responsable de la debilitación de la AMOC. Una de las evidencias más claras a consecuencia del aumento de temperaturas globales es el deshielo. [9]

El aumento del hielo derretido está alterando la salinidad del Atlántico Norte, perjudicando la cinta transportada oceánica: un agua menos salada, es más liviana y menos propensa a hundirse, evitando así el desplazamiento de agua fría hacia el sur y frenando todo el sistema. [9]

También se asegura que un colapso en este sistema daría lugar a cambios abruptos y significativos en los patrones climáticos globales, incluidos un rápido aumento del nivel del

mar de hasta 50 cm, inviernos más extremos y alteraciones de los sistemas monzónicos en los trópicos. No obstante, en cuanto a temperaturas se refiere, el hemisferio norte sufriría un enfriamiento generalizado con un descenso de la temperatura media en Europa de varios grados. Con ello, habría fuertes disminuciones de la vegetación y la productividad de los cultivos en Europa en respuesta al enfriamiento. [9]

#### **4.1.3 Desestabilización de el sistema.**

El físico atmosférico de la Universidad Complutense de Madrid, Juan Jesús González Alemán, también prevé la posibilidad de un invierno helado permanente y avisa; “Una vez ocurra el colapso de la corriente AMOC, el movimiento de aguas cálidas tropicales a la zona del Atlántico norte cesará, con lo que se convertirán en aguas más frías e influirán de manera determinante en el clima de la región”, también señala que “Esto tendrá unos impactos catastróficos para Europa y todo el mundo cambiando radicalmente el clima”. [10]

Lo que sucede, como advierte González Alemán, es que, aunque parezca que estos efectos son contrarios al cambio climático y de alguna manera podrían equilibrarlo, es muy posible que no sea así. [10]

“Habrá sitios donde pueda marcar un equilibrio entre ambos fenómenos, en otros donde reduzca los efectos del cambio climático y en otros donde lo refuerce”, insiste el investigador, que remarca que lo único que produce este colapso es que el escenario futuro sea “mucho más complejo”. “No sabemos todos los efectos que puede tener, y probablemente genere eventos impredecibles”, sentencia. [10]

Son nueve los puntos de inflexión climáticos que se han incluido en la lista elaborada por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), por estar afectados de manera grave o por estar en grave riesgo de desaparición. [10]

Estos nueve elementos son el hielo marino del Ártico, la capa de hielo de Groenlandia, los bosques boreales, el permafrost, el sistema de corrientes del océano Atlántico, la selva del Amazonas, los corales de aguas cálidas, las capas de hielo del océano antártico occidental y la Antártida oriental. Todos estos puntos de inflexión están interconectados y, por tanto, lo que afecte a uno tiene repercusiones en otro. [10]



#### 4.1.4 Cold Bob.

La aparición de el Cold Bob verifica también la teoría de que la corriente AMOC se está parando. A medida que las temperaturas globales continúan aumentando, ha surgido un mar obstinadamente frío en el Atlántico Norte que ha desconcertado a los científicos durante años. Este es el «agujero» que se calienta en el Atlántico Norte, también conocido como Cold Blob. Durante el siglo pasado, las temperaturas globales aumentaron en un promedio de 1 °C, mientras que el agujero cálido al sur de Groenlandia se enfrió 0,9 °C. [6]

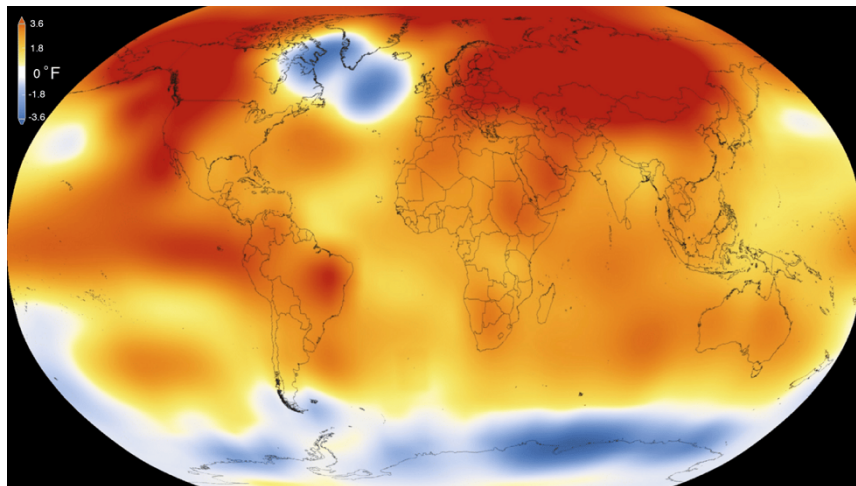


Figura 6. Mapa temperatura 1901-2012

Este agujero de calentamiento es particularmente claro en el informe de evaluación reciente del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático como una mancha azul en el mapa, que muestra el aumento observado en la temperatura superficial promedio global desde 1901 hasta 2012. [6]

AMOC es parte de una red más grande de modelos de circulación oceánica global que mueven el calor alrededor del mundo. Es impulsado por el enfriamiento y hundimiento de la salmuera en las altas latitudes del Atlántico Norte. [6]

El estudio muestra que el AMOC se ha debilitado desde mediados del siglo XX (y posiblemente más) como resultado de la entrada de agua dulce en el Atlántico Norte por el derretimiento de la capa de hielo de Groenlandia y el aumento de la temperatura del mar y

las precipitaciones en la zona. [6]

Esta agua dulce adicional reduce el hundimiento del agua de mar refrescante, lo que a su vez reduce la cantidad de agua caliente que se extrae de los trópicos, lo que debilita la circulación. [6]

El agua menos cálida de los trópicos tiene un efecto de enfriamiento en el Atlántico Norte, compensando el calentamiento general del océano por el aumento de las temperaturas globales. Como resultado, el agujero cálido es principalmente atribuible a la desaceleración de la AMOC. Sin embargo, el estudio muestra que este es solo uno de los muchos factores que contribuyen al enfriamiento del océano y la atmósfera. [6]

#### 4.2 Amplificación Cuasi-resonante

En función del recorrido, la dimensión o la fuerza de las masa de aire en movimiento podemos clasificarlas en tres tipos principales de viento, los vientos constantes o planetarios, los regionales y los locales.

Este estudio se centrará en los primeros, los planetarios, que son aquellos que tienen grandes recorridos sobre el planeta (cientos o miles de kilómetros), y son los responsables de transportar una gran cantidad de energía térmica. Los principales grupos de vientos globales son los Alisios del noreste (Hemisferio Norte), los vientos Alisios del sureste (Hemisferio Sur), los vientos del Oeste (en ambos hemisferios), y los vientos circumpolares (que son los que se producen entre las latitudes de los círculos polares y su polo correspondiente).

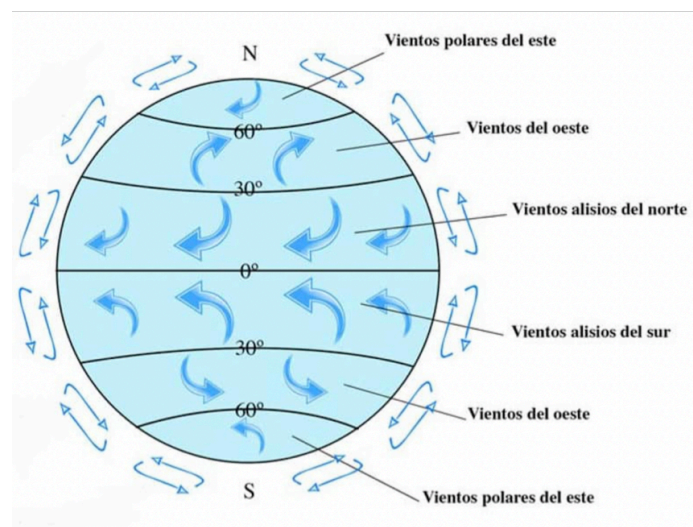


Figura 7. Mapa sentido de los vientos globales

Generalmente, la dirección de las grandes corrientes marinas coincide con la dirección de los vientos planetarios. Sin embargo, esta coincidencia no quiere decir que las corrientes marinas provoquen los vientos globales, o viceversa. Tras muchos estudios realizados, se ha llegado a la conclusión de que esto se debe principalmente al movimiento de rotación terrestre, que afecta de forma más o menos similar a los movimientos de las masas de aire y las masas de agua.

Es importante tener en cuenta también que el movimiento del aire en la troposfera se produce siempre en dos planos: el movimiento horizontal (viento en la superficie), y el movimiento «vertical» en las capas más altas de la atmósfera (viento en las capas altas de la atmósfera).

La energía que irradia el Sol, hace que el aire y el agua se calienten, pero este calentamiento es desigual según la zona del globo y otros muchos factores. Estos vientos globales se forman cuando dos masas de aire tienen distinta temperatura, por lo que estas se moverán intentando igualar esa diferencia (intercambiando energía térmica). El hecho de que La Tierra no es una esfera perfecta sino que esta abombada en la zona ecuatorial está producido en parte por la fuerza centrífuga del movimiento de rotación, lo que produce diferentes densidades en la zona ecuatorial, tanto en el agua, como en el continente y el aire. Esta diferencia de densidad se hace más notable en la atmósfera que en los océanos o el continente. Por este motivo, en las zonas ecuatoriales, el espesor de la atmósfera es mayor llegando a alcanzar los 20km de altura, mientras que en las zonas polares la atmósfera es mucho más delgada.

Pues bien, esta diferencia de densidad tan brusca en el Ecuador es lo que produce no solo el movimiento horizontal del viento (viento superficial), sino también el movimiento vertical (viento en altura). En el paralelo 0 encontramos la zona de convergencia intertropical (ZCIT en español y ITCZ en inglés), donde los Alisios del noreste y los Alisios del sureste convergen a nivel superficial, para posteriormente volver a sus correspondientes hemisferios. Cuando estos vientos convergen en el Ecuador se ven obligados a ascender debido a la diferencia de densidad que hemos comentado. Las corrientes de aire más caliente y húmedo (debido a la condensación) tienen a ascender y girar hacia su hemisferio correspondiente

(debido al efecto Coriolis), mientras que el aire frío y seco tenderá descender y ocupar ese hueco causado por la ascensión del aire caliente. Esto genera un flujo continuo que completa el ciclo de circulación de los vientos planetarios.

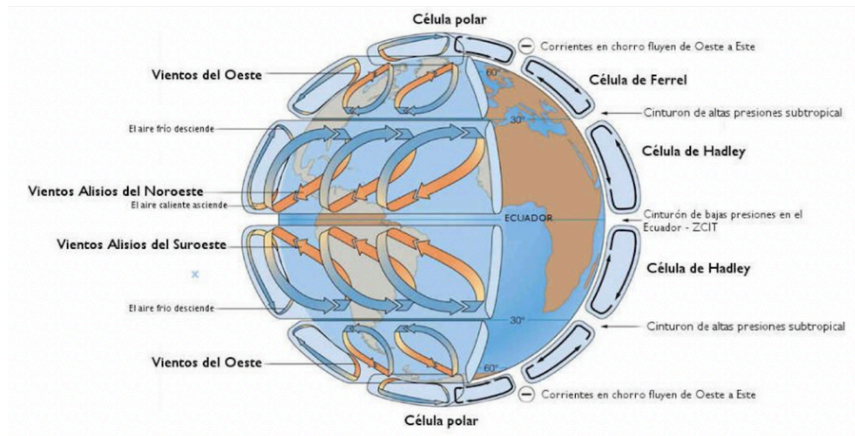


Figura 8. Corrientes verticales en las Células globales

Este movimiento vertical del aire es el que genera lo que se conoce como corrientes en chorro. Esto son corrientes rápidas de aire que ocurren en la zona más alta de la troposfera (alrededor de 10km de altura), y que se dan con más intensidad en las células polares. Existen 4 de estas corrientes circulando en el planeta (dos en cada hemisferio) circulando con velocidades de entre 250 y 350km/h.

#### 4.2.1 Corrientes en chorro

Se trata de flujos de aire que van circulando en altura a gran velocidad y alrededor del planeta, de oeste a este, aprovechando las discontinuidades que existen entre las células convectivas.

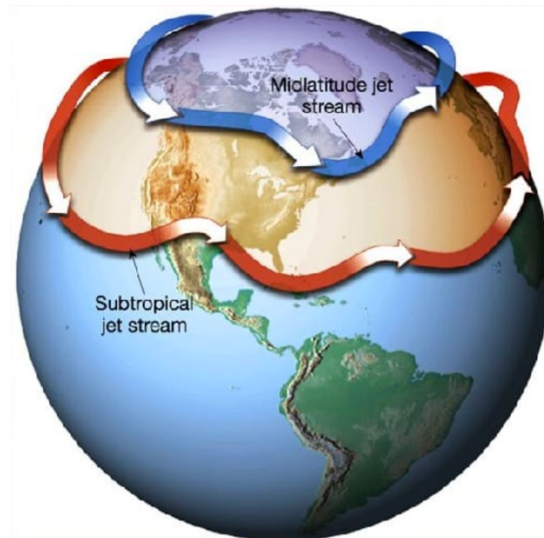


Figura 9. Corrientes en Chorro

Estas corrientes se encuentran casi llegando al límite de la troposfera, a unos 10 kilómetros de altura en latitudes medias, donde pueden alcanzar velocidades extraordinarias de unos 250 km/h, incluso llegándose a encontrar vientos de hasta 350 km/h.

Los chorros tienen una anchura típica de unos 200 kilómetros y un espesor que oscila entre los 5.000 y los 7.000 metros, aunque los vientos máximos sólo se alcanzan en su parte central, lo que se conoce como el núcleo del chorro. El chorro que afecta a la península ibérica es el polar.

El chorro polar se forma justo en las zonas donde convergen las masas de aire cálido que proceden del Ecuador con las corrientes frías provenientes del polo Norte. Estas corrientes van rodeando la Tierra y oscilando formando ondas de aspecto similar a los meandros de un río. [14]

Dependiendo de la época del año en la que nos encontremos, el chorro no está siempre en la misma latitud, sino que se produce un balanceo estacional. Durante los meses de verano y primavera se sitúa a unos 50° latitud Norte y en invierno se encuentra a unos 35-40° latitud N. En invierno la potencia del chorro es mucho mayor que en verano y alcanza velocidades más extremas. Durante los meses de verano la masa de aire cálido tropical es más potente, por lo que desplaza a la corriente en chorro más al norte. Por otro lado, en invierno, las

masas de aire polar están más fortalecidas, por lo que son capaces de expandirse más a latitudes más bajas.

El Chorro Polar se corresponde en superficie con el Frente Polar y sus ondulaciones, llamadas ondas de Rossby, dan lugar a altas presiones a la derecha de la corriente y bajas presiones a la izquierda, que en superficie se reflejan como anticiclones (los anticiclones subtropicales, como el anticiclón de las Azores, que tiene una enorme influencia en la Península Ibérica) y borrascas (las borrascas atlánticas del Frente Polar), respectivamente.

Por tanto, la trayectoria de la corriente determina la trayectoria de las borrascas atlánticas asociadas al Frente Polar. La trayectoria que tiene la corriente en chorro depende enteramente de su velocidad. Cuando la velocidad es mayor, la corriente de aire sigue una trayectoria desde oeste a este y va oscilando suavemente. Cuando tiene lugar este tipo de circulación se le llama zonal o paralela.

Por otro lado, cuando la velocidad de la corriente va disminuyendo, se van acentuando las ondas y se van generando profundas vaguadas hacia el sur y dorsales hacia el norte, que van originando en superficie zonas con bajas y altas presiones. Cuando tiene lugar este tipo de circulación se le denomina azonal o meridiana.

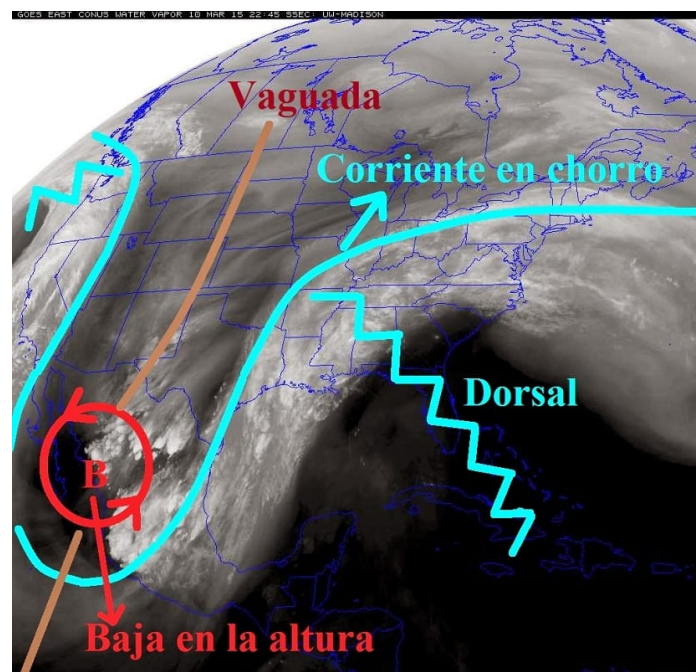


Figura 10. Vaguadas y dorsales de la corriente en chorro

Las vaguadas que se forman por la circulación más lenta de la corriente en chorro polar son penetraciones de aire frío hacia el sur de la trayectoria zonal de la corriente. Estas vaguadas tienen dinámica ciclónica por lo que se manifiestan en superficie como borrascas.

Las dorsales son todo lo contrario. Permiten la penetración de aire tropical hacia el norte, con naturaleza anticiclónica, y va dejando rastros de mayor temperaturas y buen tiempo. Cuando las vaguadas y las dorsales se van mezclando y alternando otorgan gran variabilidad al tiempo de las latitudes medias.

En ocasiones, estas masas de aire desplazadas de sus latitudes habituales pueden desprenderse del chorro principal, quedando aisladas del mismo. Si esa masa de aire desprendida del resto del chorro procede de una vaguada, se denomina depresión aislada en niveles altos o más conocida coloquialmente como gota fría.

#### **4.2.2 Fenómeno de la Amplificación Cuasi-resonante.**

Principalmente debe a que los patrones de corriente de chorro están altamente amplificados y estancados durante períodos inusualmente largos. Este hecho da lugar a un nuevo patrón, el cuasi estacionario y amplificado.

Debido a que el calentamiento global causado por los humanos, el Ártico se está calentando, al menos, dos veces más rápido que el resto del planeta, y básicamente debido a este calentamiento se está dando una menor diferencia de temperaturas entre el aire tropical y el aire polar resultando en una reducción de un 70% de la velocidad de la corriente en chorro.

Esta reducción de velocidad implica que se den más vaguadas y dorsales creando inestabilidad y sobretodo posibilidades de bajas en altura.

### **4.3 Ciclogénesis explosivas**

Para entender este concepto, primero tenemos que conocer lo que son los ciclones. Se trata de zonas de bajas presiones donde el viento gira en sentido contrario a las agujas del reloj en el hemisferio norte. Casi todas las borrascas o depresiones sufren de alguna forma una

ciclogénesis durante su formación y desarrollo. En sus estados iniciales se forman por una estructura de onda con los sistemas de frente tanto frío, como cálidos y ocluidos. El valor mínimo de presión atmosférica va bajando durante su primera parte del ciclo de vida.

Como su nombre indica es básicamente una ciclogénesis pero que sucede muy rápidamente y muy intensamente. Es decir, la depresión o ciclón en superficie puede formarse y profundizarse en un periodo muy corto de tiempo, convirtiéndose en una borrasca (caso de latitudes medias) muy violenta y adversa en cuestión de pocas horas. El término general usado para estas depresiones que se profundizan muy rápidamente, es de "bomba" meteorológica.

La definición de bomba, ciclón o borrasca explosiva es aquella borrasca cuyo mínimo de depresión la presión baja 24 mb en 24hrs, o menos. Esta definición suele establecerse o referirse a latitudes altas, alrededor de los 55°-60° ya que los procesos ciclogénéticos están influenciados por la rotación de la Tierra. Las ciclogénesis explosiva suceden con frecuencia en el Atlántico y Pacífico.

La manera en que se forma una ciclogénesis y genera una borrasca explosiva no es una respuesta fácil e inmediata. Si nos restringimos a latitudes medias y en términos generales, para que se produzca una "bomba" deben coexistir, de forma oportuna, sincronizada y a distancia, una borrasca o vaguada de presión "incipiente" en niveles bajos que interacciona positivamente con otra de niveles altos, digamos 300 mb y que suele estar lejos de la primera, para producir entre ambas una profundización o amplificación explosiva del sistema de depresión en niveles inferiores en un corto periodo de tiempo.

La baja precursora en niveles bajos, que se va a profundizar, suele desarrollarse normalmente, en una zona de gran contraste térmico entre aire frío y seco respecto a otros cálido y húmedo. El precursor de niveles altos, que suele disparar la profundización super-rápida de la baja en superficie, suele ser una baja, una vaguada o un máximo de viento muy intenso.

Muchas personas suelen confundir una ciclogénesis explosiva con un huracán o tifón. No tienen nada que ver. Las ciclogénesis solo se dan latitudes medias y no como los ciclones tropicales. Aunque tiene nombre perfecto para una película no es una tormenta perfecta como se suele decir. [12]



#### 4.3.1 Trenes de borrascas.

Al formarse la baja y desplazarse, puede dejar una estela de aire inestable y cambios en el patrón de flujo atmosférico. Esto puede conducir al desarrollo de una nueva área de baja presión en una ubicación cercana a la trayectoria de la borrasca original. A medida que esta segunda borrasca se fortalece, sigue el mismo proceso, desplazándose y dejando una estela que puede desencadenar la formación de una tercera borrasca, y así sucesivamente. Estas sucesivas formaciones de borrascas se conocen como un tren de borrascas. [12]

#### 4.3.2 Trenes de borrascas en Península ibérica.

Los trenes de borrascas que afectan a la península Ibérica vienen siempre de la mano de corrientes en chorro intensas, bajas de latitud (en el entorno de los  $45^{\circ}\text{N}$ ) y con un recorrido bastante zonal. Las borrascas que se forman al sur de Groenlandia, al este de Canadá y nordeste de los EEUU, en la zona donde confluyen el aire polar y el subtropical, se profundizan y son rápidamente arrastradas por los fuertes vientos de oeste (Westerlies) en dirección a la fachada atlántica de Europa, afectando de lleno a la Península. La mayor parte de las veces lo hacen en el noroeste, con especial incidencia en el litoral gallego, que recibe con toda su crudeza el impacto de los temporales causados por estas borrascas.

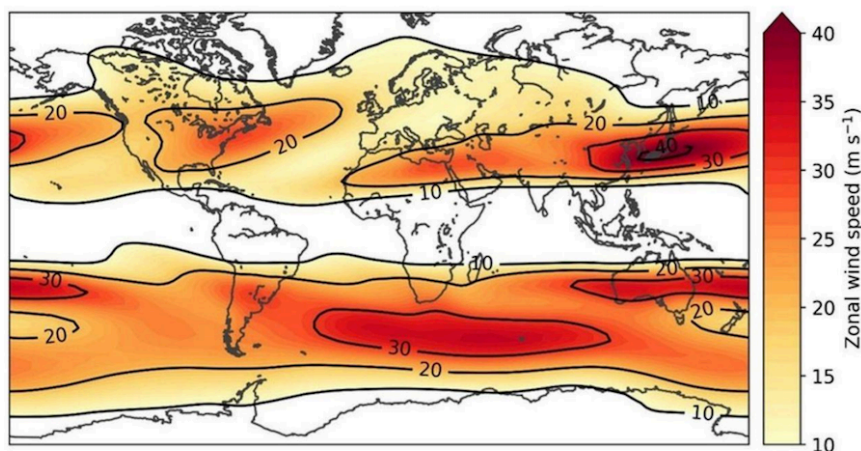


Figura 11. Vientos medios anuales de las corriente en chorro del oeste

Si el chorro polar se mantiene en una posición cuasiestacionaria y bastante zonal, apuntando hacia el norte peninsular, se producen los trenes de borrascas, no habiendo más de 2-3 días de diferencia desde la llegada de una hasta la siguiente. No todas son igual de profundas, ni afectan por igual al territorio ibérico. El noroeste y el extremo norte peninsular son las zonas en las que inciden la mayoría de las veces, pero a veces el tiempo borrascoso se extiende por la mayor parte de la Península, Baleares, e incluso alcanza a las islas Canarias.

A tenor de esos trenes de borrascas que nos manda a veces, podríamos pensar que el chorro polar que atraviesa el Atlántico Norte es particularmente intenso, pero hay otras zonas de la Tierra sometidas, habitualmente, a unos chorros más potentes. El mapa que acompaña estas líneas nos ilustra al respecto. La zona de salida del chorro polar del Pacífico Norte es la que, en promedio, alcanza vientos más fuertes, de hasta 40 m/s (~ 150 km/h). Allí, se superan los 300 y hasta 400 km/h con relativa frecuencia, cosa que no ocurre en el chorro que afecta a Europa occidental, salvo en contadas ocasiones. [4]

## 5. CONCLUSIONES

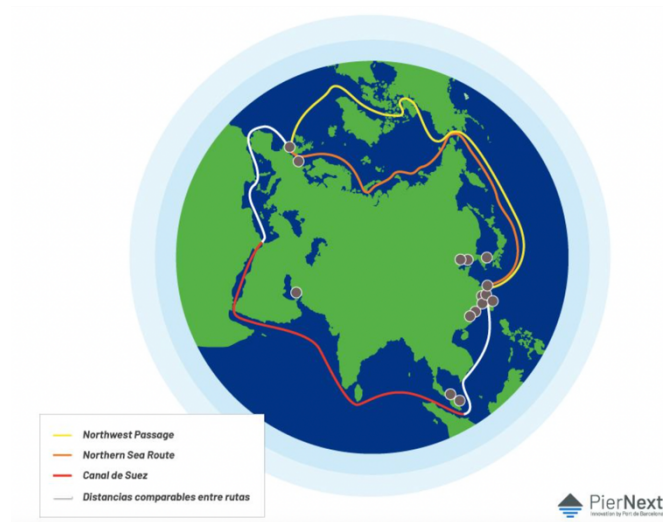
Según lo que se ha investigado anteriormente se puede decir que los efectos climáticos más relevantes son el incremento de la temperatura en todo el globo terráqueo y el deshielo que se genera debido a ese calentamiento.

Partiendo del calentamiento se ha concluido que las corrientes globales que regulan la temperatura de nuestros océanos y su equilibrio se está viendo alterada, las corrientes superficiales, en este caso se ha estudiado particularmente la del golfo de México, se están acelerando. El deshielo que se produce debido a esta alteración de la corriente ya se está viendo afectado según lo explicado anteriormente, el problema que se observa es que aún no son perceptibles los cambios en el medio ambiente que esto va a implicar. Hay muchas teorías expuestas por expertos en meteorología pero todas son suposiciones que sólo el tiempo dirá si eran correctas.

Un efecto que es notable y que ya está poniendo en marcha es la apertura del canal polar que va a unir el atlántico con el pacífico por el Ártico. Ya hay algunos buques que han realizado esta travesía con ayuda de rompehielos.

*“Personalmente estuve embarcado en un buque carga general finlandés, el cual se construyó en China y que navegó hasta Europa por la ruta de la costa de Rusia en 2018.”*

Se espera que para 2030 ya haya dos meses navegables en el año que permitan realizar esta ruta sin necesidad de asistencia de un rompehielos y para 2040 hasta 150 días. Se está hablando de aproximadamente un ahorro del 30% en materia de tiempo.



La OMI adoptó el Código Polar el 1 de enero de 2017, éste abarca toda la gama de cuestiones relacionadas con la navegación en las aguas que rodean a los dos polos: proyecto, construcción y equipo de buques; cuestiones operativas y de formación; búsqueda y salvamento; e, igualmente importante, la protección del singular entorno de las regiones polares y de sus ecosistemas.

El código requerirá que los buques que tienen la intención de operar en las aguas definidas de la Antártica y el Ártico soliciten un Certificado para buque polar, que clasificará el buque como buque de la categoría A (buque proyectado para operar en aguas polares en, como mínimo, hielo medio del primer año que puede incluir trozos de hielo viejo); Categoría B (buque no incluido en la categoría A, proyectado para operar en aguas polares en, como mínimo, hielo delgado del primer año que puede incluir trozos de hielo viejo); o en la categoría C (buque proyectado para operar en aguas libres o en condiciones del hielo menos rigurosas que las de las categorías A y B).

Aunque esta consecuencia sea favorable en la navegación lamentablemente no se tiene conocimiento de más factores beneficiosos. Lo que se ha podido comprender en este estudio es que lo que está en peligro es la estabilidad de los patrones generales globales que de alguna manera regulan las temperaturas, presiones y por lo tanto fenómenos atmosféricos como son las bajas presiones.

Debido a que la complejidad de un tema tan amplio como es la meteorología, existen muchas variables que son difíciles de manejar y explicar, esta conclusión va a considerar que una baja presión o la formación de la baja presión va a ser la precursora del mal tiempo que cualquier navegante quisiera evitar, entonces esa mar y ese viento que afectan en la navegación van a ser supuestos en los casos de las bajas presiones.

Entonces basándose en esa condición, ya hay indicios de que el cambio climático esta sucediendo viendo casos prácticos como es el de el tren de borrascas que ocurrió en Enero de 2023 en la costa Europea.

*“En ese momento me encontraba embarcado en el M/V Albiz, buque carga general de bandera española, y estábamos realizando la ruta de Belfast/Irlanda hasta MoiRana/Noruega. Estuvimos sometidos hasta el fondeadero de Lerwick/Shetland por los vientos de la borrasca Fien, en él estuvimos 2,5 días fondeados. Después proseguimos el viaje sin viento pero aún con mar de fondo*

*gruesa, llegamos a destino y para volver a salir tuvimos que fondear otra vez en Nesna/Noruega a esperar que las condiciones de mar y viento bajasen”*

Esas tormentas fueron catalogadas como borrascas incipientes sobrevoladas por vientos en altura intensos, curiosamente de chorro polar, se pone en duda si realmente fueron creadas por ciclogénesis explosiva porque el proceso de formación no fue tan rápido pero no se descarta que en algún momento no pasasen por un proceso de aceleración.

De esta manera se relaciona un poco lo que parece que en el futuro se va a acentuar, la amplificación cuasi resonante mezclada con borrascas normales que va a provocar una alteración de estas convirtiéndolas en más agresivas con mayores vientos y generando más olas. Que cada vez haya más vientos fuertes en altura que van a acelerar las borrascas ya creadas podría ser un escenario nada descartable y, de hecho, parece que ya se está produciendo en ocasiones.

## 6. REFERENCIAS

### Noticias

- [1] Europapress (2023). La corriente del golfo ha aumentado constantemente en el último siglo. <<https://www.europapress.es/ciencia/cambio-climatico/noticia-corriente-golfo-aumentado-constantemente-ultimo-siglo-20220124164618.html>> [Visitado el 27/01/23]
- [2] Revista Aficionado a la Meteorología (2019). Las olas de calor y el fenómeno de la Amplificación Cuasi Resonante. <<https://www.tiempo.com/ram/las-olas-de-calor-y-el-fenomeno-de-la-amplificacion-cuasi-resonante.html>> [Visitado 29/01/23]
- [3] Noticiero El Tiempo (2023). Tres borrascas en seis días: Gérard, Fien y Hannelore ¿Qué está pasando? <<https://www.tiempo.com/ram/tres-borrascas-seis-dias-gerard-fien-y-hannelore.html>> [Visitado 29/01/23]

### Revistas

- [6] Meteorología en red (2022). Cold Bob. <<https://www.meteorologiaenred.com/cold-blob.html>> [Visitado 28/12/2022]
- [12] Revista Aficionado a la Meteorología (2013). El concepto de ciclogénesis explosiva o “bomba meteorológica”. <<https://www.tiempo.com/ram/4070/el-concepto-de-ciclognesis-explosiva/>> [Visitado 15/05/2023]
- [13] Meteorología en red (2017). La corriente en chorro. <<https://www.meteorologiaenred.com/corriente-en-chorro.html>> [Visitado 21/05/2023]

### Artículos

- [4] José Miguel Viñas (2021). Trenes de borrascas con propulsión a chorro. <<https://www.divulgameteo.es/fotos/misarticulos/Trenes-borrascas-chorro.pdf>> [Visitado 03/06/2023]

- [7] Dra. Jenine T. Ramírez (2006) Corrientes Oceánicas. <<http://centros.edu.xunta.es/iesastelleiras/depart/bioxeo/lgazon/docs/bac2/ct/cor mar.htm>> [Visitado 27/01/2023]
- [8] Neus Palou (2022) El cambio climático está acelerando las corrientes oceánicas y esto puede suponer un efecto dominó preocupante. <<https://www.lavanguardia.com/natural/20230306/8804509/tiempo-espana-temperatura-marzo-verano.html>> [Visitado 27/01/2023]
- [9] Yurima Celdrán, Meteored (2021) Confirmado, la corriente que regula el clima europeo se debilita. <<https://www.tiempo.com/noticias/actualidad/corriente-oceanica-amoc-del-golfo-cambio-climatico.html>> [Visitado 17/02/2023]
- [10] Verónica Pavés (2021) El colapso de la Corriente Atlántica helará Europa <<https://verdeyazul.diarioinformacion.com/el-colapso-de-la-corriente-atlantica-helara-europa.html>> [Visitado 27/01/23]

#### Apuntes

- [11] Temario de Meteorología (2022). Vientos planetarios, circulación atmosférica y vientos alisios polares del este. <<https://nauticaformacion.es/vientos-planetarios-circulacion-atmosferica-vientos-alisios-del-oeste-polares/>> [Visitado 28/01/2023]

#### Entrevista

- [14] Jose Miguel Viñas, meteorólogo (2022). RTVE, la aventura del saber. <<https://www.rtve.es/play/videos/la-aventura-del-saber/aventura-del-saber-corrientes-chorro/6515035/>> [Visitado 03/04/2023]