

¿Cómo afectan bajo un contexto de cambio climático las características climáticas y oceanográficas del Atlántico Norte en la población de anguila Europea en España?

1. Introducción

La anguila europea (*Anguilla anguilla*) tiene un largo y complejo ciclo biológico que todavía no es suficientemente bien conocido. La especie se reproduce en el Mar de los Sargazos (aproximadamente, entre los 22 y los 30° Norte, y entre los 48 y los 65° Oeste) y, desde allí, las larvas son transportadas por corrientes oceánicas hacia la plataforma continental de la costa atlántica de Europa y de África del Norte, donde se transforman en angulas, una migración que puede llegar a durar más de 2 años. Desde aquí, la anguila migra aguas arriba, pasando en los ríos la mayor parte de su vida adulta hasta alcanzar la fase de anguila plateada, que es cuando alcanza la madurez y debe migrar de nuevo hacia el mar de los Sargazos para reproducirse y morir. Este complejo ciclo de vida, que incluye diversos ecosistemas y largas migraciones, provoca que las anguilas estén expuestas a diversas condiciones medioambientales que influyen decisivamente sobre su posible supervivencia.

A día de hoy, el volumen de capturas de la anguila europea ha sufrido un intenso declive que se refleja en todas las series históricas disponibles (como en Dekker, 2003). La figura 1 muestra el declive en capturas de anguila para Europa (expresado en índice de reclutamiento) tal y como aparece en el informe de 2015 del Consejo Internacional para la Exploración del Mar (ICES – International Council for the Exploration of the Sea, <http://www.ices.dk>).

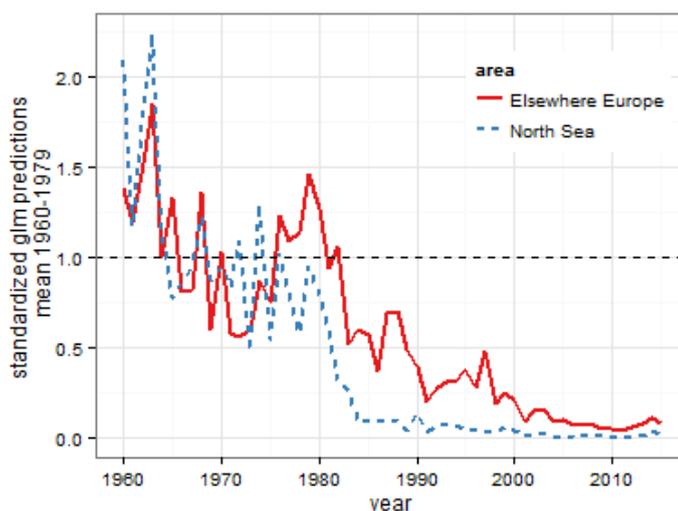


Figura 1. Media geométrica del índice de reclutamiento de la anguila (alevín de anguila) de Anguila Europea (*Anguilla anguilla*) en el continente europeo a partir de la segunda mitad del siglo XX, diferenciada entre Mar del Norte (línea discontinua) y resto de Europa (línea roja continua). (Fuente: ICES, 2015).

Ya en el informe del ICES de 1999 (ICES, 1999) se alertó sobre el declive de la especie desde finales de los años 70. El último de los informes producidos (ICES, 2015) muestra cómo esta delicada situación se mantiene hoy en día.

En el año 2006 los resultados recogidos en el dictamen científico del ICES en relación a la anguila europea pusieron de manifiesto el momento crítico por el que pasa esta especie (ICES, 2006). Con la idea de recuperar la especie, el ICES recomendó elaborar de manera urgente un plan de recuperación que englobara a toda la anguila europea y cuyas principales medidas pasan por reducir al máximo posible las actividades humanas que afectan a las poblaciones de anguilas (técnicas de pesca, construcción de presas y centrales hidroeléctricas,...). Como consecuencia de esta recomendación, la Unión Europea elaboró un reglamento (1100/2007 del Consejo Europeo, 18 de septiembre de 2007) por el que se establecieron medidas para la recuperación de la población de anguila europea mediante la ejecución, por parte de los Estados Miembros, de un Plan de Recuperación. De ahí la creación de un Plan de Gestión de la Anguila Europea en España (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010). Además, la anguila ha sido catalogada como “en peligro crítico” dentro de la lista roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN – International Union for the Conservation of Nature and Natural Resources, <http://www.iucn.org/es/>) y como “vulnerable” en el Libro Rojo de los Vertebrados de España (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente). Además la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES – Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora, <https://www.cites.org/>) la ha incluido en su Apéndice II sobre especies que no están necesariamente amenazadas de extinción pero que podrían llegar a estarlo a menos que se controle estrictamente su comercio.

Las conclusiones del grupo de trabajo de anguila del año 2015 (ICES, 2015) son que el reclutamiento ha bajado en el año 2015, comparado con 2014, de un 3.7 % del nivel histórico a un 1.2 % en el área del Mar del Norte y de un 12.2 % a un 8.4 % en el resto de Europa. Por tanto, el consejo es que si se aplica el principio de precaución a la anguila europea, toda la mortalidad antropogénica (pesca comercial y recreativa, centrales hidroeléctricas, estaciones de bombeo y polución) que afecte a la producción y escape de anguila plateada debe ser reducida, o se debe mantener lo más próxima a cero posible.

Las causas del declive en la población de anguilas son numerosas aunque no se ha podido establecer con exactitud el impacto de cada una de ellas sobre la población. Entre las principales causas se citan el incremento de obstáculos a su migración (presas), la pesca, la contaminación, diferentes infecciones virales y los parásitos exóticos. Sin embargo, el hecho de que la población de anguila norteamericana (*Anguilla rostrata*), una especie que comparte zona de reproducción (el Mar de los Sargazos), igualmente esté presentando un fuerte descenso en los últimos años, también apunta a la existencia de un factor común medioambiental relacionado con causas oceánicas que provocan tal declive (Castonguay et al. 1994).

Así, son numerosos los estudios (Knights, 2003; Dekker, 2004a; Friedland et al., 2007; Kettle et al., 2008; Bonhommeau et al., 2008a; Bonhommeau et al., 2008b) que relacionan el reclutamiento de anguila, es decir, el número de angulas que llegan a nuestras costas, con diferentes factores oceánicos y atmosféricos. La mayoría de dichos

estudios han identificado el índice de los meses de invierno de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO – North Atlantic Oscillation) como el factor oceanográfico que ejerce la mayor influencia sobre el reclutamiento. Dicho índice cuantifica las alteraciones en la presión atmosférica entre el Atlántico subtropical (las islas Azores) y el Ártico (Islandia), y es por tanto un indicador de las variaciones de la Corriente del Golfo. Dado que las larvas de anguila utilizan dicha corriente en sus migraciones, las variaciones en la misma determinan que las larvas pueden seguir su ruta con éxito.

Existen otros indicadores oceánicos cuya relación con la población de anguilas también ha sido estudiada. Por ejemplo, el estudio de la temperatura del mar en superficie en el Mar de los Sargazos muestra cómo el reclutamiento se incrementa en las aguas frías del Atlántico Norte pero disminuye en aguas más cálidas (Bonhommeau et al., 2008b; Friedland et al., 2007). Esa posible influencia de la temperatura de la superficie del mar sobre diferentes especies marinas (y no sólo la anguila) ha sido también estudiada a partir de la Oscilación Multidecadal del Atlántico Norte (AMO – Atlantic Multidecadal Oscillation), un índice que estima la variabilidad de la temperatura de la superficie del mar en el Atlántico Norte y que muestra cómo esta variabilidad presenta una gran relación con el clima de diferentes áreas del mundo y con todo el ecosistema determinado por el Atlántico Norte (Nye et al., 2014).

Aunque existen algunos estudios sobre la influencia de las condiciones medioambientales locales y oceánicas sobre la población española de anguilas (Lara, 1994; Arribas et al., 2012), todavía es necesario profundizar sobre la relación entre las poblaciones españolas de anguilas y los diferentes índices oceánicos y meteorológicos existentes, para contribuir a la identificación de factores climáticos que influyen el estado de la población de anguila.

2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es estudiar las relaciones entre las características climáticas y oceánicas y el volumen de capturas de anguilas en las últimas décadas y establecer una serie de relaciones entre ambas que permitan evaluar el impacto del cambio climático en la población de angulas.

- ◆ Nuestro primer resultado ha consistido en identificar cuáles son las relaciones existentes entre el volumen de capturas de angulas (indicador del reclutamiento) en las regiones españolas estudiadas, y los diferentes índices oceánicos y climáticos a estudiar (índices de la NAO y la AMO y diferentes variables oceánicas). Así, nuestro objetivo ha consistido en obtener tanto un conjunto de relaciones entre tales índices oceánicos como un conjunto de valores asociados de confianza que permitan determinar qué relaciones son relevantes de entre las estudiadas y cuáles no.
- ◆ En segundo lugar se ha intentado identificar cuáles son las relaciones existentes entre el volumen de capturas en estuario de las regiones españolas estudiadas y las variables meteorológicas locales consideradas de interés (precipitación y temperatura). Así como identificar cuáles son las relaciones existentes entre la abundancia de anguilas en el río (mediante muestreo por pesca eléctrica) y las variables meteorológicas locales consideradas de interés (temperatura y

precipitación). Esta identificación se llevará a cabo en el área de estudio concreta que dispone de datos útiles de pesca eléctrica (País Vasco). Así, se han obtenido un conjunto de relaciones entre tales variables locales y un conjunto de valores asociados que permiten determinar qué relaciones son relevantes y cuáles no (cuáles son estadísticamente significativas).

Una vez identificadas estas relaciones relevantes, se ha procedido a ajustar un modelo de nicho ecológico para las poblaciones de anguilas estudiadas, con el objetivo de aplicar posteriormente ese modelo ajustado a las condiciones climáticas locales y a los índices oceánicos proyectados para el futuro.

- ◆ Por último, se aplican las relaciones obtenidas en los apartados anteriores a escenarios de clima futuro generados para las zonas de estudio y se evalúa el impacto del cambio climático en el reclutamiento de angulas.

3. Datos y áreas de estudio

3.1. Información histórica de volumen de capturas en diferentes zonas costeras españolas

AZTI-Tecnalia, representante española del grupo de trabajo de anguila del ICES, ha venido recopilando durante los últimos años los datos de capturas que han facilitado las diferentes Comunidades Autónomas españolas, y gracias a ello se dispone de una base de datos de volúmenes de captura en diferentes regiones españolas lo suficientemente completa y con la suficiente extensión temporal como para permitir su uso en la búsqueda de posibles relaciones con diferentes índices.

En concreto se han recopilado datos para cuatro zonas diferentes de captura (figura 2): la Albufera de Valencia, el delta del Ebro, la desembocadura del río Miño (datos de capturas exclusivamente españolas) y la desembocadura del río Nalón. Se ha considerado oportuno agrupar los datos de la zona atlántica (que se correspondería con las zonas de captura del Nalón y el Miño) y la zona mediterránea (las zonas de captura de la Albufera de Valencia y el delta del Ebro), ya que cada una de esas áreas posee unas características específicas que pueden influenciar el reclutamiento. De esta manera, se han podido extraer conclusiones relativas no sólo a las zonas concretas de captura sino también a ambas áreas principales.

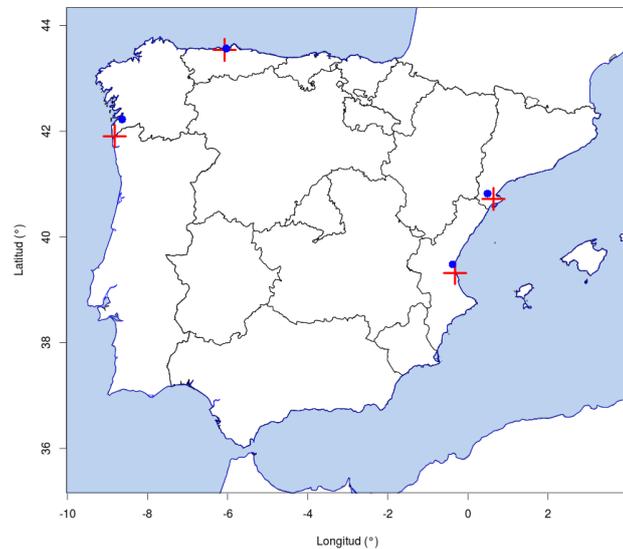


Figura 2. Localización de los puntos de captura para los que se disponen datos (cruces rojas) y observatorios meteorológicos de la Agencia Española de Meteorología más cercanos (puntos azules).

Tras analizar, cuidadosamente los datos, se observaron dos efectos a tener en cuenta: la heterogeneidad de las series (por ejemplo, la introducción de la pesca por embarcación en los años 80 que supone un repunte en el volumen de capturas) y descensos muy acentuados en ciertos periodos (por ejemplo, en los años 70) (figura 3.).

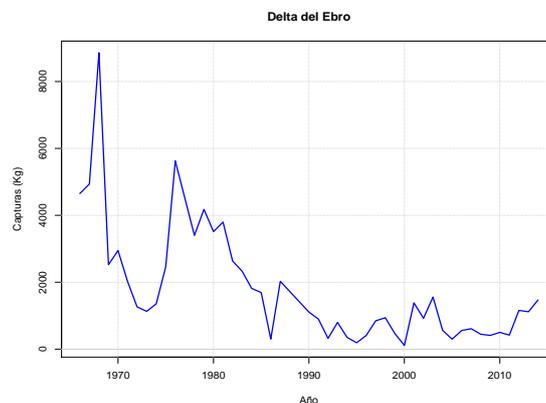


Figura 3. Serie temporal de capturas de anguila en el Delta del Ebro.

Con el fin de evitar los efectos perniciosos que los puntos anteriormente citados puedan ocasionar sobre cualquier relación que intentemos estudiar se ha realizado un tratamiento previo de los datos y se ha optado por trabajar con los residuos, es decir, sustrayendo la recta de regresión construida con los datos originales.

3.2. Información histórica de población en ríos mediante muestreo por pesca eléctrica

La Agencia Vasca del Agua (URA - Uraren Euskal Agentzia) ha venido recopilando desde 1.993 los datos de abundancia de anguila mediante muestreo por pesca eléctrica en los ríos del País Vasco, gracias a lo que se dispone de una base de datos lo suficientemente completa y con la suficiente extensión temporal como para permitir su uso en la búsqueda de posibles relaciones con las variables climáticas locales.

El conjunto de datos suministrados consta de 112 puntos de muestreo situados a lo largo de los principales ríos del País Vasco, y para cada uno de ellos se nos proporciona un dato anual de abundancia. La figura 4 muestra la situación de cada una de esas estaciones de medida y el número total de individuos contados a lo largo de todos los años suministrados para cada estación.

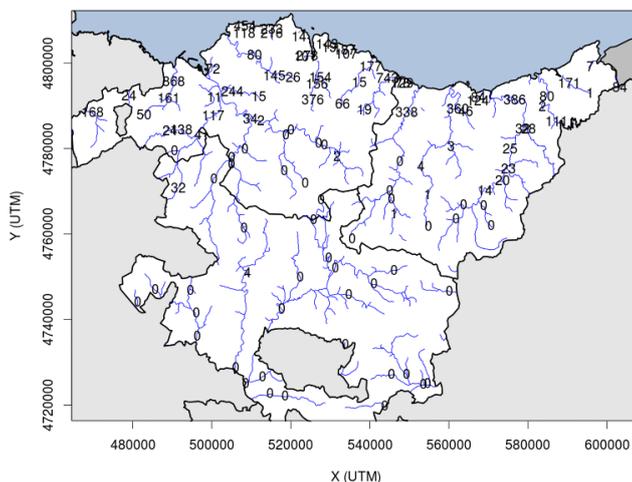


Figura 4. Distribución geográfica de las estaciones suministradas del País Vasco con datos de pesca eléctrica. En el emplazamiento de cada estación se muestra el total de capturas para todos los años suministrados para cada estación.

Como se puede apreciar en el mapa anterior, cuanto más lejos del mar, menos anguilas vamos a encontrar en los ríos del País Vasco (de hecho en Álava prácticamente no se encuentran). Esta situación se debe a que el gran número de presas construidas en los ríos impide que las anguilas apenas puedan ir más allá de las zonas fluviales situadas cerca de los estuarios. Si se descartan las estaciones con un total de capturas de 0 y aquellas con pocos valores (menos de 10) el grupo se reduce a 54 estaciones.

Dado que estas estaciones se van a utilizar para comparar las series de pesca eléctrica con series temporales climáticas (tanto para variables oceánicas como locales), debemos usar, entre ese sub-grupo de 54 estaciones, aquellas que tengan series temporales lo suficientemente largas como para que nos permitan establecer relaciones significativas. Por lo tanto, nos vamos a quedar con aquellas estaciones que tengan al menos 10 años de datos para así poder realizar comparativas coherentes. Así, el grupo final de estaciones que usaremos en este estudio pasará a ser de 11 estaciones.

3.3. Recopilación de información climática histórica

La información climática recopilada ha partido de dos grupos de fuentes de datos:

1. Variables meteorológicas que caracterizan el clima localmente a partir de los observatorios meteorológicos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMet) distribuidos a lo largo de España. Es necesario aplicar un detallado proceso de control de calidad a los datos meteorológicos a emplear, dado que errores en los datos podrían anular la utilidad de las simulaciones climáticas que se utilicen.
2. Variables meteorológicas que caracterizan el clima localmente a partir de los datos meteorológicos recopilados en las estaciones hidrológicas de aforo de las Diputaciones de Vizcaya y Guipúzcoa. Estos datos serán especialmente útiles para relacionarlos con los datos de muestreo de pesca eléctrica en los ríos del País Vasco.

3.4. Información histórica de índices climáticos y oceánicos

La información de índices climáticos y oceánicos recopilados proviene de diferentes fuentes de datos. Esta información incluye valores históricos de los índices oceánicos atlánticos a emplear. Tales valores históricos están disponibles con libre acceso a cualquier investigador, y provienen de fuentes científicas del máximo rigor.

Tal y como mencionamos antes, son numerosos los estudios que relacionan el volumen de capturas de anguilas (entendido como un indicador de su reclutamiento) con diferentes factores oceánicos y atmosféricos.

→ Índice de la NAO

El principal indicador con el que se ha relacionado el volumen de capturas es con el índice de los meses de invierno de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO – *North Atlantic Oscillation*), un índice que cuantifica las alteraciones en la presión atmosférica entre el Atlántico subtropical (las islas Azores) y el Ártico (Islandia). Por tanto un anticiclón de las Azores más extenso provoca más tormentas invernales y más fuertes cruzando el Atlántico en rutas más al norte, lo que empuja a la Corriente del Golfo (la corriente responsable del movimiento oceánico de las anguilas) a un emplazamiento más al norte del habitual. Es por tanto un indicador de las variaciones de la corriente del Golfo que tiene un importante efecto en la migración de las larvas de anguila y por tanto en su reclutamiento.

Dado que un índice como éste, que intenta cuantificar una posible situación que abarca todo el Atlántico Norte, puede ser calculado con diferentes aproximaciones (dada la enorme extensión que se intenta cuantificar en un único valor), hemos estudiado dos índices de la NAO diferentes:

1. El índice de Hurrell (Hurrell, 2015). Un índice que se obtiene calculando la diferencia de presión a nivel del mar entre los observatorios de Lisboa (Portugal) y Reykjavik (Islandia), con datos desde 1864. Los datos han sido normalizados

eliminando la media del periodo 1864-1983 y dividiéndolos por la desviación estándar de ese mismo periodo, consiguiendo así una serie de datos estacionaria.

2. El índice de Cropper (Cropper et al, 2015). Un índice que se obtiene calculando la diferencia de presión a nivel del mar entre los observatorios de Ponta Delgada (Islas Azores, Portugal) y Reykjavik (Islandia), con datos desde 1850. Los datos han sido normalizados eliminando la media del periodo 1901-2000 y dividiéndolos por la desviación estándar de ese mismo periodo, consiguiendo así una serie de datos estacionaria.

Ambos índices han sido estudiados tanto como índices anuales como índices invernales (el promedio de los valores mensuales obtenidos en el periodo Diciembre-Enero-Febrero-Marzo), ya que ambos posibles valores han sido ampliamente estudiados en la bibliografía existente como posibles factores que influyen sobre la población de anguilas. Así, compararemos nuestros datos disponibles de capturas con respecto a cuatro series diferentes (Hurrell y Cropper; anual e invernale) de posibles índices de la NAO.

Como ejemplo de las series podemos observar los valores del índice anual de la NAO según Cropper (figura 5 izquierda) y el índice invernale de la NAO según Hurrell (figura 5 derecha).

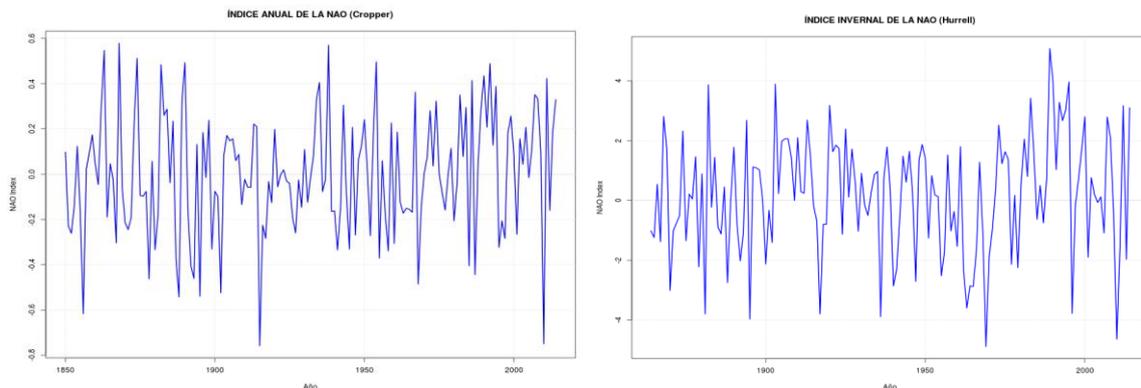


Figura 5. Izquierda: Índice anual de la NAO construido según los criterios de Cropper (diferencia de presión a nivel del mar entre los observatorios de Ponta Delgada (Islas Azores, Portugal) y Reykjavik (Islandia)). Derecha: . Índice invernale de la NAO construido según los criterios de Hurrell (diferencia de presión a nivel del mar entre los observatorios de Lisboa (Portugal) y Reykjavik (Islandia)).

➔ índice de la AMO

La Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO – *Atlantic Multidecadal Oscillation*) es un modo de variabilidad que ocurre en el Océano Atlántico Norte y que tiene su principal incidencia o caracterización en la variación de la temperatura de la superficie del mar del Atlántico Norte. Estos cambios de temperatura afectan al unísono el océano Atlántico entre Groenlandia y los trópicos. El índice AMO está correlacionado con la temperatura del aire y las precipitaciones sobre gran parte del Hemisferio Norte, en particular Norteamérica y Europa, así como del noreste de Brasil y África y con el clima del verano europeo. También se asocia con cambios en la frecuencia de las sequías de América del Norte y se refleja en la frecuencia de los grandes huracanes en el Atlántico.

El índice del AMO se define generalmente a partir de la variabilidad de la temperatura en la superficie del mar en el Atlántico Norte, una vez que se ha eliminado cualquier tendencia lineal. En nuestro caso hemos empleado el índice calculado por la National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) estadounidense. Su cálculo (Enfield *et al*, 2001) parte de la construcción de la serie de las anomalías de la temperatura de la superficie del Atlántico Norte (desde 0 hasta 70° N) desde el año 1856, serie a la que se le ha eliminado la tendencia para su uso. La figura 6 muestra los valores de este índice a partir del año 1.948.

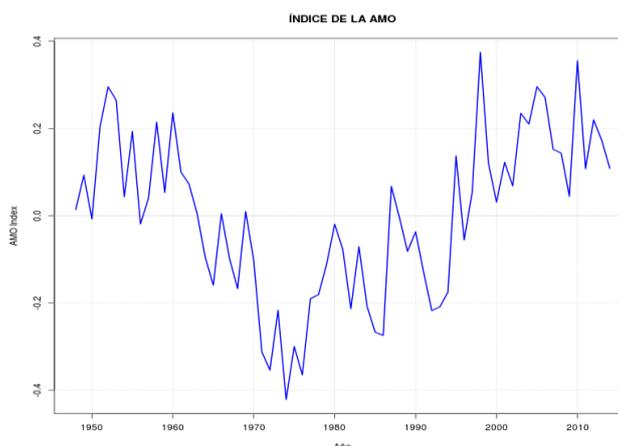


Figura 6. Índice anual de la AMO (fuente de los datos: NOAA).

➔ Campos oceánicos

Para cuantificar la influencia de los factores oceánicos del Atlántico Norte sobre la población de anguilas es necesario conocer tanto las condiciones oceánicas pasadas como las actuales. Esa fuente de información es un reanálisis oceánico. La salida de un reanálisis oceánico (los datos que finalmente están disponibles) consiste en una rejilla (un grid) cuya extensión coincide con la de los océanos y en la que están referidos, en cada punto, el conjunto de variables oceánicas estudiadas por el reanálisis concreto – la rejilla nos da las coordenadas de la variable medida en un periodo temporal concreto, con independencia de que en esa localización la variable pueda estar referida a diferentes profundidades oceánicas.

En nuestro caso, el reanálisis oceánico empleado ha sido el SODA (*Simple Ocean Data Assimilation* – <http://www.atmos.umd.edu/~ocean/>) (Carton *et al*, 2008). SODA es un reanálisis oceánico global de libre distribución cuyo resultado final es fruto del esfuerzo de la coordinación por parte de la Universidad de Maryland (USA) del trabajo de muchos grupos internacionales de investigación y de recogida de datos, como la Universidad de Texas (EE.UU), el European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF, Europa) y la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, EE.UU).

Las variables oceánicas que vamos a estudiar son:

1. Tensor superficial de presión (*Surface Downward Stress*, identificado como TAU y expresado como *taux* y *tauy*, o también *tauuo* y *tauvo*). Sobre la superficie del mar

influyen muchas fuerzas que determinan los desplazamientos del mar en capas superficiales, principalmente los vientos y la presión atmosférica. Este campo, expresado como presión (fuerza por unidad de área), agrupa todas estas fuerzas para indicar cuáles son las presiones finales ejecutadas sobre la superficie del mar. Dado que es un campo vectorial, para su estudio se descompone en dos componentes, la horizontal (x o u_0 , referida a la longitud) y la vertical (y o v_0 , referida a la latitud).

2. Temperatura oceánica. La temperatura oceánica a diferentes profundidades: para cada punto de rejilla se nos proporciona la temperatura del océano a diferentes profundidades, nosotros vamos a estudiar las temperaturas desde la capa superficial hasta (aproximadamente) 300 metros debajo de la superficie, lo que implica para el SODA un total de 18 posibles profundidades entre 0 y 300 metros.
3. Corrientes oceánicas. La velocidad de desplazamiento de las masas de agua en el océano. Dado que es un campo vectorial, para su estudio se descompone en dos componentes, la horizontal (u , referida a la longitud) y la vertical (v , referida a la latitud). La velocidad de desplazamiento se proporciona a diferentes profundidades, nosotros vamos a estudiar los posibles desplazamientos desde la capa superficial hasta (aproximadamente) 300 metros debajo de la superficie, lo que implica para el SODA un total de 18 posibles profundidades entre 0 y 300 metros.

Dada la escala espacial del ciclo de vida de la anguila europea, tanto oceánica (Atlántico Norte) como fluvial (ríos de Europa), la influencia de factores oceánicos de gran escala debe ser necesariamente determinante sobre su población. Así, en nuestro estudio sobre la influencia climática oceánica sobre la población de anguilas vamos a tener en cuenta que el área determinante para la reproducción de las anguilas y para el nacimiento de nuevas larvas es el Mar de los Sargazos: cualquier posible cambio sobre el Mar de los Sargazos que venga dado por circunstancias climáticas impactará significativamente sobre la población de anguilas ya que impactará directamente sobre su reproducción.

El problema a la hora de intentar estudiar el Mar de los Sargazos es que se trata de un área geográfica de límites imprecisos, ya que su extensión fluctúa según las corrientes dominantes que crean este espacio concreto: es un mar de aguas tranquilas no limitado por tierra alguna. La Corriente del Golfo al Oeste y Norte (en rigor, la Corriente del Atlántico Norte al norte, que no es sino la continuación de la Corriente del Golfo) y las corrientes que circulan hacia el oeste a lo largo del trópico de Cáncer, al sur, dan como un sistema de aguas superficiales relativamente cálidas que gira lentamente, en sentido horario y concéntrico (aunque el centro no tiene movimiento aparente y presenta una notable calma eólica), sobre las aguas profundas del océano, mucho más frías y densas. Esta estratificación del agua por densidades, provocada por la diferencia de temperatura, tiene importantes consecuencias ecológicas: en las aguas superficiales, donde llega la luz, abundan las algas (formando «bosques» marinos superficiales, los *sargazos*) y el plancton vegetal, que consume sales como los fosfatos y nitratos, pero debido a la diferencia de densidad, el agua de la superficie apenas se mezcla con el agua fría y rica en minerales de las capas inferiores, que podría reponer las sales consumidas.

Así, y dada la dificultad de definición de tal Mar, hemos considerado cuatro posibles áreas oceánicas que podríamos dar como determinantes del Mar de los Sargazos y, por tanto, del área oceánica que influye sobre la población de anguilas europeas (figura 7):

1. Región 1, denominada “Sargasso Alliance”. La Sargasso Sea Alliance (<http://www.sargassoseacommission.org/>) es una organización científica internacional centrada en el estudio y conservación del Mar de los Sargazos.
2. Región 2, denominada “Longitud”. Un área principalmente definida en el eje horizontal (abarca más longitud, de ahí su nombre) que busca recoger el área de influencia estudiada en Pacariz *et al* (2013) para la que se tienen datos históricos de capturas de larvas de *Anguilla anguilla* y que por tanto podría corresponder con su zona de primer desarrollo.
3. Región 3, denominada “Núcleo”. El núcleo de la región estudiada por la Sargasso Alliance, buscando encontrar posibles relaciones con la zona central del Mar de los Sargazos.
4. Región 4, denominada “Extensión”. Una zona en la que se busca abarcar la extensión principal del área de la Sargasso Alliance.

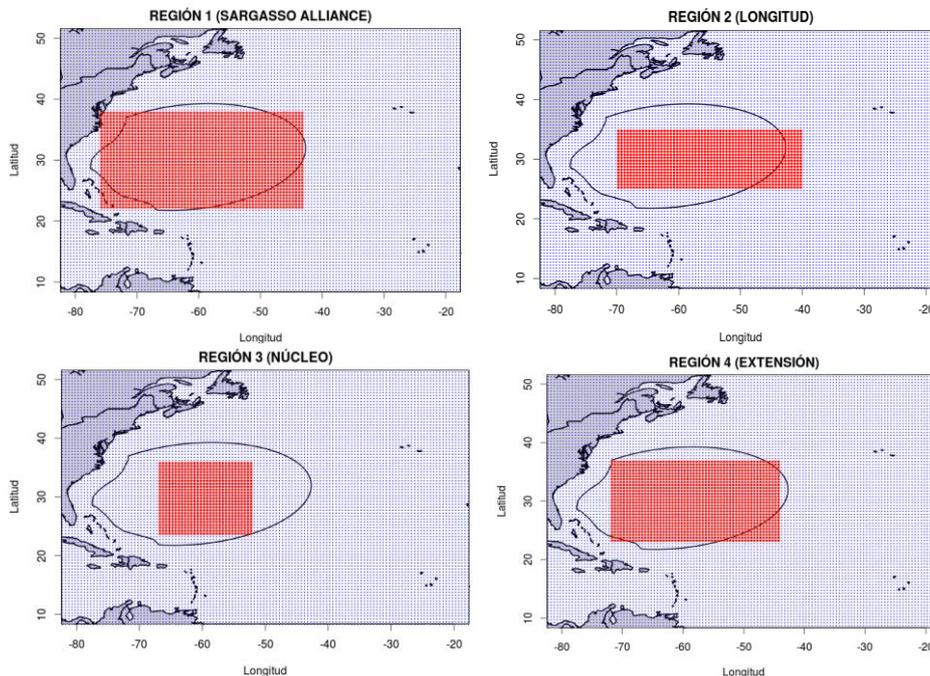


Figura 7. Definición geográfica (puntos rojos) de las región 1 a 4. Todos los puntos (rojos y azules) se corresponden con los de la rejilla del reanálisis SODA. La elipse truncada es el área de estudio de la Sargasso Sea Alliance.

Nuestro método de trabajo consistió en buscar posibles relaciones entre el reclutamiento utilizando el volumen de captura de anguilas como indicador del mismo y los datos oceánicos medidos en cada una de esas cuatro regiones, buscando encontrar

empíricamente cuál de esas posibles “definiciones” de Mar de los Sargazos muestra mayor relación con nuestros datos recopilados de captura de anguilas.

3.5. Datos atmosféricos: reanálisis y modelos climáticos

1. Reanálisis atmosférico

En nuestro caso, el reanálisis atmosférico utilizado ha sido el reanálisis Europeo ERA40 del ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) para el periodo 1958-2000. El reanálisis ERA40 proporciona "observaciones" de los predictores meteorológicos a emplear, y cubre con una rejilla de $1.125^{\circ} \times 1,125^{\circ}$ toda la superficie terrestre, con resolución seis-horaria (4 datos al día). No obstante, esa información de relativa alta resolución (espacial y temporal), debe relajarse a la de los Modelos Climáticos que se vayan a utilizar posteriormente (rejillas de 2 a 3° de resolución, y en general con un único dato al día. Esto es importante, ya que algunas metodologías de *downscaling*, y la de la Fundación para la Investigación del Clima entre ellas, mejoran su capacidad de regionalización cuanto mayor resolución espacial y temporal tenga la información de entrada (los predictores). Por ello, si no se relajase la resolución espacial y temporal del ERA40 a la de los Modelos Climáticos que se van a regionalizar, obtendríamos errores menores de lo que en realidad se debería considerar (y corregir).

2. Modelos climáticos

La principal herramienta para la prospección del clima futuro son los denominados Modelos de Predicción Numérica del Clima (MPNCs) o como se les conoce comúnmente, Modelos de Circulación General (*MCG* o *GCM* por sus siglas en inglés). Estos modelos climáticos simulan flujos de energía, masa y cantidad de movimiento, mediante las ecuaciones primitivas de la dinámica, entre los puntos de una retícula tridimensional que se extiende por la Atmósfera y Océanos y las capas superiores de la Litosfera y la Criósfera. Mediante la integración temporal de estos flujos se obtienen evoluciones simuladas de los estados atmosféricos.

Los modelos climáticos más recientes, aquellos que deben usarse para poder asegurar que las simulaciones de clima futuro sean lo más exactas posible, son los asociados al CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*), la iniciativa de trabajo con modelos climáticos vinculada al quinto informe del IPCC (*AR5* ó *5th Assessment Report*). Ente este conjunto de modelos climáticos, todos ellos AOGCM de última generación, destacan los denominados *Earth System Model* (ESM), un tipo de modelo climático que acoplan (además de la interacción atmósfera/océano) el ciclo del carbono dentro del sistema climático: entre otros factores, se tiene en cuenta la bioquímica atmosférica, la oceánica, el comportamiento de los sumideros de carbono de la biosfera terrestre, y el uso del terreno (y sus posibles cambios) con lo que el ciclo del carbono en el “sistema terrestre” se consigue integrar dentro del propio modelo.

En este proyecto vamos a emplear tres modelos climáticos diferentes, los tres del tipo ESM, que aparecen recogidos en la tabla 1.

Modelo	Resolución	Resolución	Salidas	Centro de Investigación
--------	------------	------------	---------	-------------------------

Climático	espacial	Temporal	Disponibles	
GFDL-ESM2M	2°x2,5°	diaria	Historical RCP2.6 RCP4.5 RCP8.5 RCP6.0	National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) , E.E.U.U.
CanESM2	2,8°x2,8°	diaria	Historical RCP2.6 RCP4.5 RCP8.5	Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis (CC-CMA), Canadá
CNRM-CM5	1,4°x1,4°	diaria	Historical RCP2.6 RCP4.5 RCP8.5	CNRM (Centre National de Recherches Meteorologiques), Meteo-France, Francia

Tabla 1. Modelos climáticos empleados en este proyecto y sus características principales

4. Identificación de las diferentes relaciones climáticas-reclutamiento de angula

En este apartado se resumen los resultados de los estudios realizados para establecer las relaciones entre 1) el reclutamiento de la angula y los índices climáticos y variables oceánicas; 2) entre el reclutamiento de angula y variables meteorológicas en zonas costeras españolas; 3) entre el reclutamiento de angula y variables meteorológicas en río y 4) el nicho ecológico.

4.1. Identificación de relaciones entre índices climáticos y oceánicos y el reclutamiento de angula en diferentes zonas costeras españolas

En este apartado se han establecido relaciones entre el volumen de capturas y el índice de la NAO, el índice de la AMO y las variables oceánicas (Tensión superficial de presión, temperatura oceánica y corrientes oceánicas), estas últimas para las cuatro regiones oceánicas definidas (Sargasso Alliance, Longitud, Núcleo y Extensión).

Una vez que se han recopilado todos los datos necesarios, se procedió a la identificación de las relaciones entre la población de angulas en diferentes zonas costeras españolas (en rigor, el volumen de capturas, ya que ésta es la variable o *proxy* que informa sobre el reclutamiento) y las diferentes variables climáticas oceánicas empleadas en este estudio. Todas las relaciones a establecer necesitan de la determinación de un margen de confianza de las mismas para así determinar cuáles tienen verdadera significancia y cuáles no y serán por lo tanto descartadas.

En nuestro caso, se buscó la posible correlación entre todos los índices y variables oceánicas estudiados con el reclutamiento, y a estimar el p-valor de tal correlación como medida de su significación. Nuestro límite para considerar un p-valor como significativo va a ser de 0.1. Antes de continuar, es importante recordar que un estudio basado en la correlación sólo será capaz de determinar relaciones *lineales* entre dos variables pero *no* será capaz de establecer dependencias *no-lineales*. Así, una correlación lineal indica una relación lineal entre los factores, pero la ausencia de dicha correlación lineal no significa que no puedan existir relaciones no-lineales entre ellos. De hecho, un modelo basado en relaciones no-lineales (como el modelo de nicho ecológico usado en este mismo

proyecto) puede encontrar nuevas relaciones entre las variables, relaciones no identificadas mediante el uso de correlaciones lineales.

- Relaciones con el índice de la NAO

El análisis de correlación entre las capturas de angula (indicadoras del reclutamiento) y el índice NAO muestra los siguientes resultados:

1. No existe ninguna correlación significativa entre el reclutamiento y el Índice de la NAO de Cropper, pero sí con el de Hurrell. Por tanto, en los estudios posteriores se empleará solamente el índice de Hurrell.
2. El reclutamiento se ha relacionado en todos los casos con el índice invernal de la NAO (sólo lo ha hecho en una ocasión con el anual, pero el invernal asociado a ese anual es aún más significativo, lo que indica que el anual es significativo por la gran predominancia del periodo invernal), lo que concuerda con la bibliografía especializada (entre otros, Kettle *et al*, 2008; Arribas *et al*, 2012; Bonhommeau *et al.*, 2008a) que recoge estudios anteriores al nuestro.
3. En cuanto al periodo de tiempo, el reclutamiento muestra mayoritariamente correlaciones significativas con los índices de la NAO de hace 1 o 2 años y sólo en una ocasión lo hace con los del mismo año (para la zona del Miño, zona atlántica oriental norte de la península, muy expuesta a la presencia o ausencia de borrascas), lo que concuerda con la bibliografía especializada (entre otros, Kettle *et al*, 2008). Es decir, el comportamiento oceánico de hace uno o dos años está significativamente relacionado con el reclutamiento. Esto se debe probablemente a que se calcula que, desde su nacimiento, las angulas tardan entre 2 y 3 años en llegar a las costas europeas, por tanto ese periodo entraría dentro del periodo en el que están atravesando el océano.
4. Todas las correlaciones encontradas, tanto las significativas como las que no lo son, son siempre negativas (correlación inversa) (lo que concuerda con Bonhommeau *et al*, 2008b; Durif *et al*, 2011; y Arribas *et al*, 2012, entre otros). Por tanto, cuanto menor sea el índice invernal de la NAO el reclutamiento esperado será mayor. Desde un punto de vista meteorológico, un índice de la NAO negativo indica que las borrascas circulan más al sur del Atlántico Norte (más cerca del oeste de la Península Ibérica) y que el anticiclón de las Azores es más débil (dejando así que las borrascas tengan mayor recorrido). Según la tesis de Knights (2003), los efectos negativos sobre la población de anguilas vendrían determinados por su efecto negativo directo sobre el fitoplancton existente en el Mar de los Sargazos.

- Relaciones con el índice de la AMO

No se ha detectado ninguna correlación significativa (es decir, ningún p-valor es inferior a 0.1) entre las capturas de las distintas zonas y el índice anual de la AMO para ningún posible retraso anual. Nótese que esto no significa que el volumen de capturas y el índice anual de la AMO no estén relacionadas: sólo significa que no están relacionadas

linealmente. Un posible modelo que sea capaz de relacionar no-linealmente tales series de datos puede llegar a encontrar relaciones no-lineales significativas.

- Relaciones con las variables oceánicas

Se han obtenido un gran número de correlaciones (6.785) entre todos los factores seleccionados dado que existen 4 zonas de captura (Albufera de Valencia, Delta del Ebro, desembocadura del Miño y desembocadura del Nervión) y se han estudiado las relaciones de las capturas de angula con las condiciones oceánicas de 4 regiones atlánticas (Sargasso Alliance, Longitud, Núcleo y Extensión), cada una de las cuales contiene una rejilla en la que para cada uno de sus puntos hemos calculado tanto la media como la mediana de cada variable, además se han seleccionado 5 variables oceánicas (temperatura, componentes x e y del tensor superficial de presión y componentes x e y de las corrientes oceánicas), que en algunos casos presentan valores distintos según la profundidad del mar a la que estén referidas (tenemos 18 niveles de profundidad para la temperatura y las componentes x e y de las corrientes oceánicas que abarcan desde 0 hasta 300 metros). Junto con todo esto, para cada variable se han tenido en cuenta retrasos anuales de hasta 3 años (es decir, hemos probado a buscar correlaciones frente a las series de capturas para datos oceánicos del mismo año, de hace un año, de hace dos y de hace tres años: 4 posibles relaciones).

De entre las correlaciones analizadas, 739 de ellas eran significativas (es decir, casi un 11% de las relaciones encontradas son significativas, una cifra apreciable).

A partir de las conclusiones generales anteriores y después de un estudio pormenorizado de las relaciones entre las variables oceánicas empleadas y las zonas de captura, las conclusiones generales finales son éstas:

1. La región oceánica más determinante de las estudiadas es la denominada Longitud. La región Núcleo también resulta de interés, aunque las relaciones significativas encontradas para esta región son principalmente las que tienen un retraso de tres años.
2. Las componentes x (longitudinales) de los campos vectoriales son mucho más importantes (presentan más relaciones significativas) que las componentes y (latitudinales). Como ya hemos dicho, este es un resultado que parece tener sentido ya que la componente x de las corrientes es precisamente la principal responsable del traslado de las larvas de las anguilas desde el Mar de los Sargazos hasta Europa.

Las conclusiones finales concretas para cada una de las variables estudiadas son:

1. La componente x (longitudinal) del tensor superficial de presión está especialmente relacionada si tomamos la región Longitud y calculamos su valor mediante la media de la rejilla. Retrasos de 0 y 1 años se relacionan con el volumen de capturas en la zona de captura atlántica (Miño-Nalón), y de 1 y 2 años en la zona de captura mediterránea (Albufera-Ebro). Las correlaciones encontradas son positivas, es decir, indican mayor volumen de pesca a mayor componente longitudinal.
2. La componente y (latitudinal) del tensor superficial de presión presenta muy pocas relaciones significativas: sólo si tomamos la región Longitud y calculamos su valor mediante la media de la rejilla encontramos algún resultado coherente, aunque sólo se

relaciona con el volumen de capturas en la zona de captura atlántica (Miño-Nalón) y mediante retrasos de 3 años; en la zona de captura mediterránea (Albufera-Ebro) no presenta relación significativa alguna de interés. El interés de esta variable es pues muy bajo.

3. La temperatura está especialmente relacionada si tomamos la región Longitud y calculamos su valor mediante la mediana de la rejilla (es la única variable que, en conjunto, presenta mejores relaciones para la mediana que para la media). Las mejores correlaciones significativas se dan a profundidades medias, entre 120 y 300 metros (aproximadamente). Los retrasos de 1 y 3 años aparecen más frecuentemente entre las relaciones significativas, tanto para la zona de captura atlántica (Miño-Nalón), como para la zona de captura mediterránea (Albufera-Ebro). Las correlaciones encontradas son negativas, es decir, indican menor volumen de pesca a mayor temperatura.

4. La componente x (longitudinal) de la velocidad de las corrientes está especialmente relacionada si tomamos las regiones de Longitud y Núcleo calculando su valor con la media de la rejilla, aunque las diferentes regiones oceánicas presentan propiedades levemente diferentes. Longitud es especialmente interesante para todas las profundidades estudiadas, y los retrasos de 0 y 1 años se relacionan con el volumen de capturas en la zona de captura atlántica (Miño-Nalón), y de 1 y 2 años en la zona de captura mediterránea (Albufera-Ebro) – igual que en la componente x del tensor superficial de presión. Núcleo presenta relaciones sobre todo en profundidades medias entre 120 y 300 metros (aproximadamente) y para un retraso de 3 años para las zonas de captura atlánticas y mediterráneas. Las correlaciones encontradas son positivas, es decir, indican mayor volumen de pesca a mayor componente longitudinal.

5. La componente y (latitudinal) de la velocidad de las corrientes presenta muy pocas relaciones significativas: sólo si tomamos retrasos de 3 años tanto en la región Longitud como en la región Núcleo y calculamos su valor mediante la media de la rejilla encontramos algún resultado coherente, aunque los resultados frente a las zonas de captura (Miño-Nalón y Albufera-Ebro) son desiguales y poco concluyentes. El interés de esta variable es pues muy bajo.

4.2. Identificación de relaciones entre variables climáticas locales y la población de anguilas en diferentes zonas costeras españolas

Una vez disponibles todos los datos necesarios para este punto, se procede a la identificación de las relaciones entre el reclutamiento de angula en diferentes zonas costeras españolas (en rigor, el volumen de capturas de angula, ya que ésta es la variable o proxy que informa sobre la población) y las diferentes variables climáticas locales empleadas en este estudio.

Antes de comenzar nuestro estudio ha sido necesario identificar los observatorios de AEMet más cercanos a nuestras zonas de pesca y que tengan series meteorológicas lo suficientemente largas como para ser empleados en nuestro estudio. En la tabla 2 se detallan cuáles son esos observatorios útiles más cercanos a las zonas de captura.

Zona de Captura	Id del Observatorio	Nombre del Observatorio	Altura del Observatorio (m)
-----------------	---------------------	-------------------------	-----------------------------

Albufera de Valencia	8416	VALENCIA	11
Delta del Ebro	9981-A	TORTOSA	44
Desembocadura del Miño	1495	VIGO AEROPUERTO	261
Desembocadura del Nalón	1212-E	ASTURIAS AEROPUERTO	127

Tabla 2. Observatorios meteorológicos de AEMet (con su identificador de AEMet, su nombre y la altura de su emplazamiento en metros) asociados a las zonas de captura.

A continuación, se procede a buscar las posibles correlaciones entre las variables meteorológicas locales y el volumen de capturas.

1. Precipitación

Se analizaron las correlaciones (y su significación) entre los datos anuales de captura de anguilas y tres tipos diferentes de datos anuales relacionados con la precipitación: 1) Precipitación acumulada anual; 2) Precipitación del mes más lluvioso del año y 3) Precipitación del mes más seco del año.

Se han analizado las correlaciones para cada zona de capturas y para cada variable derivada de precipitación y además se han probado retrasos anuales de hasta 3 años (es decir, se han analizado correlaciones frente a las series de capturas contra datos locales de precipitación del mismo año, de hace un año, de hace dos y de hace tres años: 4 posibles relaciones), con lo que se han logrado un total de 48 posibles correlaciones.

Los resultados son en general muy poco concluyentes ya que la significación de las correlaciones (el p-valor asociado a cada una de ellas) es muy baja (muy pocas veces se está por debajo del umbral de 0.1 para considerar significación). En el caso de la zona de captura mediterránea (Albufera-Ebro) no aparece ni una sola correlación significativa, para ninguna de las variables derivadas de precipitación.

En el caso de zona de captura atlántica (Miño-Nalón) aparecen algunas relaciones significativas, pero más relacionadas con la precipitación del mes más lluvioso y con la del mes más seco que con la precipitación acumulada anual; las correlaciones significativas son positivas (a más precipitación, más captura), excepto en el caso de la precipitación del mes más seco, lo cual también sugiere que a mayor precipitación, más captura. En todo caso, no aparecen coherentemente asociadas a retrasos de años concretos, lo que parece sugerir que las correlaciones lineales pueden aparecer debidas a periodos de mucha lluvia o de sequía, independientemente de los años concretos en que se den tales situaciones – lo cual tendría sentido dado que las precipitaciones son determinantes en el caudal de los ríos. Es por eso por lo que parece interesante contar con estas variables en el caso de zona de captura atlántica (Miño-Nalón), pero sólo en ese.

2. Temperatura

Se han analizado correlaciones (y su significación) entre los datos anuales de captura de anguilas y tres tipos diferentes de datos anuales relacionados con la temperatura: 1) Temperatura media anual; 2) Temperatura media del mes más cálido del año; 3)

Temperatura media del mes más frío del año; 4) Temperatura media de las temperaturas máximas anuales y 5) Temperatura media de las temperaturas mínimas anuales.

Se han analizado las correlaciones para cada zona de capturas y para cada una de las cinco variables derivadas de temperatura junto con retrasos anuales de hasta 3 años (es decir, hemos probado a buscar correlaciones frente a las series de capturas contra datos locales de precipitación del mismo año, de hace un año, de hace dos y de hace tres años: 4 posibles relaciones), con lo que se han logrado un total de 80 posibles correlaciones.

Los resultados son en general muy poco concluyentes ya que la significación de las correlaciones (el p-valor asociado a cada una de ellas) es muy baja (muy pocas veces se está por debajo del umbral considerado de 0.1 para considerar significación). En el caso de la zona de captura mediterránea (Albufera-Ebro) no aparece ni una sola correlación significativa, para ninguna de las variables derivadas de temperatura.

En el caso de zona de captura atlántica (Miño-Nalón) sólo aparecen algunas relaciones significativas en el caso del Nalón pero no así en el caso del Miño, es decir, no podemos concluir nada general sobre posibles relaciones entre estas variables derivadas de temperatura y la zona atlántica Miño-Nalón. En el caso específico del Nalón (insistimos, el único sobre el que se puede afirmar algo, lo que parece sugerir que las correlaciones entre temperaturas meteorológicas locales y puntos de captura no existen como tales, o no son significativas, pero en este caso concreto sí, lo que parece sugerir que existen variables geográficas o ambientales que provocan la aparición de tales correlaciones) tales correlaciones tienden a aparecer para retrasos de dos y tres años, y siempre de signo negativo (a mayor temperatura, menor volumen de captura).

Dada la casi completa ausencia de correlaciones para datos derivados de temperatura y la imposibilidad de plantear conclusiones significativas, las variables derivadas de temperatura no serán empleadas en nuestras consideraciones; sólo en el caso del Nalón se observarán los cambios futuros simulados de temperatura como sugerencia de posibles (pero no claras) influencias.

4.3. Identificación de relaciones entre variables climáticas locales y la población de anguilas en río

En esta actividad se tratan de identificar las relaciones entre la población de anguilas en río (estimada mediante muestreo por pesca eléctrica en el País Vasco) y las diferentes variables climáticas locales empleadas en este estudio. Recordemos que el grupo final de estaciones con datos de pesca eléctrica que usaremos en este estudio es de 11 estaciones. De estas 11 estaciones, sólo 8 tienen estaciones hidrológicas de aforo que tengan datos meteorológicos (las 3 restantes sólo tienen datos hidrológicos de caudal).

El siguiente paso consiste en la búsqueda de posibles correlaciones entre las variables meteorológicas locales de las estaciones de aforo y las capturas por pesca eléctrica.

1. Precipitación

De nuevo, vamos a buscar correlaciones (y su significación) entre los datos anuales de pesca eléctrica de anguilas y tres tipos diferentes de datos anuales relacionados con la

precipitación: 1) Precipitación acumulada anual; 2) Precipitación del mes más lluvioso del año y 3) Precipitación del mes más seco del año.

Se buscan correlaciones para cada estación de pesca eléctrica y para cada variable derivada de precipitación hemos probado retrasos anuales de hasta 3 años (es decir, hemos probado a buscar correlaciones frente a las series de capturas contra datos locales de precipitación del mismo año, de hace un año, de hace dos y de hace tres años: 4 posibles relaciones), con lo que hemos logrado un total de 96 posibles correlaciones.

De nuevo, para el caso de variables derivadas de la precipitación los resultados son en general muy poco concluyentes ya que la significación de las correlaciones (el p-valor asociado a cada una de ellas) es muy baja (muy pocas veces se está por debajo del umbral considerado de 0.1 para considerar significación). Sólo 3 de ellas presentan algunas relaciones significativas, pero (de nuevo) más relacionadas con la precipitación del mes más lluvioso y con la del mes más seco que con la precipitación acumulada anual; las correlaciones significativas son positivas (a más precipitación, más captura), excepto en el caso de la precipitación del mes más seco, lo cual también sugiere que a mayor precipitación, más captura. Y en todo caso no aparecen coherentemente asociadas a retrasos de año concretos, lo que parece sugerir que las correlaciones lineales pueden aparecer debidas a periodos de mucha lluvia o de sequía, independientemente de los años concretos en que se den tales situaciones – lo cual tendría sentido dado que las precipitaciones son determinantes en el caudal de los ríos.

Por todo lo anterior, parece interesante contar con estas variables como indicativas de la cantidad de anguilas por río (considerando esa cantidad como dada por los datos de pesca eléctrica), aunque no es una variable especialmente significativa.

2. Temperatura

De nuevo, vamos a buscar correlaciones (y su significación) entre los datos anuales de pesca eléctrica de anguilas y tres tipos diferentes de datos anuales relacionados con la temperatura: 1) Temperatura media anual; 2) Temperatura media del mes más cálido del año; 3) Temperatura media del mes más frío del año; 4) Temperatura media de las temperaturas máximas anuales y 5) Temperatura media de las temperaturas mínimas anuales.

Buscaremos correlaciones para cada estación de pesca eléctrica y para cada una de las cinco variables derivadas de temperatura hemos probado retrasos anuales de hasta 3 años (es decir, hemos probado a buscar correlaciones frente a las series de capturas contra datos locales de precipitación del mismo año, de hace un año, de hace dos y de hace tres años: 4 posibles relaciones), con lo que hemos logrado un total de 160 posibles correlaciones.

Los resultados son muy poco concluyentes ya que la significación de las correlaciones (el p-valor asociado a cada una de ellas) es muy baja (muy pocas veces se está por debajo del umbral considerado de 0.1 para considerar significación). Sólo aparecen algunas relaciones significativas para 2 de las estaciones de pesca eléctrica, y sin que los retrasos de año implicados parezcan aparecer de forma coherente.

Es por eso por lo que, dada la imposibilidad de plantear conclusiones significativas, las variables derivadas de temperatura no serán empleadas en nuestras consideraciones relativas a la población de anguilas expresada a partir de datos de pesca eléctrica.

4.4. Construcción de un nicho ecológico

En la actualidad existen potentes herramientas de modelización estadística que permiten predecir la distribución del hábitat de las especies a lo largo del tiempo en función de los factores ambientales y geográficos. Dichos modelos de hábitat están basados en el concepto de nicho ecológico y buscan estimar la idoneidad de la presencia o abundancia de la especie a partir de la información ambiental espacial y temporal. De entre los diferentes algoritmos existentes, hemos empleado los modelos GAM (*Generalized Additive Models*). Con dichos modelos, en el presente proyecto se ha estudiado la relación entre la población de anguilas en los ríos y las variables climáticas locales, a partir de datos de abundancia de anguila en ríos obtenidos directamente por muestreo mediante pesca eléctrica. Dicho modelo se ha construido siguiendo los procedimientos estadísticos y de modelización necesarios (selección de variables mediante AIC a partir de la comparación de todos los modelos posibles) para obtener un modelo robusto, fiable y basado en la teoría del nicho ecológico de Hutchinson.

En cuanto al ajuste de los modelos, el número de *knots* de cada variable se ha limitado a 3 para evitar sobreajuste y para obtener un modelo de acuerdo con la teoría de nicho ecológico. Al modelo seleccionado automáticamente se le han quitado manualmente aquellas variables cuyos coeficientes no son significativos o aquellas cuya curva respuesta fuese no interpretable desde el punto de vista de la teoría del nicho ecológico. El río se mantiene como factor dado que las variables pueden afectar las capturas de forma diferente en cada río.

El modelo finalmente seleccionado explica un 7% de la devianza explicada y contiene dos variables significativas (precipitación en diciembre, $p=0.0389$, e índice de la AMO, $p=0.0041$) y el factor río:

$$\text{Log}(C) \sim \text{Rio} + \text{Pdic} + \text{AMO}$$

donde C son los residuos de la serie temporal (detrended – sin tendencia) de capturas de angulas.

Como se aprecia en la figura 8, la precipitación en diciembre favorece las capturas de angulas, mientras que las fases positivas de la AMO perjudican la abundancia de capturas.

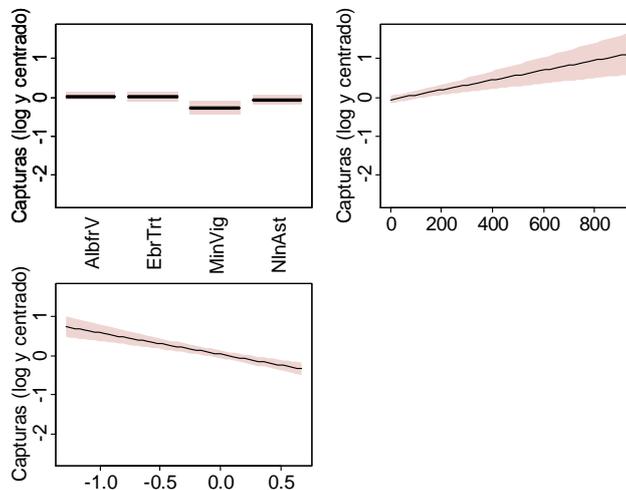


Figura 8. Respuesta del volumen de capturas (previa transformación por logaritmo y eliminando las tendencia) a las variables ambientales.

5. Evolución de las relaciones identificadas bajo escenarios futuros de cambio climático

Este resultado permite extraer conclusiones sobre la evolución esperada de las variables climáticas significativas (oceánicas o locales) identificadas en las actividades anteriores bajo escenarios de cambio climático. Así, a partir de escenarios locales de clima futuro generados por regionalización o *downscaling* de los Modelos Climáticos más actualizados (los utilizados en el Quinto Informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático, IPCC5), se simulará la evolución del clima local en las zonas de estudio. Y a partir de esos mismos Modelos Climáticos se simula la evolución futura de los índices climáticos y oceánicos determinados como relevantes. Ambos grupos de simulaciones futuras permitirán realizar conclusiones sobre la población futura de anguilas.

Todos estos resultados permitirán obtener la información necesaria para evaluar el impacto del cambio climático sobre las poblaciones españolas de anguilas estudiadas, para así definir estrategias básicas de adaptación que permitan adelantarse a la problemática simulada.

La generación de escenarios de clima futuro se ha realizado a través de una metodología de *downscaling* estadístico desarrollada por la Fundación para la Investigación del Clima. La metodología FICLIMA de regionalización es una metodología de *downscaling* estadístico. Necesita por lo tanto de una selección previa de campos a utilizar como predictores y una, vez seleccionados éstos, realiza un tratamiento basado en la metodología de análogos. En lo que sigue pasaremos a describir con un cierto grado de detalle los fundamentos de la metodología FICLIMA; si lo que se desea es un mayor detalle, puede acudir a Ribalaygua *et al* (2013).

En términos generales, la metodología sigue el siguiente esquema: se selecciona un día problema "X", cuyos campos atmosféricos (geopotenciales, temperaturas a distintos

niveles de presión...) de baja resolución son conocidos (mediante las salidas de los Modelos Climáticos Globales para el día "X"). A partir de esos campos conocidos, se pretende estimar el valor de las variables meteorológicas en superficie (temperaturas máxima y mínima, precipitación...) para el día "X" en un punto concreto del territorio (observatorio).

A continuación se realizan los procesos de **verificación** (comparación de los datos observados (de las diferentes estaciones meteorológicas) con los datos simulados obtenidos mediante la aplicación de la metodología de downscaling sobre el reanálisis (en nuestro estudio, ERA40)) y que permite evaluar si la metodología es capaz de simular correctamente el clima actual (y del pasado reciente) y **validación** (comparar las series simuladas obtenidas mediante regionalización del reanálisis (ERA40) con las series simuladas obtenidas mediante regionalización del experimento Historical de cada modelo para un periodo común del pasado, en este caso 1958-2000) cuya misión es la de permitir disponer de un experimento que nos muestre si el modelo climático a emplear es capaz de reflejar la variabilidad climática natural. La información proporcionada por ambos procesos nos permiten establecer el error asociado a la metodología y/o modelo en cuestión.

Finalmente, si necesitamos que los datos regionalizados en un punto de un cierto modelo climático se puedan interpretar en sus valores absolutos y no sólo en términos de incrementos relativos entonces debemos corregir los posibles errores que han podido introducir sesgos en la regionalización para así poder obtener valores que podamos estudiar en su magnitud absoluta. Esta corrección es lo que denominamos **Corrección del Error Sistemático**. Por lo tanto, antes de estudiar las simulaciones obtenidas al regionalizar las proyecciones futuras de los modelos climáticos considerados debemos llevar a cabo la corrección de tal error.

5.1. Proyecciones de los índices climáticos y oceánicos bajo simulaciones de clima futuro

- **Precipitación**

Los resultados de precipitación muestran un comportamiento aproximadamente estable (aproximadamente sin incrementos) para el escenario RCP 4.5 (aunque con leves oscilaciones a lo largo del siglo XXI), aunque el escenario RCP 8.5 sí muestra una cierta tendencia al descenso. Esa tendencia al descenso es más interpretable si nos fijamos en el decremento relativo, prácticamente continuado desde mediados del siglo XXI y que llega a alcanzar un valor de (aproximadamente) un 5% de decremento a finales de siglo.

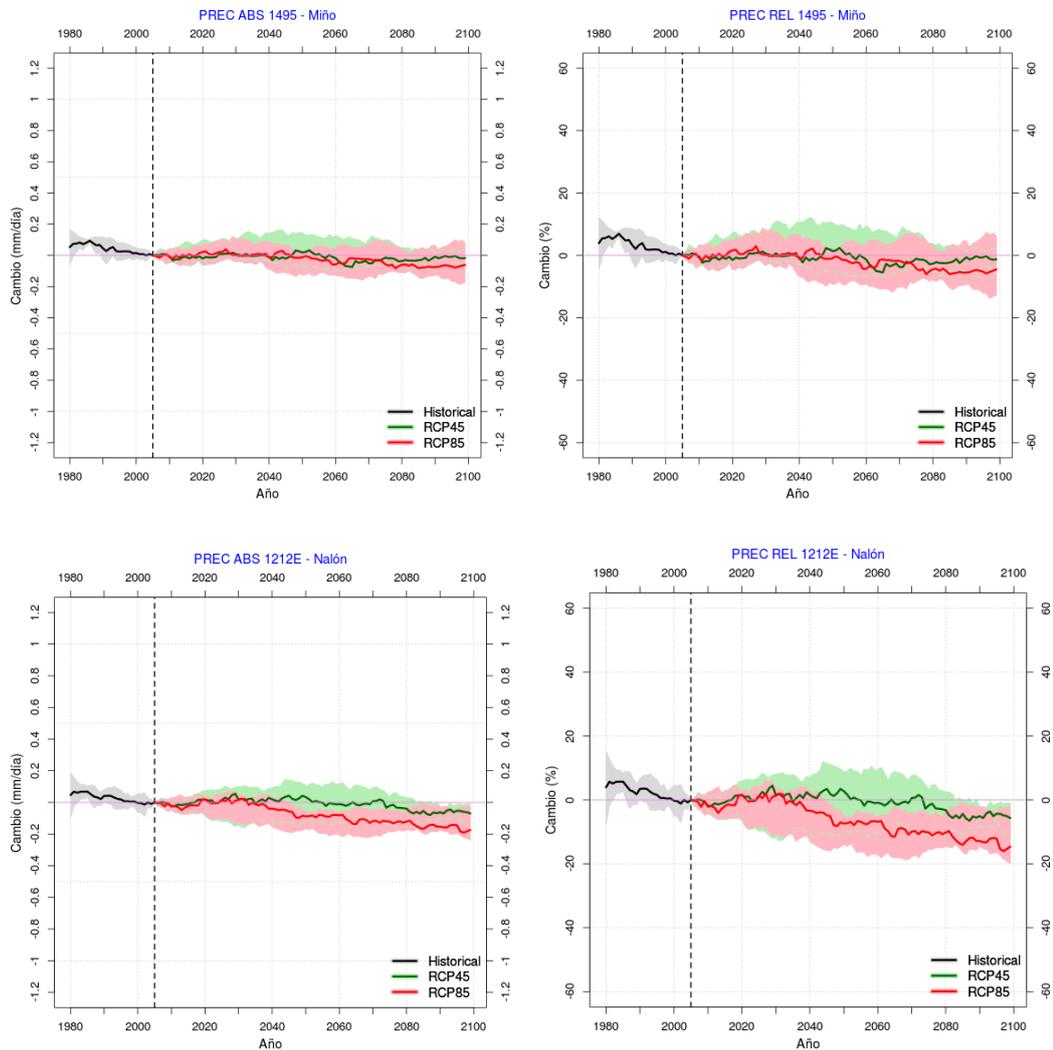


Figura 9. Incrementos anuales absolutos y relativos esperados de la Precipitación acumulada para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCPs representados (4.5 y 8.5) con respecto al promedio del periodo 1975 – 2005 (tomado como referencia). La línea discontinua marca el fin del experimento Histórico y el comienzo de los RCPs. Simulaciones de todos los modelos empleados para el observatorio asociado a la zona de captura del Miño (superior) y el Nalón (inferior). Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90.

- **Temperatura**

En el ejemplo de la zona de captura del Nalón, los incrementos anuales esperados para la temperatura máxima y mínima muestran un comportamiento claro y pronunciado de incrementos positivos continuados para ambos escenarios, aunque el incremento esperado para el escenario RCP 8.5 sea mayor a todo lo largo del siglo XXI.

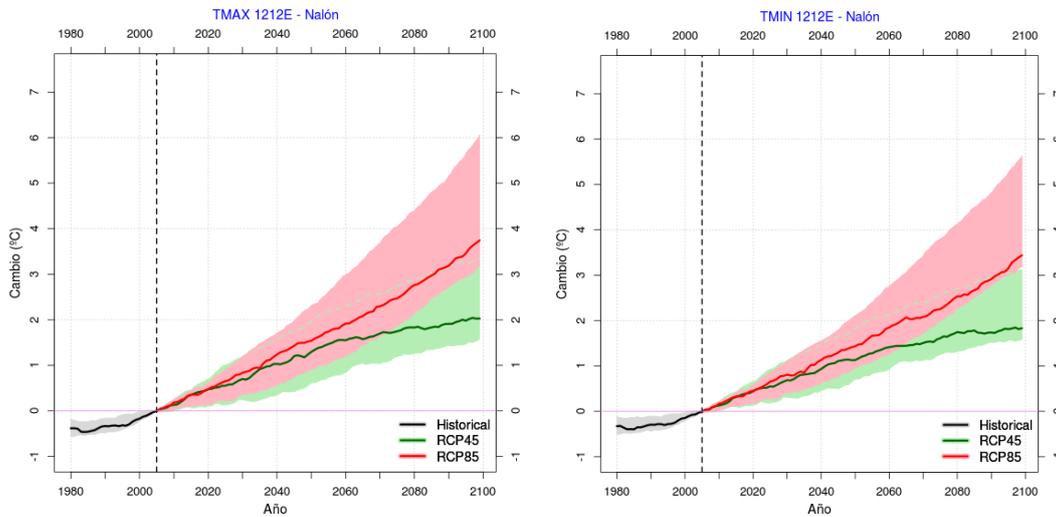


Figura 10. Incrementos anuales esperados de la Temperatura máxima (izquierda) y mínima (derecha) para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCPs representados (4.5 y 8.5) con respecto al promedio del periodo 1975 – 2005 (tomado como referencia). La línea discontinua marca el fin del experimento Historical y el comienzo de los RCPs. Simulaciones de todos los modelos empleados para el observatorio asociado a la zona de captura del Nalón. Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90.

- **Índice de la NAO**

La figura 11 muestra los incrementos anuales esperados como resultado de las simulaciones para los índices anual e invernal de la NAO, calculados según la metodología de Hurrell (recordemos que es la que presenta correlaciones significativas frente al volumen de capturas de las cuatro zonas de interés seleccionadas). Ambas figuras muestran un incremento, a lo largo de todo el siglo XXI, de la fase positiva de la NAO, tanto para el escenario RCP 4.5 como para el 8.5. Nótese como el comportamiento general a lo largo de todo el siglo XXI es similar para ambos índices (lo cual tiene sentido), pero los incrementos esperados para el índice invernal son mucho más elevados.

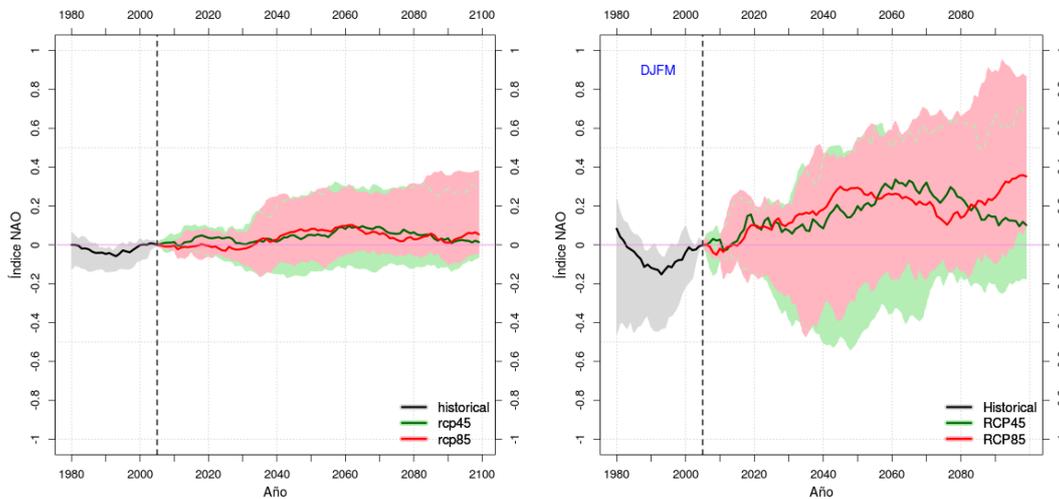


Figura 11. Incrementos anuales (izquierda) e invernales (derecha) esperados del Índice anual de la NAO para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCPs representados (4.5 y 8.5) con respecto al promedio del periodo 1975 – 2005 (tomado como referencia). La línea discontinua marca el fin del experimento Historical y el comienzo de los RCPs. Simulaciones de todos los modelos empleados; cálculo del índice según la metodología de Hurrell. Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90.

- **índice de la AMO**

La figura 12 muestra los incrementos anuales esperados como resultado de las simulaciones para el índice anual de la AMO, calculado como anomalía de la temperatura de la superficie del mar de toda la región del Atlántico Norte. Se observa un incremento, a lo largo de todo el siglo XXI, de la fase positiva del índice de la AMO, tanto para el escenario RCP 4.5 como para el 8.5, más acusado para el escenario RCP 8.5.

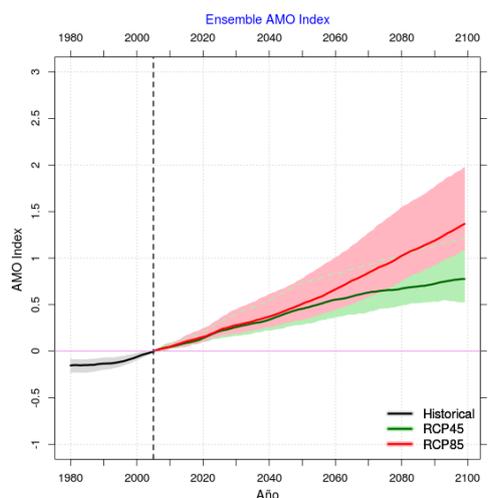


Figura 12. Incrementos anuales esperados del índice de la AMO para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCPs representados (4.5 y 8.5) con respecto al promedio del periodo 1975 – 2005 (tomado como referencia). La línea discontinua marca el fin del experimento Historical y el comienzo de los RCPs. Simulaciones de todos los modelos empleados; cálculo de los valores para el

Atlántico Norte. Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90.

- **Componente longitudinal (x) del tensor superficial de presión (TAU)**

La figura 13 muestra los incrementos anuales esperados como resultado de las simulaciones para la componente longitudinal (x) del Tensor superficial de presión (TAU), calculado como la media de los puntos de rejilla incluidos en la región atlántica "Longitud". Se aprecia un claro decremento, a lo largo de todo el siglo XXI, de los valores de la componente longitudinal de TAU, tanto para el escenario RCP 4.5 como para el 8.5, mucho más acusado para el escenario RCP 8.5.

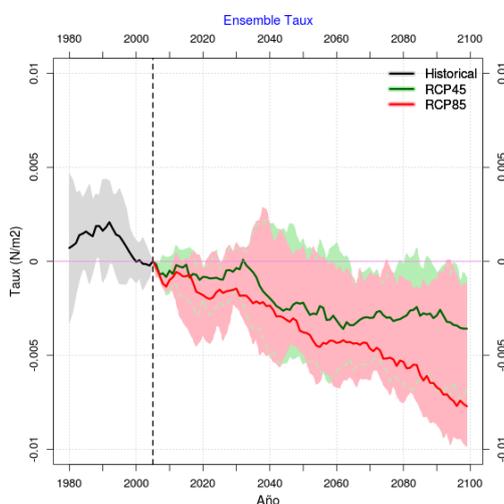


Figura 13. Incrementos anuales esperados del componente longitudinal del Tensor superficial de presión (TAUX) para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCPs representados (4.5 y 8.5) con respecto al promedio del periodo 1975 – 2005 (tomado como referencia). La línea discontinua marca el fin del experimento Histórico y el comienzo de los RCPs. Simulaciones de todos los modelos empleados; cálculo de los valores para la región oceánica "Longitud". Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90.

- **Temperatura oceánica**

La figura 14 muestra los incrementos anuales esperados como resultado de las simulaciones para las temperaturas oceánicas a 125 y 315 metros bajo el nivel del mar; recordemos que se encontraron correlaciones significativas para capas situadas entre 120 y 300 metros de profundidad (aproximadamente), aquí se representan gráficamente sólo los límites de todo ese espesor. Los valores se han calculado como la mediana de los puntos de rejilla incluidos en la región atlántica "Longitud".

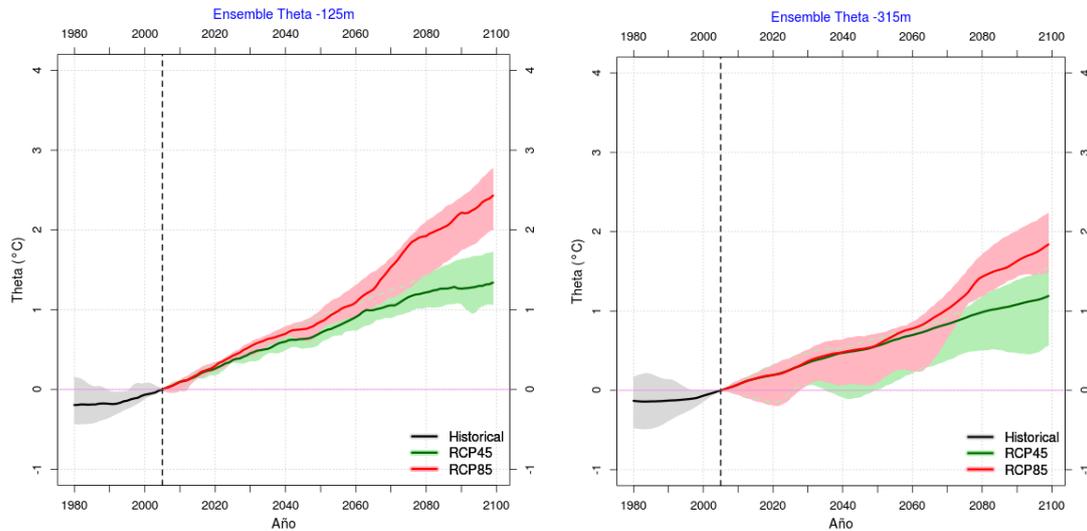


Figura 14. Incrementos anuales esperados de la Temperatura Oceánica para el siglo XXI en una capa situada a 125 metros (izquierda) y 315 metros (derecha) bajo el nivel del mar, representados como medias móviles de 30 años, según los RCPs representados (4.5 y 8.5) con respecto al promedio del periodo 1975 – 2005 (tomado como referencia). La línea discontinua marca el fin del experimento Histórico y el comienzo de los RCPs. Simulaciones de todos los modelos empleados; cálculo de los valores para la región oceánica "Longitud". Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90.

- **Componente Longitudinal (u) de las corrientes oceánicas**

La figura 15 muestra los incrementos anuales esperados como resultado de las simulaciones para la componente longitudinal (u) de las corrientes oceánicas a 125 y 315 metros bajo el nivel del mar, calculados como la media de los puntos de rejilla incluidos en la región atlántica "Longitud". Recordemos que para esta variable y en tal región oceánica se encontraron correlaciones significativas para todas las capas situadas entre la superficie oceánica y 300 metros de profundidad (aproximadamente). Se aprecia un decremento continuado de la componente longitudinal de la corriente, mayor cuanto mayor es la profundidad, a lo largo de todo el siglo XXI, tanto para el escenario RCP 4.5 como para el 8.5. Sin embargo, sólo para profundidades mayores ese decremento pasa a ser lo bastante claro: se concluye que el decremento existente será tanto más significativo cuanto mayor sea la profundidad.

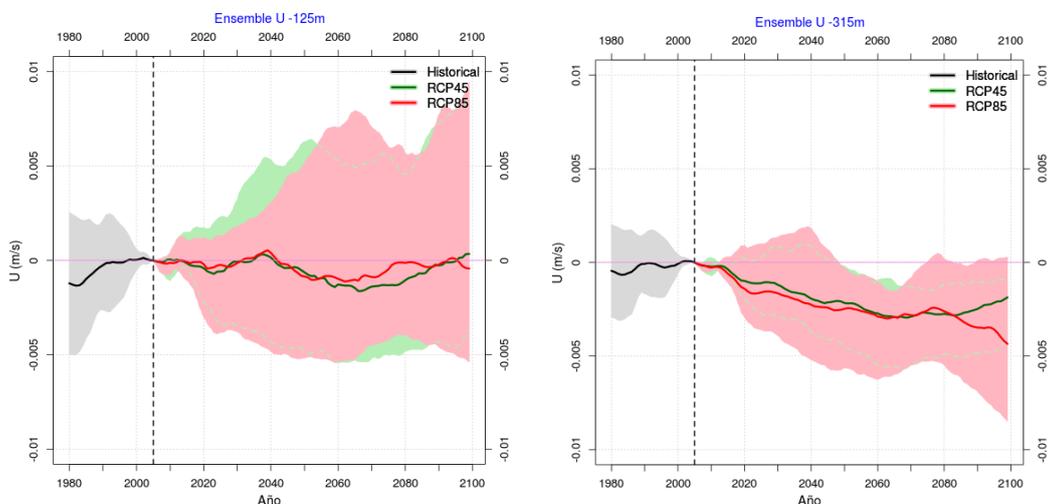


Figura 15. Incrementos anuales esperados de la componente longitudinal (U) de las corrientes oceánicas para el siglo XXI en una capa situada a 125 metros y 315 metros bajo el nivel del mar, representados como medias móviles de 30 años, según los RCPs representados (4.5 y 8.5) con respecto al promedio del periodo 1975 – 2005 (tomado como referencia). La línea discontinua marca el fin del experimento Histórico y el comienzo de los RCPs. Simulaciones de todos los modelos empleados; cálculo de los valores para la región oceánica "Longitud". Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90.

5.2. Simulación de la evolución de la población de anguilas bajo proyecciones climáticas y oceánicas futuras

Si ahora tenemos en cuenta todos los resultados anteriores, que hemos ido detallando en orden procedimental, de forma que consideramos:

1. Las relaciones entre poblaciones y variables oceánicas (o índices), para diferentes regiones atlánticas consideradas y para diferentes retrasos de año, con su significación estadística,
2. Las relaciones entre poblaciones y variables climáticas locales para diferentes agregaciones anuales de variables meteorológicas y para diferentes retrasos de año, con su significación estadística,
3. Las simulaciones futuras de las variables consideradas de interés (estadísticamente significativas) y las conclusiones sobre sus posibles evoluciones futuras

Podemos entonces llegar a una serie de conclusiones basadas en las correlaciones significativas encontradas gracias a los datos del pasado (reanálisis u observaciones) para diferentes zonas de captura al relacionar esas correlaciones con los futuros simulados para cada una de las variables o índices de interés: un resumen general de todo ello puede encontrarse en la tabla 3. Debe recordarse que éste sólo es un esquema ilustrativo de todo lo expuesto hasta ahora, forzosamente reductor en sus postulados y conclusiones (ya que es sólo un resumen) y que la consulta de todo lo hasta ahora expuesto es necesaria para matizar lo que se indica. Así y todo, y teniendo esto en cuenta, el resultado final resulta más que evidente: cabe esperar un descenso futuro de la

población de anguilas en función de las simulaciones de cambio climático futuro, al menos hasta donde las condiciones climáticas son responsables del tamaño de la población de anguilas.

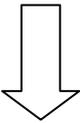
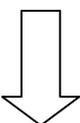
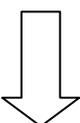
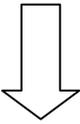
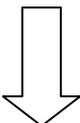
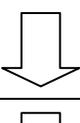
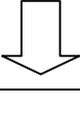
Variable	Zona de captura	Regla del pasado	Futuro simulado	Capturas futuras
Índice NAO	Todas	Más capturas cuanto más negativo el índice invernal (menos cuanto más positivo)	Índice invernal de la NAO más positivo	
Índice AMO	Todas	Más capturas cuanto más negativo (menos cuanto más positivo). Relación no lineal.	Índice AMO más positivo	
Componente x (longitudinal) del Tensor superficial de presión	Todas	Más capturas cuanto mayor es la componente (valores positivos)	Menores valores de la componente	
Temperatura oceánica entre 120-300 metros de profundidad	Todas	Menos capturas cuanto mayor la temperatura	Mayores temperaturas	
Componente u (longitudinal) de la velocidad de las corrientes	Todas	Más capturas cuanto mayor es la componente (valores positivos)	Menores valores de la componente	
Precipitación local	Zona Atlántica (Miño, Nalón)	Más capturas cuanto mayor precipitación	Menor precipitación local	
Temperatura local	Nalón	Menos capturas cuanto mayor la temperatura	Mayores temperaturas locales	

Tabla 3. Resumen de los resultados esperados: variables finalmente estudiadas (locales y oceánicas), zona de captura con la que se relacionan, regla interpretada del pasado y resultados simulados futuros. Este resumen es meramente ilustrativo y necesita de numerosas matizaciones desarrolladas en los puntos anteriores.

5.3. Evaluación del impacto del cambio climático sobre la anguila

Como se ha comentado anteriormente la anguila europea se encuentra en una situación muy delicada, el reclutamiento en el 2015 comparado a 2014 es de un 1,2 en el área del Mar del norte y de un 8,4% en el resto de Europa.

Este declive es debido a la acumulación de diversos factores: pérdida y alteración de sus hábitats, contaminación, obstáculos para su desplazamiento en los ríos, sobrepesca, cambios oceanográficos/climáticos, y enfermedades y parasitación. Resulta complicado determinar en qué medida afecta cada uno de los factores al reclutamiento. En primer lugar, estos factores presentan correlaciones entre ellos en algunos casos. Por otro lado, la calidad del hábitat local y los diferentes patrones de explotación pesquera provocan que uno u otro factor pueda ser más determinante en la zona.

En el presente estudio, se han identificado ciertos parámetros climáticos, tanto oceánográficos como locales, que están relacionados significativamente con el reclutamiento de anguila en España. Tal como se ha descrito con anterioridad, la anguila posee un ciclo de vida complejo, con diversas transformaciones biológicas, y largas migraciones, condicionado por diversos factores. Por esta razón, resulta complicado encontrar relaciones significativas para cada uno de los parámetros, lo que explicaría que las relaciones encontradas no hayan sido por sí solas muy significativas. Además, se ha de tener en cuenta que en el caso del reclutamiento se han utilizado datos pesqueros que están sujetos a influencias externas (mercado, regulaciones y tecnología) que provocan variaciones que pueden oscurecer las relaciones entre las capturas de anguila y los parámetros estudiados.

Las simulaciones futuras muestran que la evolución de los parámetros climáticos identificados como más influyentes en el reclutamiento de anguila, durante el siglo XXI van a tener un efecto negativo sobre la población de anguila (tabla 3). Se debe tener en cuenta además, que la relación entre la biomasa reproductora y el reclutamiento no sigue una relación clásica en el caso de la anguila, ya que siguiendo el denominado el efecto Allee (1931) los reclutamientos obtenidos son menores a los esperados teniendo en cuenta la biomasa reproductora, efecto observado en las poblaciones cuyo stock es pequeño. Este fenómeno, conocido como depensación en la literatura pesqueras (Hilborn and Waters 1992) hace que se acelere el declive de la población. Así, la población entra en un efecto vértice (Gilpin y Soulé, 1986) donde cualquier influencia antrópica negativa tiene un efecto mucho más acentuado que en una población en un buen estado de conservación, que empuja a la especie hacia la extinción.

Las conclusiones de este apartado son por tanto:

- Se han identificado una serie de parámetros climáticos que influyen en el estado de la población de anguila. Sin embargo, la significancia estadística entre dichos factores y el reclutamiento es baja si se analiza de forma aislada, probablemente debido al gran número de parámetros que determinan el estado de la población y a los problemas derivados del uso de datos pesqueros.
- De acuerdo a las simulaciones futuras, la evolución de los parámetros climáticos va a tener un efecto negativo sobre la población de anguila. Este efecto se va a ver acentuado por el fenómeno de depensación que está sufriendo la especie.

6. Bibliografía

- Allee W.C. (1931) *Animal Aggregations. A study in General Sociology*. University of Chicago Press, Chicago. 431 pp.
- Arribas C., Fernández-Delgado C., Oliva-Paterna F.J., Drake P. (2012) Oceanic and local environmental conditions as forcing mechanisms of the glass eel recruitment to the southernmost European estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 107: 46-57. DOI: 10.1016/j.ecss.2012.04.024
- Arrizabalaga, H., Dufour, F., Kell, L., Merino, G., Ibaibarriaga, L., Chust, G., Irigoien, X., Santiago, J., Murua, H., Fraile, I., Chifflet, M., Goikoetxea, N., Sagarminaga, Y., Aumont, O., Bopp, L., Herrera, M., Marc Fromentin, J. & Bonhommeau, S. (2015) Global habitat preferences of commercially valuable tuna. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 113, 102-112. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2014.07.001>.
- Bonhommeau, S., Chassot, E. & Rivot, E. (2008a) Fluctuations in European eel (*Anguilla anguilla*) recruitment resulting from environmental changes in the Sargasso Sea. *Fish. Oceanogr.* 17, 32-44. DOI:10.1111/j.1365-2419.2007.00453.x
- Bonhommeau, S., Chassot, E., Planque, B., Rivot, E., Knap, A. H. & Le Pape, O. (2008b) Impact of climate on eel populations of the Northern Hemisphere. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 373, 71-80. DOI:10.3354/meps07696
- Briand, C., Mounax, B., Fatin, D. & Feunteun, E. (2003) The contribution of springtime and autumn glass eels (*Anguilla anguilla*) to stock: results based on otoliths morphometry. *Bulletin Français de la Pêche et de Pisciculture, Conseil Supérieur de la Pêche, Paris (France)* 386 : 27-41.
- Carton J.A. and Giese B.S. (2008) A reanalysis of ocean climate using Simple Ocean Data Assimilation (SODA), *Monthly Weather Review*, 136, 2999-3017.
- Castonguay, M., Hodson, P.V., Moriarty, C., Drinkwater, K.F. & Jessop, B.M. (1994) Is there a role of ocean environment in American and European eel decline? *Fisheries Oceanography* 3: 197-203.
- Cropper, T.; Hanna, E.; Valente M.A.; Jonsson T. (2015) A daily Azores-Iceland North Atlantic Oscillation index back to 1850. *Geoscience Data Journal*, vol: 2, pp.: 12-24, DOI: 10.1002/gdj3.23.
- Dekker, W. (2003) *Status of the European eel stock and fisheries*. Springer-Verlag: Tokyo, pp. 237-254.
- Dekker, W. (2004a) Slipping through our hands; population dynamics of the European eel. *Faculteit der Natuurwetenschappen*. 186 pp.
- Dekker, W. (2004b) What caused the decline of Lake IJsselmeer eel stock since 1960? *ICES Journal of Marine Science*, 61: 394-404.
- Dönni, W., Maier, K.J. & Vicentini, H. (2001) Bestandsentwicklung des Aals (*Anguilla anguilla*) im Hochrhein. *Mitteilungen zur Fischerei Nr. 69*. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern.
- Del Moral, J. C. & De Souza, J. A. (2004) Cormorán grande invernante en España. *II Censo nacional*. SEO/BirdLife. Madrid.
- EELREP (2005) Estimation of the reproduction capacity of European eel. 272pp. <http://www.fishbiology.net/eelrepsum.html>
- Enfield, D.B., Mestas-Nunez A.M., and Trimble P.J. (2001) The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relationship to rainfall and river flows in the continental U.S. *Geophysical Research Letters*, 28: 2077-2080.
- Friedland, K. D., Miller, M. J. & Knights, B. (2007) Oceanic changes in the Sargasso Sea and declines in recruitment of the European eel. *ICES J. Mar. Sci.* 64, 519-530, DOI: 10.1093/icesjms/fsm022.
- Gilpin, M.E. & Soulé, M.E. (1986). Minimum viable populations: the processes of species extinctions. In: *Conservation Biology: The Science of Scarcity and Diversity* (ed. Soulé, M.E.). Sinauer Associates, Sunderland, MA, pp. 19-34.
- Hadderingh, R. H. & Baker, H. D. (1998) Fish mortality due to passage through hydroelectric power stations on the Meuse and Vecht rivers.- In Jungwirth, M., M. Schumutz & S. Weiss [eds]: *Fish migration and fish bypasses*. Oxford (Fishing News Books, S.).
- Heller, N.E., E.S. Zavaleta, 2009. Biodiversity management in the face of climate change: A review of 22 years of recommendations. *Biological Conservation*, 142: 14-32.

- Hilborn, R., & Walters, C. J. (1992) Quantitative fisheries stock assessment: choice, dynamics and uncertainty. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2: 177–186
- Hurrell, J. (2015). The Climate Data Guide: Hurrell North Atlantic Oscillation (NAO) Index (station-based). National Center for Atmospheric Research (NCAR) URL: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-station-based>
- ICES (1999) Report of the ICES Advisory Committee on Fisheries Management. ICES Cooperative Research Report N° 229, 393–405.
- ICES (2001) Report of the EIFAC/ICES working group of eels, St. Andrews, N.B., Canada, 28 August – 1 September 2000, ICES CM, ACFM:03, 91 pp.
- ICES (2014) Report of the Joint EIFAAC/ICES/GFCM Working Group on Eel, 3-7 November 2014, Rome, Italy. ICES CM 2014/ACOM:18. 203 pp. URL: <http://www.ices.dk/publications/our-publications/Pages/Annual-Report.aspx>
- ICES (2015) Report of the 2015 Session of the Joint EIFAC/GFCM ICES Working Group on Eels 23 November -2 December -2015, Antalya, Turkey.
- Kettle, A. J., Bakker, D. C. E. & Haines, K. (2008) Impact of the North Atlantic Oscillation on the trans-Atlantic migrations of the European eel (*Anguilla anguilla*). *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 113, 26, DOI: 10.1029/2007jg000589
- Knights, B. (2003) A review of the possible impacts of longterm oceanic and climate changes and fishing mortality on recruitment of anguillid eels of the Northern Hemisphere. *Science of the Total Environment* 310: 237-244.
- Lara, M.J. (1994) Catch statistics, capture methods, size, and development stages of glass eels in Asturias (northern western Spain). *Bulletin of the Sea Fisheries Institute* 1 (131), 31e39.
- Larinier, M. and Travade, F. (1999) La deccalaison des migrateurs: problems et dispositifs. *Bulletin Français de la Pêche et de Pisciculture, Conseil Supérieur de la Pêche, Paris (France)*. 353/354 : 181210.
- Mawdsley, J.R., R. O'Malley, D.S. Ojima (2009) A Review of Climate-Change Adaptation Strategies for Wildlife Management and Biodiversity Conservation. *Conservation Biology*, 23: 1080-1089.
- Mawdsley, J.R., O'Malley R., Ojima D.S., (2009) A Review of Climate-Change Adaptation Strategies for Wildlife Management and Biodiversity Conservation. *Conservation Biology*, 23: 1080-1089.
- Meinshausen, Malte and Smith, S.J. and Calvin, K. and Daniel, J.S. and Kainuma, M.L.T. and Lamarque, J-F. and Matsumoto, K. and Montzka, S.A. and Raper, S.C.B. and Riahi, K. and Thomson, A. and Velders, G.J.M. and Vuuren, D.P.P. (2011) The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, vol. 109, number 1-2, pp. 213-241; doi: 10.1007/s10584-011-0156-z.
- Moriarty, C. and Dekker, W. (1997) Management of the European Eel. *Fisheries Bulletin (Dublin)* 15:110 pp.
- Nye, J. A., Baker, M. R., Bell, R., Kenny, A., Kilbourne, K. H., Friedland, K. D., Martino, E., Stachura, M. M., Van Houtan, K. S., Wood, R. (2014) Ecosystem effects of the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Journal of Marine Systems*, vol. 133, pp. 103 – 116. DOI:10.1016/j.jmarsys.2013.02.006
- Olmos, V., Aragoneses, J., Echevarrias, J.L. & Oltra, Y.R. (2000) Composición de la dieta e impacto del cormorán grande (*Phalacrocorax carbo sinensis*) durante la invernada en las salinas de Santa Pola, Alicante, este de España. *Ardeola* 47(2): 227-236.
- Pacariz, S; Westerberg H; Björk G (2013) Climate change and passive transport of European eel larvae. *Ecology of Freshwater Fish* 07/2013; 23(1), DOI: 10.1111/eff.12048
- Ribalaygua, J.; Torres, L.; Pórtoles, J.; Monjo, R.; Gaitán, E.; Pino, M.R. (2013). Description and validation of a two-step analogue/regression downscaling method. *Theoretical and Applied Climatology*, 111, DOI: 10.1007/s00704-013-0836-x.
- Serdio, A. (2005) Programa de control experimental de la depredación por cormorán grande en los ríos de Cantabria: resultados invierno 2004-2005. Gobierno de Cantabria Consejería de Ganadería, Agricultura y Pesca; Dirección General de Montes y Conservación de La Naturaleza.

- Taylor, K. E.; Stouffer, R. J.; Meehl, G. A. (2012) An overview of CMIP5 and the experiment design. Bull. Amer. Meteor. Soc., 93, 485-498. doi: 10.1175/BAMS-D-11-00094.1
- Valle, M., Chust, G., del Campo, A., Wisz, M.S., Olsen, S.M., Garmendia, J.M., Borja, A. (2014) Projecting future distribution of the seagrass *Zostera noltii* under global warming and sea level rise. Biological conservation 170: 74-85.
- Van Eerden, M.R. & Gregersen, J. (1995) Long-term changes in the northwest European population of cormorants *Phalacrocorax carbo sinensis*. Ardea 83: 199-212.
- Villarino, E.; Chust, G.; Licandro, P.; Butenschön, M.; Ibaibarriaga, L.; Larrañaga, A.; Irigoien, X. (2015). Modelling the future biogeography of North Atlantic zooplankton communities in response to climate change. Marine Ecology Progress Series 531: 121–142. doi: 10.3354/meps11299.

7. Agradecimientos

Resultados del proyecto " *Investigación científica sobre la población futura de Anguilas en España bajo la influencia del cambio climático*" financiado por Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.