

UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA

**Avances en las proyecciones climáticas
de ciclones con características tropicales
en el Mediterráneo: uso de modelos con
acoplamiento atmósfera-océano y
optimización del método de detección**

Memoria para optar al grado de doctor
Facultad de Ambientales y Bioquímica
Toledo, 2022

Doctorando:
Jesús Gutiérrez Fernández

Director:
Miguel Ángel Gaertner Ruiz Valdepeñas

Co-Director:
Juan Jesús González Alemán



**Advances in climate projections of
cyclones with tropical characteristics
over the Mediterranean: use of
atmosphere-ocean coupled models and
optimisation of the detection method**

Jesús Gutiérrez Fernández

A la memoria de mi abuelo Lorenzo,
que en la eternidad que tienen las
palabras, siempre viva tu esencia,
amor por el medio ambiente y el
trabajo bien hecho

A mis padres, Jesús y María del
Carmen, gracias por ser siempre
fortaleza y apoyo, gracias por haber
creído siempre en mí



Agradecimientos

Y después de tanto tiempo, al final de tantas cosas, llega el momento de concluir y agradecer el trabajo realizado en estos años de tesis, unos años que sin duda han venido marcados por muchos momentos adversos como fueron: la falta de financiación del principio o la pandemia del COVID. Pero con otros muchos recuerdos más que han merecido la pena vivir y que me han ayudado a recorrer este camino con una sonrisa.

Quiero empezar estos agradecimientos, dando las gracias a mis directores de Tesis: Miguel Ángel y Juanje, sin vosotros esto no hubiera sido posible. Gracias Miguel por darme la oportunidad de hacer este doctorado, para mi has sido uno de mis referentes a la hora de mi formación en medicanes y admiro de verdad todo tu trabajo. Gracias también por tu infinita paciencia y dedicación que has tenido conmigo. Gracias Juanje, por ser para mí como un hermano mayor dentro del mundo de la investigación, estos años he crecido admirando todos tus logros, y de la misma manera que tú has sido participe de mi desarrollo, yo también he podido ser testigo de cómo has alcanzado las metas que te has ido proponiendo, estoy muy orgulloso de ti y te doy las gracias por todos los momentos de confianzas, trabajos y desvaríos meteorológicos que hemos tenido.

I would also like to thank Marcello Miglietta, who was able to give me the opportunity to do my predoctoral stay in Italy. Thank you for taking care of me in these months there, thank you for all the knowledge that you have transmitted to me about medicanes and for helping me to know the Italian culture.

Todos en la vida, tenemos un profesor que marca nuestra futura vocación profesional, a parte de mis directores de tesis, quiero destacar la figura de un profesor que más que un mentor se ha convertido en amigo y padre dentro de la universidad. Ese eres tú Kike, gracias por que, sin tu motivación y apoyo, yo hoy lo más seguro no hubiera hecho tesis, has sido en muchos momentos un pilar fundamental en mis malos momentos y en muchas ocasiones has secundado algunas de mis ideas locas, de las cuales espero seguir contando contigo en el futuro. Gracias de verdad por todo.

De mi andadura en el laboratorio 0.14, no puedo dejar de olvidarme de todas las personas que han compuesto y componen mi grupo de investigación, gracias, María Molina, María Ortega, Victoria y Noelia. No obstante, quiero destacar la figura de dos grandes mujeres que me han acompañado y guiado durante mi paso en la universidad como doctorado. Muchas gracias Claudia por ser confidente, consejera y amiga cuando más negro veía todo... pues, aunque no lo creas tus dosis de realidad me ayudaban a seguir adelante. También quiero agradecerte a ti, Alba, todo lo que he aprendido de ti, como son el esfuerzo y la dedicación en investigación, algo clave para conseguir las metas en esta vida, fuiste un gran apoyo y valoro mucho todo el tiempo que dedicaste en ayudarme.

Mis mejores años como estudiante, fueron aquellos que viví tanto en la universidad como en el máster. Quiero agradecer primero a mis “amigos” de la

universidad, los buenos momentos y anécdotas que pasamos, son de gran ayuda para recobrar optimismo y fuerza en los malos momentos. De entre mis amigos de la universidad quiero destacar a tres personas que han sido muy importantes en estos últimos años. Gracias Natalia, Ana y Armando por compartir conmigo tantos buenos momentos en estos años compartiendo piso, en especial gracias a ti Armando, pues has sido compañero de tesis todos estos años y hoy escribiendo estas líneas solo me salen agradecimientos por todo lo que hemos compartido.

También quiero agradecer a mis amigos tanto de Yébenes como de Consuegra, de manera especial quiero dar las gracias a Laura, Gonzalo, Rocío, Antonio, Inma, Carlos, Elena, Natalia, Miquel, Marisol y Cristina vosotros habéis sido los que habéis estado tanto en lo malo como en lo bueno durante estos años, con vosotros he aprendido que en verdad los amigos son la familia que se elige. Gracias de verdad.

Para mí, la familia es uno de los pilares fundamentales de mi existencia, he crecido y vivido en una familia cercana y unida, por tanto, quiero agradecer a mis tíos y mis primos, su apoyo y cariño en estos años. No puedo olvidarme tampoco de mis abuelos: Dionisio, Higinia y Feliciano, pues ellos han sido en numerosas ocasiones como unos segundos padres para mí, vuestro ejemplo y cariño es algo que ningún agradecimiento puede comparar.

Pero sin duda, quienes han sido los principales apoyos en estos años de tesis han sido mis padres: Jesús y Mari Carmen, así como mi hermano Javier. Muchas gracias por no dejar que nunca que dejase de soñar en este día en el que el trabajo y dedicación de estos años ha quedado materializado. Os debo mucho, sois ejemplo para muchos padres de que, aunque la situación pueda ser difícil, si crees en tu hijo y lo apoyas todo se consigue.

A continuación, llega la parte que a mí me produce un mayor nudo en la garganta, es el agradecimiento y dedicatoria más especial de esta tesis. Querido abuelo Lorenzo, es a ti a quien dedico esta tesis. Te fuiste muy pronto de mi vida, apenas tengo recuerdos tuyos, pero aquellos que guardo, los conservo como un tesoro. Se lo mucho que me querías y así lo demostrabas con esa devoción que sentías hacia mi cuando era pequeño. Durante toda tu existencia, tú también dedicaste tu vida al medio ambiente, trabajaste en Quintos de Mora como capataz, lugar donde yo, años más tarde haría mis prácticas de la carrera. Esta tesis, me permite llegar a ser doctor en Ciencias Ambientales, un logro que quiero compartir contigo, ahora más que nunca te siento cerca de mí.

Por último, solo me queda agradecer a todos aquellos que habéis caminado a mi lado en todos estos años, gracias por todos los momentos buenos vividos, pues los malos a veces es mejor desterrarlos y seguir hacia adelante. Gracias por todo.

*“No puede haber triunfo sin pérdida.
No hay victoria sin sufrimiento.
No hay libertad sin sacrificio”*

–JRR Tolkien



Financiación de la tesis

Esta tesis ha sido financiada principalmente por el contrato predoctoral para personal investigador en formación en el marco del Plan Propio de I+D+i, cofinanciado por el Fondo Social Europeo [2019/5964]. La Agencia Estatal de Investigación y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional, financiaron el proyecto nacional CGL2017-89583-R, que ha sido muy importante para el desarrollo de los tres capítulos de resultados de esta tesis doctoral.

La estancia predoctoral en el “Institute of Atmospheric Sciences and Climate of the National Research Council of Italy” (CNR-ISAC) fue financiada por la convocatoria de estancias en universidades y centros de investigación en el extranjero para personal docente e investigador de la Universidad de Castilla La Mancha [2021/12543].

El autor agradece a estas instituciones la financiación recibida.



Prefacio

*“Produce una inmensa tristeza
pensar que la naturaleza habla
mientras los hombres no escuchan”*

— Victor Hugo

Las ciencias ambientales son una disciplina científica que surgen de la necesidad de entender y conocer las relaciones que mantiene el ser humano con la naturaleza. Esta definición engloba una gran área de distintas ciencias que abarcan los diferentes elementos como el estudio de problemas ambientales y propuestas de desarrollo sostenible.

Dentro de las ciencias ambientales, una de las disciplinas más importantes son la meteorología y climatología. Estudiar ambas disciplinas dentro de lo que suponen las ciencias ambientales es fundamental para entender como la dinámica atmosférica influye en los cambios que se generan en el medio ambiente. Los avances en la investigación científica han demostrado que las actividades que ocurren dentro del medio ambiente también repercuten en la atmósfera dando lugar a una serie de retroalimentaciones que actúan cambiando las condiciones climáticas de todo el planeta.

En el último siglo, se ha observado que el incremento de la actividad industrial ha repercutido en un aumento de las cantidad de gases de efecto invernadero en la atmósfera, y esto no solo ha dado lugar a un aumento de los niveles de contaminación, sino también a un incremento global de la temperatura. A su vez, esto ha desencadenado una alteración en gran parte de los ecosistemas terrestres y marinos, que son muy sensibles al incremento de las temperaturas, dando lugar a una degradación y pérdida de la biodiversidad, llegándose a considerar el comienzo de un periodo de extinción masiva tanto de especies vegetales como animales.

*“La tierra no es una herencia de
nuestros padres, sino un préstamo de
nuestros hijos”*

—Mahatma Gandhi

Nuestra sociedad en muchas ocasiones entiende el problema del cambio climático como un conflicto que únicamente se encuentra asociado al incremento de las temperaturas, sin discernir que es un problema que genera innumerables conflictos que pueden ocasionar la degradación de nuestro entorno ambiental. No solo no entendemos

el problema, sino que también lo vemos como una cuestión en tiempo presente, y no valoramos que las decisiones y medidas que hoy adoptemos para intentar mitigar los posibles efectos del cambio climático serán esenciales para dejar un planeta a las generaciones futuras lo más habitable posible.

*“Los fenómenos naturales serán
cada vez más extremos”*

—Al Gore

Esta frase del ex vicepresidente de Estados Unidos, Al Gore, en su documental “una verdad incómoda”, fue una antesala a los resultados obtenidos en el cuarto informe del IPCC (del inglés, Intergovernmental Panel on Climate Change) en 2007, que ya señalaba que uno de los posibles efectos del cambio climático es el favorecimiento de fenómenos meteorológicos más extremos. El incremento de olas de calor, el aumento de la intensidad de ciclones tropicales o la disminución de los episodios de olas de frío, son solo un ejemplo de la larga lista de fenómenos meteorológicos que se han visto alterados por el aumento de las temperaturas.

Es en este punto en el que encontramos la principal motivación a la hora de realizar esta tesis, intentar entender y dar luz a los posibles cambios en clima futuro de ciclones con características tropicales en el Mediterráneo, los conocidos también como medicanes. En los últimos años se han realizado estudios que muestran que es esperable que estos ciclones puedan ser más intensos en condiciones de cambio climático. No obstante, aún existe mucha incertidumbre con respecto a ese posible cambio de intensidad, y por supuesto en los posibles efectos que puedan tener en gran parte de la cuenca del Mediterráneo, sobre todo en zonas costeras altamente pobladas.

Es un hecho de que el tiempo juega en nuestra contra, ya que a medida que pasan los años, se hace más difícil mitigar el posible aumento de las temperaturas. Por tanto, espero que este trabajo, aporte su pequeño granito de arena para concienciar a la población del peligro que puede tener un mundo futuro más cálido, y con un mayor número de fenómenos meteorológicos extremos.



Resumen

Introducción y motivación

El estudio y caracterización de ciclones en la cuenca mediterránea ha experimentado un auge en los últimos años. El impacto de medicanes (del inglés “MEDiterranean hurriCANES”) intensos sobre zonas de la costa mediterránea ha impulsado la investigación de los posibles efectos que puedan tener estos ciclones bajo condiciones de calentamiento global. A pesar del pequeño tamaño de los medicanes, el avance de las técnicas computacionales en los últimos años ha permitido el uso de modelos climáticos de alta resolución que posibilitan la detección y simulación de medicanes en condiciones de clima futuro. Los principales resultados de estos estudios muestran que es esperable una disminución de la frecuencia de medicanes y un posible aumento de su intensidad a finales del siglo XXI. Estas proyecciones se han realizado con modelos climáticos sin acoplamiento atmósfera-océano, y por ello están afectadas por la incertidumbre de los posibles efectos de dicho acoplamiento. Por tanto, es en el estudio de las proyecciones climáticas mediante modelos climáticos con acoplamiento atmósfera-océano donde encontramos uno de los aspectos principales de esta tesis.

Con el incremento de las mejoras informáticas y por lo tanto de la resolución espacial de los modelos climáticos, está aumentando fuertemente el volumen de datos de salida a almacenar. El método del espacio de fases de ciclones (CPS, del inglés “Cyclone Phase Space”) es una de las herramientas más utilizadas hoy en día para identificar y categorizar ciclones en base a su estructura térmica. Por tal razón, es uno de los métodos más empleados para detectar medicanes con modelos climáticos, aunque su cálculo hace necesario de la utilización de gran cantidad de datos. En consecuencia, otra cuestión tratada en esta tesis es la optimización del volumen de datos necesarios para la implementación del método del CPS, permitiendo un posible ahorro de recursos informáticos.

Objetivos

El presente trabajo aborda el estudio de proyecciones climáticas de medicanes mediante el uso de modelos acoplados atmósfera-océano, así como una optimización del método del CPS. En esta tesis se dan respuestas a preguntas concretas en cada uno de los tres capítulos del apartado de resultados. Los objetivos de cada capítulo pueden resumirse de la siguiente forma:

1. Evaluación del cambio de intensidad de medicanes en clima futuro mediante el uso de un modelo global de alta resolución con acoplamiento atmósfera-océano parcial
2. Análisis del impacto del uso de modelos con acoplamiento atmósfera-océano pleno en proyecciones de clima futuro de medicanes
3. Caracterización de medicanes con el menor número posible de niveles de geopotencial.

Resultados

En el primer trabajo se analiza la simulación climática de medicanes en clima futuro a partir de un modelo global parcialmente acoplado de alta resolución, bajo el escenario intermedio de emisiones RCP4.5. El modelo utilizado para este trabajo (HiFLOR) ha demostrado ser capaz de simular bien ciclones tropicales intensos en otras cuencas, lo que es una característica muy apropiada debido a que la mayoría de los modelos climáticos utilizados previamente en proyecciones de medicanes subestimaban su intensidad. Además, este trabajo supone una importante novedad al ser el primer estudio climático de medicanes realizado con un modelo global acoplado de alta resolución.

Los resultados de este estudio muestran que en condiciones de cambio climático es esperable una disminución de la frecuencia total de medicanes, a causa de un aumento de las condiciones de estabilidad en gran parte de la cuenca mediterránea. No obstante, aunque haya un menor número de ciclones en el futuro, es esperable que estos puedan ser más intensos y tener características tropicales más duraderas, sobre todo durante los meses de otoño. Entre los resultados más destacados de este estudio sobresale un aumento de la peligrosidad que pueden tener los medicanes en condiciones de cambio climático, en particular en zonas de la costa mediterránea altamente pobladas.

En el segundo trabajo, se ha realizado un estudio para analizar la influencia del acoplamiento atmósfera-océano pleno en proyecciones de medicanes con respecto a simulaciones realizadas con modelos no acoplados. Para ello, se ha llevado a cabo la comparación de un modelo regional acoplado pleno (ROM) con su componente regional atmosférica con condiciones oceánicas prescritas (REMO), que en este trabajo actúa como modelo no acoplado.

La motivación principal para realizar este estudio se encuentra en la posible existencia de retroalimentaciones negativas entre vientos fuertes (como los asociados a medicanes) y la temperatura superficial del mar. La principal hipótesis de este trabajo es que los modelos acoplados pueden ser capaces de simular dichas retroalimentaciones, a diferencia de los modelos no acoplados, dando lugar a una simulación más realista de medicanes.

Los principales resultados de este trabajo muestran que tanto el modelo no acoplado como el acoplado proyectan una disminución significativa del número de medicanes en clima futuro, bajo el escenario de máximas emisiones del quinto informe

del IPCC (RCP8.5). No obstante, las mayores diferencias entre modelos acoplados y no acoplados se encuentran en el estudio de la intensidad de estos ciclones, donde se puede ver que el modelo acoplado experimenta un aumento de la frecuencia relativa de los medicanes más intensos, mientras que el modelo no acoplado no muestra cambios significativos.

En este estudio, encontramos que el uso del modelo acoplado (ROM) parece ser que podría ser capaz de simular las retroalimentaciones negativas entre vientos fuertes y temperatura superficial del mar, evitando la simulación de ciclones intensos (no observados) en verano. Este trabajo puede servir de base a futuras investigaciones de medicanes con conjuntos de varios modelos acoplados, con el fin de ver si los resultados pueden ser extrapolados a otros modelos acoplados.

El tercer problema estudiado en este documento se centra en el efecto de reducir la cantidad de niveles de geopotencial utilizados en la caracterización de ciclones mediante el uso del método del espacio de fases de ciclones (CPS). Este método es usado en muchos trabajos de climatología de ciclones para clasificarlos en base a su estructura térmica, aunque uno de los principales problemas que tiene este método es la gran cantidad de datos necesarios para su cálculo. La novedad de este trabajo es intentar reducir la cantidad de datos de entrada que son utilizados para aplicar el método CPS.

A fin de resolver esta cuestión, se han utilizado datos del reanálisis ERA5 (1979-2018) para realizar un análisis comparativo entre el método original del CPS, que utiliza 13 niveles de geopotencial, y distintas configuraciones modificadas usando menor número de niveles de geopotencial. El análisis de sensibilidad realizado para detectar diferencias entre la frecuencia anual y mensual, la distribución espacial y la intensidad de medicanes muestra que las mejores configuraciones optimizadas son la configuración de cinco niveles y la de cuatro niveles que incluye el nivel de 600 hPa. Dada la menor cantidad de datos necesarios, es recomendable el uso de la configuración optimizada de cuatro niveles que incluye el nivel de 600 hPa. Este trabajo aporta una herramienta eficiente para poder detectar medicanes con el método CPS en simulaciones de alta resolución espacial ahorrando altos costes computacionales.



Abstract

Introduction and motivation

The study and characterization of cyclones over the Mediterranean basin has grown in recent years. The impact of intense medicanes (“MEDIterranean hurriCANES”) on areas of the Mediterranean coast has increased the investigation about the possible changes in characteristics that these cyclones may have under global warming conditions. Despite the small size of medicanes, advances in computational techniques in recent years have permitted the use of high-resolution climate models that enable the detection and simulation of medicanes under future climate conditions. The main results of these studies show that a decrease in the medicanes frequency and a possible increase in its intensity is expected by the end of the 21st century. These projections have been performed with climate models without atmosphere-ocean coupling and therefore, they are affected by the uncertainty of possible coupling effects. For that reason, it is in the study of climate projections using climate models with atmosphere-ocean coupling where we find one of the main aspects of this thesis.

With the increase in computing improvements and therefore in the spatial resolution of climate models, the volume of output data is increasing strongly. The cyclone phase space (CPS) method is one of the most widely used tools to identify and categorize cyclones based on their thermal structure. For this reason, it is one of the most used methods to detect medicanes with climate models, although its calculation requires the use of large amounts of data. Consequently, another issue addressed in this thesis is the optimization of the volume of data necessary for the implementation of the CPS method, allowing a possible saving of computing resources.

Objectives

The present work addresses the study of climate projections of medicanes through the use of coupled atmosphere-ocean models, as well as an optimization of the CPS method. In this thesis, answers to specific questions are given in each of the three chapters of the results section. The objectives of each chapter can be summarized as follows:

1. Evaluation of intensity changes of medicanes in future climate by using a high-resolution global model with partial atmosphere-ocean coupling.
2. Analysis of the impact of the use of models with full atmosphere-ocean coupling in projections of medicanes in future climate.
3. Characterization of medicanes with the lowest possible number of geopotential levels.

Results

In the first work, the climate simulation of medicanes in future climate is analysed from a partially coupled high-resolution global model, under the intermediate emission scenario RCP4.5. The model used for this work (HiFLOR) has demonstrated to be able to simulate well intense tropical cyclones in other basins. Therefore, this model is a very appropriate to identify medicanes because most of the climate models previously used in medicane projections underestimated their intensity. In addition, this work represents an important novelty as it is the first climate study of medicanes performed with a high-resolution coupled global model.

The results show that under climate change conditions, a decrease in the total frequency of medicanes is expected. One possible cause of this decline may be an increase in stable conditions in a large extent of the Mediterranean basin. However, even if there are fewer medicanes in the future, it is expected that these cyclones could be more intense and they have more lasting tropical characteristics, especially during the autumn months. Among the most important results of this study, it is essential to emphasise an increase in the destructiveness that medicanes may have in climate change conditions, particularly in highly populated areas of the Mediterranean coast.

In the second work, a study has been performed to analyse the influence of the full atmosphere-ocean coupling in medicane projections, with respect to simulations performed with uncoupled models. To do this, the comparison of a fully coupled regional model (ROM) with its regional atmospheric component with prescribed ocean conditions (REMO), which in this work acts as a non-coupled model, has been performed.

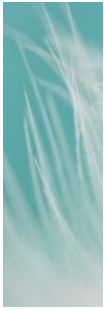
The main motivation to perform this study is the possible existence of negative feedbacks between strong winds (such as the winds associated with medicanes) and the sea surface temperature. The main hypothesis is that coupled models may be able to simulate these feedbacks, unlike non-coupled models. This difference could lead to a more realistic simulation of medicanes.

The main results of this work show that both uncoupled and coupled models simulate a significant decrease of the medicane number in future climate, under the scenario of maximum emissions of the fifth IPCC report (RCP8.5). However, the greatest differences between coupled and uncoupled models are found in the intensity study of these cyclones, where the coupled model has an increase in the relative frequency of the most intense medicanes, while the uncoupled model does not show significant changes.

In this study, we find that the use of the coupled model (ROM) seems to be able to simulate the negative feedbacks between strong winds and sea surface temperatures, avoiding the simulation of intense (unobserved) cyclones in summer. This work could be used as the basis for future investigations of medicanes with a set of several coupled models, in order to see if the results can be extrapolated to other coupled models.

The third problem studied in this paper focuses on the effect of reducing the number of geopotential levels used in the CPS method. This method is used in many cyclone climatology works to classify them based on their thermal structure, nonetheless, one of the main problems is the large amount of data required for its calculation. The novelty of this work is to try to reduce the amount of input data that is used to apply the CPS method.

The sensitivity analysis performed to detect differences between annual and monthly frequency, spatial distribution and medicane intensity shows that the best optimized configurations are the five-level configuration and the four-level configuration that includes the 600 hPa level.



Contenido

Contenido	xix
Acrónimos	xxiii
INTRODUCCIÓN	1
Contexto e introducción	3
1.1 Extremos climáticos en el Mediterráneo.....	3
1.2 Ciclones en el Mediterráneo: características.....	5
1.3 Principales procesos que afectan a ciclones mediterráneos.....	7
1.4 Tipos de ciclones en la cuenca mediterránea.....	12
1.5 Proyecciones climáticas de ciclones mediterráneos.....	14
1.6 Organización del documento	16
Estado del conocimiento	17
2.1 Antecedentes en el estudio y definición de medicanes.....	17
2.2 Desarrollo de medicanes	20
2.3 Impacto de medicanes.....	23
2.4 Efectos de la interacción atmósfera-océano en medicanes	25
2.5 Progresos en la caracterización climática de medicanes en el Mediterráneo	28
2.6 Proyecciones de medicanes en clima futuro.....	30
2.7 Objetivos generales	32
DATOS Y METODOLOGÍA	35
Datos	37
3.1 Datos de reanálisis.....	37

3.2 Modelos climáticos	40
Metodología	45
4.1 Herramientas de diagnóstico e identificación de medicanes	45
4.2 Procesamiento de datos.....	49
RESULTADOS	53
Potential Increase in Hazard From Mediterranean Hurricane Activity With Global Warming	55
5.1 Introduction.....	57
5.2 Methods.....	58
5.3 Results and discussion.....	61
5.4 Conclusions	67
5.A Supporting information	67
Impact of ocean–atmosphere coupling on future projection of medicanes in the Mediterranean sea.....	73
6.1 Introduction.....	75
6.2 Methodology	77
6.3 Results	79
6.4 Concluding remarks.....	88
6.5 Supplementary information	89
Characterization of medicanes with a minimal number of geopotential levels.....	91
7.1 Introduction.....	93
7.2 Methodology	95
7.3 Results and discussion.....	97
7.4 Summary and Conclusions.....	111
7.5 Supplementary information	112

DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	113
Discusión, conclusiones y trabajo futuro	115
Discussions, conclusions and future work	123
Bibliografía.....	129
Índice de figuras.....	149
Índice de Tablas.....	155
Listado de las publicaciones y contribuciones a congresos relacionadas con esta tesis doctoral	157



Acrónimos

ACC Anthropogenic Climate Change

AOGCM Atmosphere/Ocean General Circulation Model or Atmosphere/Ocean Global Climate Model

BIC Bayesian Information Criterion

CCB Cold Conveyor Belt

CORDEX Coordinated Regional Downscaling Experiment

CPS Cyclone Phase Space

DI Dry air Intrusion

EAWR East Atlantic/ Western Russia

EC Extratropical Cyclone

ECHAM European Centre Hamburg Model

ECMWF European Centre for Medium Range Forecasts

ERA-40 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Re-Analysis 40

ERA5 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Re-Analysis of 5th generation

FLOR Forecast-Oriented Low Ocean Resolution

GGMs Global Climate Models

GFDL Geophysical Fluid Dynamics Laboratory

HadAM3H Hadley Centre atmospheric global climate model

HadGEM3-GA3 Hadley Centre Global Environment Model in the Global Atmosphere configuration (3th version)

HAMOCC Hamburg ocean carbon cycle model

HD global hydrological discharge model

HiFLOR High-Resolution Forecast-oriented Low Ocean Resolution model

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change

JMA Japan Meteorological Agency

JRA-55 Japanese 55-year Reanalysis

MEDICANES MEDiterranean hurriCANES

MERRA Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications

MPI-ESM-LR Max-Planck-Institute Earth System Model of Low resolution

MPI-ESM-MR Max-Planck-Institute Earth System Model of Medium resolution

MPIOM Max Planck Institute ocean model

MSLP Mean-Sea Level Pressure

NAO North Atlantic Oscillation

NASA National Aeronautics and Space Administration National Aeronautics and Space Administration

NCAR National Center for Atmospheric Research

NCEP National Centers for Environmental Prediction. National Center.

N512 HadGEM3- GA3 N512 atmosphere-only configuration of the HadGEM3-GA3

OASIS3 coupler Ocean Atmosphere Sea Ice Soil (3th version)

PDI Power Dissipation Index

PV Potential Vorticity

RCMs Regional Climate Models

RCP Representative Concentration Pathways

REMO atmospheric REgional MOdel

ROM Regionally Coupled Atmosphere-Ocean-Marine Biogeochemistry Model

SRES Special Report on Emissions Scenarios

SST Sea Surface Temperature

TC Tropical Cyclone

TI Tropicality Index

U.S. United States

WCB Warm Conveyor Belt

PARTE I

INTRODUCCIÓN

1

Contexto e introducción

1.1 Extremos climáticos en el Mediterráneo

La cuenca mediterránea ha sido siempre una de las zonas del mundo que mayor interés climático ha tenido a lo largo de la historia de la humanidad por ser una de las regiones más pobladas del planeta. Los primeros asentamientos en la región del Mediterráneo han sido datados hace más de 12.000 años en zonas costeras del Mediterráneo oriental (Zeder, 2008). Desde entonces la población en esta área no ha dejado de crecer. En la actualidad, la cuenca del Mediterráneo es una de las zonas del mundo más densamente poblada. La mayoría de los países mediterráneos presentan grandes núcleos urbanos cerca del mar que superan la densidad de los 100 habitantes/ km^2 , siendo las zonas más densamente pobladas las costas italianas, zonas del levante español y sur de Francia (Jonard et al., 2009).

La cuenca del Mediterráneo está considerada como un “hot spot” de cambio climático (Ruti et al., 2016; Allan et al., 2021). Esto quiere decir que esta región del planeta se encuentra especialmente sujeta a las alteraciones provocadas por el calentamiento global (Giorgi & Lionello, 2008). Según el primer Informe sobre cambio climático y medio ambiente del Mediterráneo por el Grupo de Expertos de cambio climático y ambiental del Mediterráneo, es esperable un escenario futuro en los próximos años de fuertes cambios (Cramer et al., 2020): “Las frecuentes sequías se alternarán con episodios de precipitaciones torrenciales que afectarán directamente a las actividades humanas y el medio natural (López Ortiz et al., 2020). Sin embargo, resulta igual de importante atender a los posibles efectos indirectos como la proclividad y vulnerabilidad de los ecosistemas ante incendios (Knelman et al., 2019), la pérdida del suelo por procesos erosivos tras fuertes lluvias, la transmisión de enfermedades o la pérdida de cultivos y biodiversidad”.

A pesar de su pequeño tamaño, la cuenca mediterránea es una región que presenta una geografía bastante compleja. Ésta se caracteriza por ser una cuenca semicerrada (solo posee una zona de intercambio de agua con el océano Atlántico por el estrecho de Gibraltar), y que además posee un escarpado relieve, con montañas de gran altitud rodeando toda la cuenca. Este entorno hace que la región mediterránea sea una de las zonas del hemisferio norte con mayor número de ciclogénesis (p. ej., Trigo et al., 1999; Ulbrich et al., 2009)

Esta área presenta una gran variedad de mecanismos favorables para el desarrollo de ciclones como son: el abrupto relieve, la elevada humedad relativa, la inestabilidad baroclínica propia de latitudes medias y la temperatura del mar Mediterráneo (p. ej., McGinley, 1982; Michaelides et al., 1999). Por tanto, se puede decir que la cuenca mediterránea es bastante propensa a la ocurrencia de ciclones con una amplia gama de características tanto de tamaño como de intensidades (Ulbrich et al., 2012).

A pesar de que en general, los ciclones mediterráneos presentan un tamaño pequeño (500 km de radio medio; Trigo et al., 1999), éstos tienen un gran impacto y son los principales responsables de la gran mayoría de eventos climáticos extremos de viento y precipitación que afectan a amplias zonas de la cuenca (Jansa et al., 2014), así como de inundaciones, deslizamientos de tierras y fuerte oleaje (p. ej., De Zolt et al., 2006; Liberato et al., 2011; Ulbrich et al., 2012; Pinto et al., 2013). En las últimas décadas, las principales investigaciones acerca del estudio de ciclones mediterráneos no solo se han centrado en los aspectos meteorológicos y climáticos que estos fenómenos tienen, sino que también se han realizado numerosos estudios medioambientales y socioeconómicos con el objetivo de intentar entender y prevenir los posibles impactos que puedan ocasionar este tipo de fenómenos (Lionello et al., 2014).

En el contexto actual de cambio climático, los ciclones mediterráneos tienen un papel crucial. Son muchos los estudios (p. ej., Anagnostopoulou et al., 2006; Raible et al., 2010) que muestran que, debido a los cambios en la circulación global atmosférica provocada por el aumento de las temperaturas, es esperable que haya una menor frecuencia de ciclones en la zona de la cuenca mediterránea (Nissen et al., 2010), aunque también son esperables cambios en su intensidad, donde diferentes estudios muestran un aumento de los valores máximos de viento y precipitación asociados a estos ciclones (Giorgi & Lionello, 2008; Zappa et al., 2015; Ruti et al., 2016).

Desde finales de la década de los 2000, se han incrementado mucho los trabajos con modelos climáticos en clima futuro (p. ej., Lionello et al., 2002; Ulbrich et al., 2009), desde los primeros trabajos con modelos globales atmosféricos de baja resolución (p. ej., Lionello et al., 2002), el desarrollo de modelos regionales de clima, siguiendo, hasta la actualidad con la incorporación de modelos con alta resolución horizontal y acoplamiento atmósfera-océano (p. ej., Walsh et al., 2014; Tous et al., 2016; Gaertner et al., 2018). Con el avance de las mejoras computacionales y técnicas (p. ej., satélites) en la detección de ciclones, un tipo raro de intensos ciclones empezó a centrar el interés de gran parte de la comunidad científica en la región mediterránea (Pytharoulis et al., 1999). Estos ciclones de pequeño tamaño y estructura asimétrica presentaban un comportamiento parecido a los ciclones tropicales, y además dejaban un alto impacto. Tras años de estudio se comenzaron a catalogar a estos ciclones como MEDICANES (del inglés "MEDiterranean hurriCANES"; Emanuel, 2005a). Hoy en día, la necesidad de estudiar y entender este tipo de ciclones en el contexto de cambio climático es realmente importante para intentar ser capaces de poder predecir su impacto en el Mediterráneo (Bakkensen, 2017; Scicchitano et al., 2021).

1.2 Ciclones en el Mediterráneo: características

La cuenca mediterránea se encuentra localizada en una zona considerada de transición entre las altas presiones subtropicales y la circulación de ciclones provenientes de la cuenca atlántica. Estos ciclones atlánticos en muchos casos son precursores de inestabilidad baroclínica en el Mediterráneo y por tanto a su vez, facilitan el desarrollo de los ciclones en la cuenca mediterránea (Trigo et al., 1999).

Los ciclones mediterráneos se caracterizan por ser ciclones extratropicales de corto ciclo de vida (28 horas de tiempo de vida medio) y pequeño tamaño en comparación con los ciclones que se desarrollan en zonas del océano Atlántico a la misma latitud (Trigo et al., 1999). El 65% de los ciclones mediterráneos se encuentran dentro la escala subsinóptica debido a que presentan un radio medio de 500 km. Estos ciclones son responsables de la mayoría de los eventos extremos climáticos en esta región como son fuertes precipitaciones (Jansa et al., 2001), vientos intensos (Givon et al., 2021), fuertes mareas ciclónicas (Cavaleri et al., 2020) o episodios de polvo en suspensión (Kalkstein et al., 2020).

Diferentes estudios (p. ej., Trigo et al., 1999; Maheras et al., 2001; Picornell et al., 2001; Campins et al., 2011; Flaounas et al., 2022) muestran que la frecuencia de ciclones en el Mediterráneo presenta un marcado carácter estacional. La gran cantidad de ciclogénesis que se producen en esta región del planeta hacen muy difícil cuantificar el número total de ciclones por año. Según el estudio de Campins et al. (2011) en la cuenca mediterránea se pueden dar 1817 centros de bajas presiones por año de media. No obstante, algunos estudios apuntan que, si consideramos solo los ciclones más intensos, esta frecuencia se reduce a unos 200 a 300 ciclones por año (Maheras et al., 2001; Bartholy et al., 2009), siendo el mar Tirreno y el mar Adriático las regiones que mayor génesis de ciclones intensos presentan con 30 ciclones por año (Homar et al., 2006).

Como ocurre con los ciclones que se forman en la región del Atlántico nororiental (p. ej., Dacre & Gray, 2009; Ulbrich et al., 2009), la mayor frecuencia estacional de ciclones en el Mediterráneo ocurre durante los meses de invierno (ver figura 1.1). Esto es debido a que, durante esta época del año, la corriente en chorro extratropical desciende hacia los valores más bajos de latitud (Strong & Davis, 2007), y esto provoca que las condiciones atmosféricas para el desarrollo de ciclones sean más propicias. Las zonas que presentan condiciones más favorables para procesos ciclogénicos en los meses de invierno son zonas cercanas al golfo de Génova, mar Tirreno y mar Adriático (Alpert et al., 1990), donde la conjunción del relieve escarpado de los Alpes, junto con los vientos del noroeste que chocan en ellos, favorece que en zonas de la cara sur de la cordillera alpina se desarrollen ciclones con mayor frecuencia que en otras partes de la región mediterránea (p. ej., Trigo et al., 1999; Ulbrich et al., 2012; Reale & Lionello, 2013).

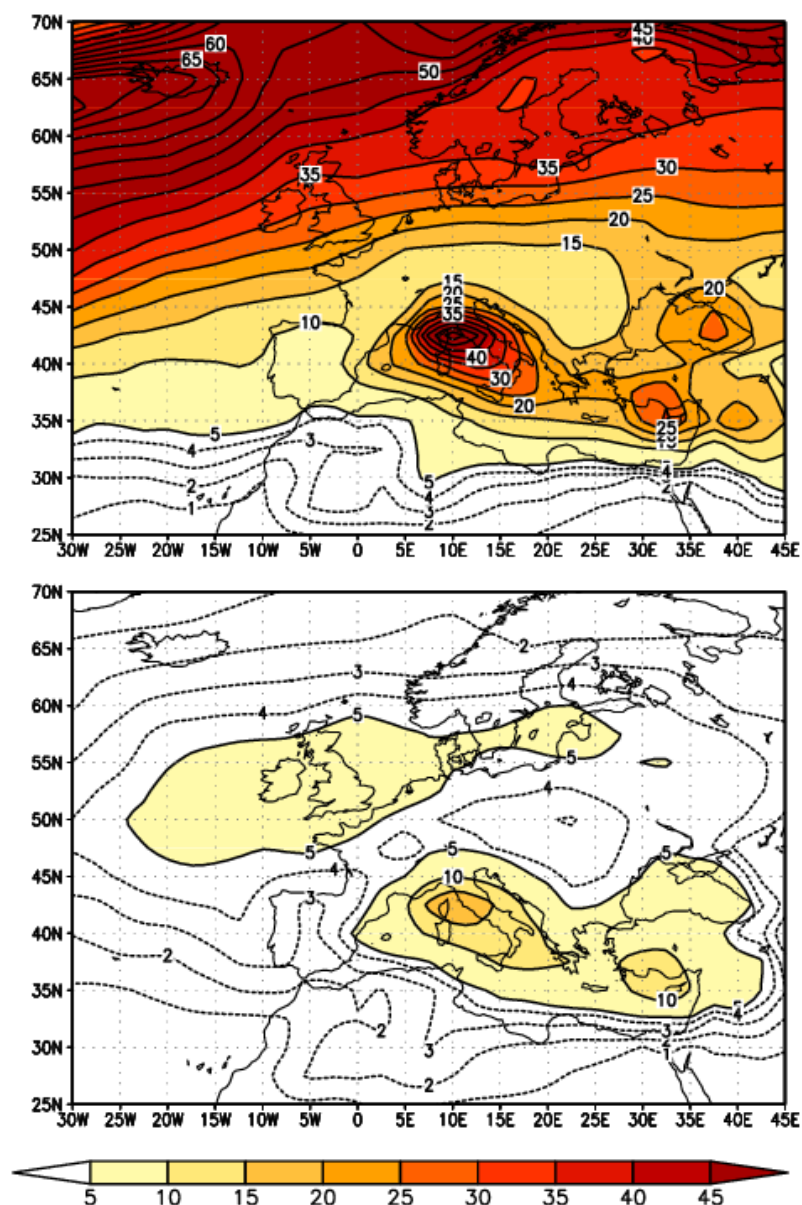


Figura 1.1. Densidad de trayectoria de ciclones en valor medio de ciclones durante la temporada de invierno (1957–2002). En la parte de arriba para todos los ciclones. En la parte de abajo para los ciclones que causan episodios de fuerte viento en el Mediterráneo. Figura extraída del trabajo de Nissen et al. (2010).

Los meses de otoño y primavera pueden ser considerados como meses de transición entre las condiciones atmosféricas típicas de verano (presencia de altas presiones subtropicales en gran parte de la cuenca) y las de invierno (Flaounas et al., 2022). En estos meses encontramos una frecuencia de ciclones algo más baja que durante a los meses de invierno, siendo las zonas del norte del Mediterráneo aquellas que presentan un mayor número de ciclones. No obstante, en los meses de primavera, es posible encontrar un máximo relativo ciclogénético en zonas cercanas a la cordillera del Atlas (Thorncroft & Flocas, 1997), donde es posible observar la génesis de ciclones en zonas de sotavento del Atlas que se desplazan por el sur del Mediterráneo hasta zonas del Mediterráneo oriental.

Durante los meses de verano, la frecuencia de ciclones tiene sus valores más bajos del ciclo estacional. En esos meses, la aparición de altas presiones subtropicales en gran parte de la cuenca mediterránea hace que los procesos de ciclogénesis sean menores que durante el resto del año (Ulbrich et al., 2009). Por otro lado, encontramos zonas donde es más frecuente el desarrollo de bajas presiones, como es el caso de zonas cercanas a la Península Ibérica, Chipre y Argelia. Estas bajas que se desarrollan en las zonas anteriormente mencionadas durante los meses de verano son llamadas “bajas térmicas” (Hoinka & de Castro, 2003). Este término se refiere a débiles perturbaciones que se generan debido a las altas temperaturas veraniegas en tierra. En cuanto a sus características, son bajas que en la mayoría de las veces no llevan asociada precipitación y además sus vientos no suelen ser muy intensos (Trigo et al., 1999).

1.3 Principales procesos que afectan a ciclones mediterráneos

Los ciclones mediterráneos se desarrollan principalmente debido a procesos de inestabilidad baroclínica, pero a su vez, pueden estar afectados por procesos diabáticos al igual que ocurre con otros ciclones extratropicales de latitudes medias (Flaounas et al., 2022). Los cambios en las fuentes de energía del ciclón producen variaciones en su desarrollo y ciclo de vida, y pueden estar influenciados por cambios de circulación de gran escala, variabilidad de la influencia de las distintas masas de aire en el ciclón, interacción entre los procesos diabáticos y adiabáticos, y la influencia de la orografía. En esta sección, se van a comentar todos estos procesos de forma más detallada.

1.3.1 Influencia de la circulación de gran escala en los ciclones mediterráneos

Una de las principales causas de la formación de ciclones en el Mediterráneo suele ser la desviación hacia el sur de la corriente en chorro polar (Nicolaidis et al., 2006; Campins et al., 2011). Esto produce el desplazamiento de masas de aire con gran vorticidad potencial (PV) en la alta troposfera hacia zonas del Mediterráneo. Cuando estas masas de aire entran en contacto con zonas del mar Mediterráneo e interaccionan con masas de aire relativamente más cálidas localizadas en la superficie del mar y en el norte de África, esto provoca que se genere un gran gradiente horizontal de temperatura. Este gradiente térmico da lugar a inestabilidad baroclínica y que por tanto ocurra un proceso de ciclogénesis extratropical.

En base a esto, es esperable que para el desarrollo de ciclones en el Mediterráneo sea necesario que haya una situación de intrusión de aire frío en altura proveniente de latitudes más septentrionales, y, por tanto, esta región se encuentra muy influenciada por los diferentes cambios en la circulación atmosférica de gran escala del hemisferio norte. Algunos estudios (p. ej., Pinto et al., 2009; Woollings & Blackburn, 2012; Ionita, 2014) muestran que la frecuencia e intensidad de los ciclones en la cuenca mediterránea se encuentran muy relacionadas con los distintos patrones de teleconexiones que afectan a zonas de Europa, dando lugar a una gran variabilidad (Nigam & Baxter, 2015).

No todos los patrones de teleconexión tienen la misma influencia en todo el Mediterráneo. En la cuenca mediterránea occidental (Woollings & Blackburn, 2012), encontramos que el patrón de teleconexión que más afecta a esta región es la oscilación del Atlántico norte (NAO, del inglés "North Atlantic Oscillation"). Este índice describe los cambios en la fuerza de dos tipos de patrones de presión recurrentes en el Atlántico norte. El primero de ellos es el centro de bajas presiones que se sitúa cerca de la zona de Islandia y el segundo es la zona de altas presiones subtropicales cercanas a las islas Azores (Feldstein, 2000). Valores positivos de la NAO indican que tanto la baja de Islandia como el anticiclón de las Azores son bastante fuertes y por tanto encontramos un fuerte gradiente de presión entre ambos (ver figura 1.2). Mientras que valores negativos de este índice, indican que tanto la baja presión de Islandia como el anticiclón subtropical de las Azores son débiles, lo que provoca que el gradiente de presión sea menor entre ambos sistemas, o incluso inviertan su posición.

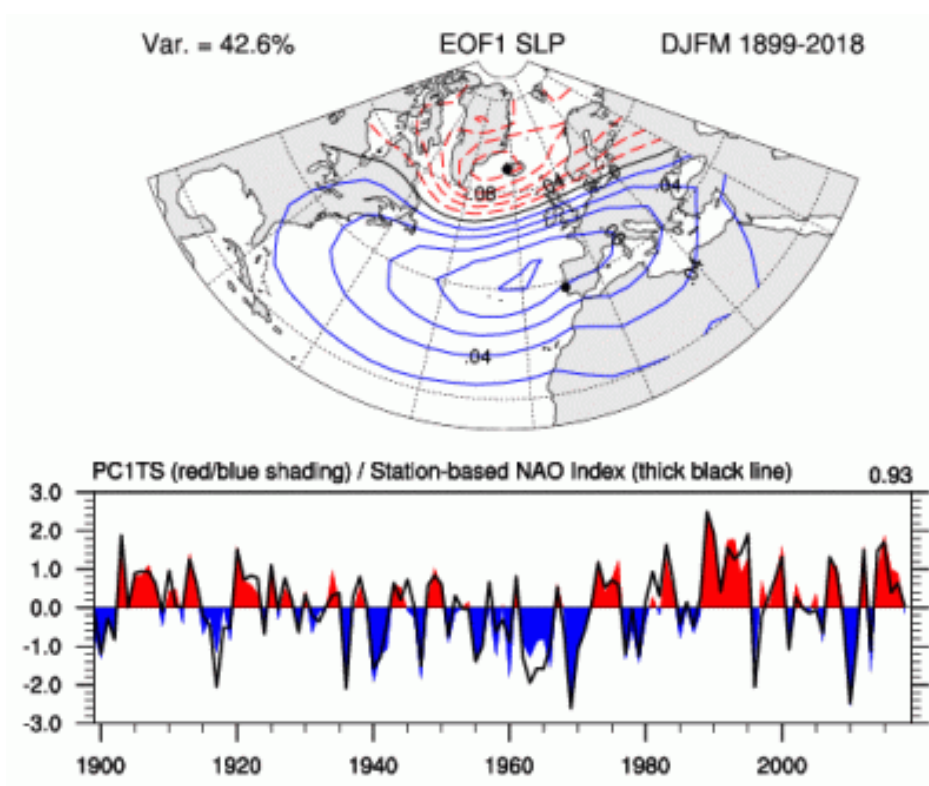


Figura 1.2. Cambios del patrón de teleconexión de la NAO desde 1988 hasta 2022. Figura extraída de la página web de la NOAA (<https://www.noaa.gov/>).

Por tanto, en base a este índice, cuando se alcanzan valores positivos (NAO+), las bajas presiones afectan con mayor frecuencia a zonas del norte de Europa, mientras que las altas presiones afectan con mayor impacto a zonas del sur de Europa, es decir, hay menor frecuencia de ciclones en zonas del Mediterráneo occidental (Pinto et al., 2009). Por el contrario, valores negativos se traducen en mayor probabilidad de encontrar bajas presiones en zonas del sur de Europa. Dentro de la cuenca mediterránea, la zona que presenta una mayor correlación entre este índice y la frecuencia de ciclones es la región mediterránea occidental (Lionello et al., 2014).

En zonas del centro-este de la cuenca mediterránea se observa que el patrón de teleconexión que más influencia tiene es el del Atlántico oriental–oeste de Rusia (EAWR, del inglés "East Atlantic/ Western Russia "; Ionita, 2014). Este patrón de teleconexión describe los cambios en la intensidad de centros de altas presiones sobre Europa y el oeste de Rusia frente a la presencia de bajas presiones sobre el centro del Atlántico norte y norte del mar Caspio. Durante la fase positiva de este índice, se observa que los centros de altas y bajas presiones son más fuertes y por tanto el gradiente de presión entre ambos es mayor, provocando condiciones de precipitaciones más intensas en zonas del este de China y zonas del este del Mediterráneo, mientras que en zonas de Europa central y región occidental del Mediterráneo encontramos condiciones más secas.

Por otro lado, diversos estudios (p. ej., Nissen et al., 2010; Hofstätter & Blöschl, 2019) indican que valores positivos tanto de NAO como de EAWR muestran un incremento de la frecuencia de ciclones en zonas del este del Mediterráneo, mientras que, en zonas del oeste de la cuenca, encontramos una menor frecuencia. Esta situación es contraria si encontramos valores negativos tanto de NAO como de EAWR, dando lugar a una mayor frecuencia de ciclones en la región occidental del Mediterráneo.

Los patrones de teleconexión son más fuertes durante el invierno, debido a que los centros de bajas y altas presiones son más intensos. En los últimos años, algunos estudios como el de Dong et al. (2013) muestran que los patrones de teleconexión pueden tener un impacto diferente si se produce una fase negativa o positiva en verano. Este estudio muestra que un patrón negativo de NAO durante el verano puede asociarse a una situación de mayor estabilidad y escasez de precipitación en gran parte de la cuenca mediterránea (sobre todo región occidental y central), por tanto, también es esperable una menor frecuencia de ciclones, mientras que en zonas de la cuenca oriental del Mediterráneo encontraremos una mayor frecuencia de ciclones y por tanto condiciones de humedad y precipitación más elevadas.

1.3.2 Influencia de las distintas masas de aire

La organización de los distintos tipos de masas de aire dentro de un ciclón es esencial para determinar su ciclo de vida y su posible intensidad. Dentro de un ciclón podemos encontrar diferentes organizaciones de masas de aire según el modelo conceptual de cinta transportadora de Carlson (1980), que introdujo la idea de que los ciclones extratropicales presentan tres tipos de corrientes de aire de distinta naturaleza dentro del ciclón como se muestra en la figura 1.3. Estas masas de aire se organizan en las siguientes cintas transportadoras:

- **Cinta transportadora cálida (WCB, del inglés "Warm Conveyor Belt"):** es una corriente de aire cálido y húmedo que se origina en superficie y asciende hacia el centro del ciclón, esta masa de aire se produce en la parte delantera del sector cálido de un ciclón extratropical, entre la zona de separación del frente cálido y el frío. Las WCBs son las principales responsables del flujo generador de nubes y precipitaciones en los ciclones extratropicales, y pueden estar asociados a episodios de precipitaciones extremas.

- **Cinta transportadora fría (CCB, del inglés "Cold Conveyor Belt"):** es una corriente de aire frío que se origina en superficie y está localizada al norte del WCB. La CCB fluye hacia el oeste de la baja por debajo de la WCB hacia el centro del ciclón. Esta corriente transfiere aire frío de la parte delantera del ciclón hacia el centro.
- **Cinta transportadora seca (DI; del inglés "Dry air Intrusion"):** es una corriente de aire frío y seco, que se origina en altura en zonas de la alta troposfera y que luego fluye hacia la parte posterior del ciclón, situándose a la izquierda del frente frío. El DI está asociado con una capa de aire relativamente profunda de baja humedad relativa y es importante para ayuda a mantener el contraste de temperatura a lo largo del frente frío, favoreciendo que este pueda ser más intenso.

La interacción e intensidad de estas corrientes están muy relacionadas con la intensidad de los ciclones en el Mediterráneo. Estudios como el de Flaounas et al. (2015) muestran que algunos de los ciclones más intensos en los últimos 20 años tenían la presencia de cintas transportadoras de corrientes cálidas (WCB) y secas (DI) intensas. La interacción entre la cinta transportadora cálida con respecto a la seca es clave para que la intensidad en los ciclones sea elevada, la WCB aporta masas de aire muy cálidas y cargadas de humedad al centro de ciclón, lo que unido a una DI intensa ayuda a que se mantenga el contraste térmico del ciclón y por tanto sea más fácil una fuerte intensificación del ciclón (Binder et al., 2016; Raveh-Rubin & Wernli, 2016).

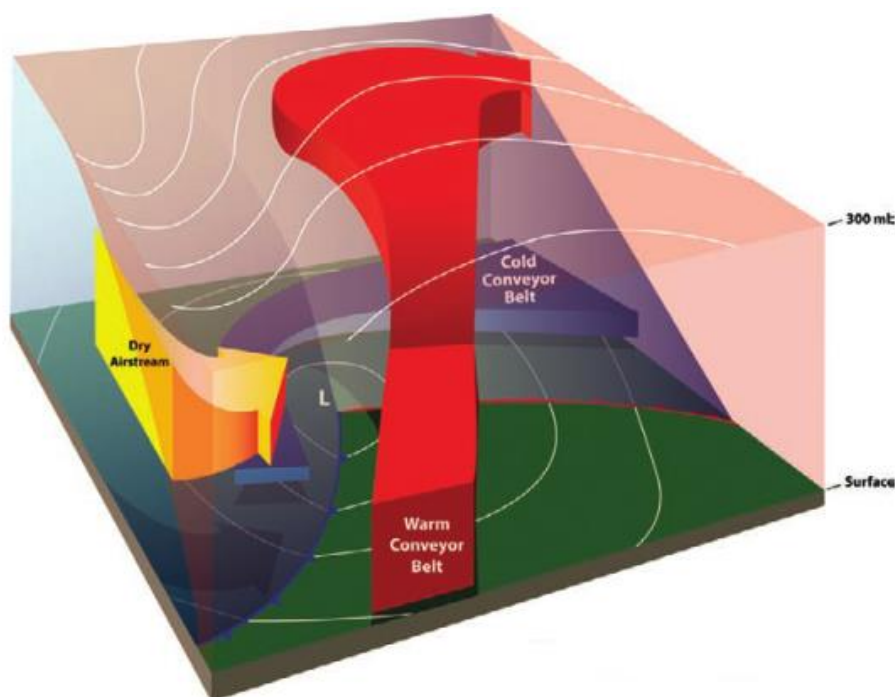


Figura 1.3. Esquema de modelo de cinta transportadora cálida (roja), fría (azul) y seca (amarilla). Figura extraída del trabajo de Schultz & Vaughan (2011).

Algunos estudios, muestran que si el aporte de aire cálido y húmedo es muy intenso es posible que el ciclón comience a tener procesos de convección profunda e incluso empezar a tener núcleo cálido (Flaounas et al., 2018). El estudio de Kouroutzoglou et al. (2021) muestra que ciclones muy intensos pueden llegar a convertirse en ciclones con características tropicales como fue el caso del medicane Zorbas en 2018.

1.3.3 Interacción de los procesos adiabáticos-diabáticos

Aunque como se ha comentado anteriormente, los procesos baroclínicos son los principales responsables del desarrollo inicial de los ciclones mediterráneos, la presencia de flujos de calor latente liberados por convección puede favorecer la intensificación del ciclón (Bjerknes, 1951). Por tanto, la interacción entre los procesos baroclínicos y los procesos diabáticos, son claves para poder comprender el ciclo de vida de un ciclón.

En general, se observa que, durante las primeras fases de vida de un ciclón mediterráneo, los procesos adiabáticos son más fuertes, y a medida que el ciclo de vida del ciclón avanza puede ser que ocurra que los procesos adiabáticos pierdan intensidad y por el contrario los procesos diabáticos comiencen a ser más importantes (Binder et al., 2016). Esto ocurre cuando los flujos oceánicos de calor latente que recibe un ciclón favorecen procesos de intensa convección y por tanto el gradiente horizontal de temperatura y los procesos baroclínicos comiencen a disminuir (Davis & Bosart, 2004).

En algunos trabajos realizados sobre la interacción entre los procesos diabáticos y adiabáticos se observa que existe una correlación negativa entre ambas fuentes de energía, suele ocurrir que cuando una fuente de energía es más intensa, la otra tiende a ser más débil pero nunca a coexistir con la misma tendencia de intensidad (Flaounas et al., 2021).

En general, se observa que, en la mayoría de los ciclones mediterráneos, los procesos adiabáticos son los más importantes (Galanaki et al., 2016). No obstante, en los ciclones en los que se observan fuertes procesos convectivos se muestra que es crucial la interacción atmósfera-océano, debido a que puede favorecer o inhibir los procesos de convección profunda y por tanto, el posterior desarrollo de ciclones que en algunos casos puedan tener características tropicales (Gaertner et al., 2018).

1.3.4 Influencia de la orografía

La cuenca mediterránea presenta un relieve muy abrupto. La presencia de grandes sistemas montañosos como son la cordillera de los Alpes al norte y la cordillera del Atlas al sur provoca que los procesos de ciclogénesis puedan ser potenciados por la escarpada orografía, siendo las zonas cercanas a los sistemas montañosos, aquellas que presentan unos mayores valores de frecuencia de formación de ciclones mediterráneos (p. ej., Trigo et al., 2002; Campins et al., 2011). No obstante, aunque el relieve favorezca los procesos de mezcla e inestabilidad baroclínica, es necesario que en altura haya una masa de aire inestable. Cuando esta masa de aire frío entra en contacto con el relieve, se produce una anomalía térmica positiva en la ladera de sotavento, lo que conduce a un descenso rápido

de la presión que provoca el desarrollo de un centro de bajas presiones por procesos baroclínicos.

La zona de los Alpes es la región de la cuenca mediterránea que tiene la mayor frecuencia de procesos ciclogénéticos favorecidos por la orografía (Buzzi & Tibaldi, 1978). Otra de las zonas que mayor número de ciclones genera por efecto de la orografía es la cordillera del Atlas (Thorncroft & Flocas, 1997), donde encontramos principalmente un elevado número de ciclones a sotavento durante los meses de primavera. (Trigo et al., 1999).

1.4 Tipos de ciclones en la cuenca mediterránea

Como se ha comentado anteriormente, la cuenca mediterránea es una de las regiones del hemisferio norte más ciclogénicas (Maheras et al., 2001). Esto da lugar a que también podamos encontrar una gran variabilidad de tipos de ciclones dentro de esta área (Flaounas et al., 2022). Los criterios para distinguir entre los diferentes tipos de ciclones mediterráneos se basan sobre todo en el estudio de algunas de sus características como son su localización geográfica, los procesos de ciclogénesis e intensificación (Campins et al., 2011). Dentro de este apartado voy a hablar de los tipos de ciclones que pueden ser catalogados en la región mediterránea.

- **Ciclones de origen atlántico:** son ciclones que se desarrollan en zonas del océano Atlántico y se desplazan hacia zonas de la cuenca mediterránea (ver figura 1.4). Algunos de estos ciclones pueden llegar a ser muy intensos, siendo ciclones de gran interés para la comunidad científica como fueron el ciclón Klaus (Liberato et al., 2011; Fink et al., 2012) o Gong (Liberato, 2014), que tras su paso dejaron numerosos daños materiales en gran parte de la cuenca noroccidental del Mediterráneo. Algunos estudios (p. ej., Lionello et al., 2016) muestran que el 61-85% de los ciclones mediterráneos entran dentro de esta categoría.
- **Ciclones explosivos** (Domingues et al., 2019) son ciclones cuya principal característica es que sufren un fuerte proceso de profundización (14-20 hPa en 24 horas; Kouroutzoglou et al., 2011) Este tipo de ciclones son más comunes en zonas del océano Atlántico, es más, algunos de estos ciclones pueden llegar a desplazarse hacia zonas del Mediterráneo como ocurrió con el ciclón Klaus (ver figura 1.4; Liberato et al., 2011), pero su génesis en zonas de la cuenca mediterránea suele ser muy rara. En general, se observa una frecuencia media de este tipo de ciclones de unos 5 o 6 ciclones por año, siendo más frecuentes en los meses de noviembre a marzo. En cuanto a su localización espacial, estos ciclones sobre todo suelen desarrollarse en latitudes superiores a 40°N y en la cuenca mediterránea occidental (Kouroutzoglou et al., 2011; Reale et al., 2019)
- **Ciclones Vb:** este tipo de ciclones que debe su nombre al trabajo de van Bebber (1891), son ciclones que se desarrollan sobre todo en primavera en zonas marítimas del Mediterráneo occidental, en especial en la región situada entre el golfo de León y Génova. Una vez que se originan, siguen una trayectoria hacia el

noreste afectando primero a zonas del norte de Italia para terminar en zonas del centro de Europa donde tienen un gran impacto y son responsables de importantes episodios de inundaciones (Mudelsee et al., 2004), siendo la cara norte de la cordillera de los Alpes la región más afectada (Messmer et al., 2015).

- **Ciclones del norte de África o ciclones saharianos (ciclones Sharav):** son ciclones que se forman a sotavento de la cordillera del Atlas (Alpert & Ziv, 1989; Alpert et al., 1990). Este tipo de ciclones tienen una mayor frecuencia de aparición durante los meses de primavera y su origen se debe a la ondulación de la corriente en chorro subtropical en zonas del Atlas, generando una zona de inestabilidad baroclínica (Prezerakos et al., 2006). En general este tipo de ciclones presenta un pequeño tamaño, un bajo contenido en humedad y fuertes vientos. Debido a la zona de génesis y tránsito de este tipo de ciclones, su principal impacto suele estar asociado a la generación de grandes tormentas de arena. Estas tormentas suelen afectar sobre todo a zonas del sur del Mediterráneo y zonas cercanas a la costa africana (Karam et al., 2010). Aparte de zonas del sur del Mediterráneo, este tipo de ciclones también pueden ser observados en zonas de Oriente Medio (Alpert & Ziv, 1989).
- **Bajas térmicas:** son ciclones que se forman por la influencia del continente e intensificadas por el contraste térmico tierra-mar, y su presencia sobre todo se centra durante los meses de verano en zonas del interior de la península Ibérica (Hoinka & de Castro, 2003). Estas bajas se producen debido al contraste entre las altas temperaturas en zonas del interior peninsular y las temperaturas más suaves de las aguas del Mediterráneo y Atlántico (Trigo et al., 1999). Este tipo de bajas no lleva asociado prácticamente precipitación y tienen una duración que en muchos casos no supera las 24 horas (Hoinka & de Castro, 2003).
- **Medicanes:** son ciclones de pequeño tamaño que presentan características tropicales a lo largo de su ciclo de vida (Cavicchia & von Storch, 2012). En general, estos ciclones se desarrollan debido a procesos baroclínicos, pero, al alcanzar su estado maduro como ciclón, comienzan a sufrir un proceso de transición tropical que hace que puedan llegar a tener características tropicales e incluso llegar a ser catalogados como ciclón tropical (Emanuel, 2005a; Romero & Emanuel, 2013). Este tipo de ciclones se desarrollan sobre todo en zonas marítimas y su frecuencia máxima de aparición corresponde a los meses de otoño e invierno (Cavicchia et al., 2014a). Por último, cabe destacar que es en este tipo de ciclones en lo que se centra el trabajo de esta tesis.

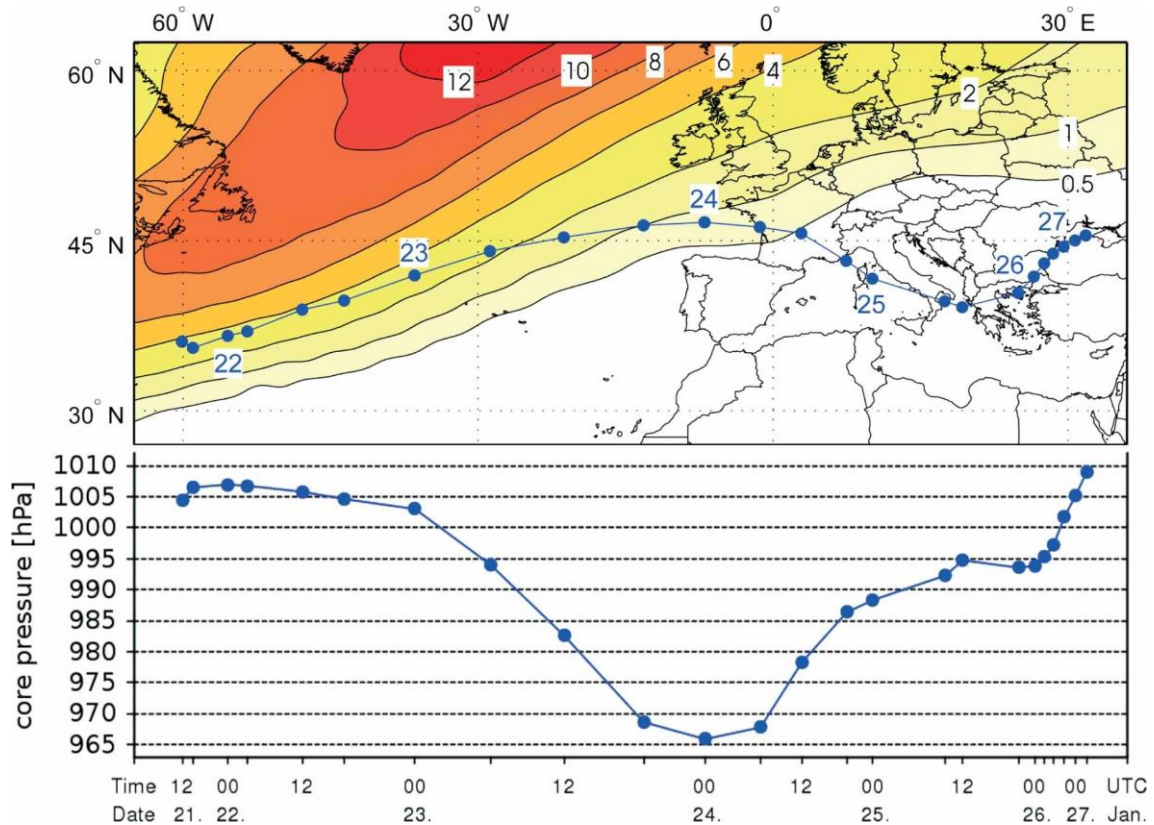


Figura 1.4. Ciclo de vida del ciclón Klaus. En la parte de arriba se representa la trayectoria del ciclón en superficie del ciclón Klaus cada seis horas, mientras que en la parte de abajo se representa la evolución de la presión en superficie a lo largo de su ciclo de vida. El periodo de vida del ciclón se considera desde 21-27 de enero de 2009. Figura extraída del trabajo de Liberato et al. (2011).

1.5 Proyecciones climáticas de ciclones mediterráneos.

La cuenca mediterránea es considerada como una de las zonas del planeta que actualmente está siendo más significativamente afectada por el cambio climático (Hochman et al., 2018). Algunos trabajos sobre proyecciones climáticas muestran que esta región a finales del S.XXI probablemente vaya a tener temperaturas más elevadas, una reducción significativa de la precipitación sobre todo en el oeste de la cuenca mediterránea (Giorgi, 2006), y, además, una tendencia creciente a más eventos extremos meteorológicos.

Con respecto al estudio de fenómenos extremos en el Mediterráneo, cabe destacar que gran parte de estos fenómenos están asociados a la presencia de ciclones (Lionello et al., 2014). Este hecho hace que, a principios de la década de los años 2000 con el avance computacional de los modelos, se comiencen a realizar los primeros trabajos de proyecciones climáticas sobre ciclones en el Mediterráneo.

El primer trabajo que se realizó dentro del estudio de ciclones en clima futuro en el Mediterráneo fue el de Lionello et al. (2002). En este trabajo se usó un modelo global atmosférico (ECHAM4) de una resolución horizontal de 1.1° con un escenario de emisiones en el que se doblaba la cantidad de CO₂ respecto a la concentración

preindustrial. Los resultados de este estudio mostraron una reducción significativa del número total de ciclones en toda la cuenca del Mediterráneo, pero también un aumento de la intensidad, sobre todo en el viento máximo por ciclón. Los siguientes trabajos de proyecciones climáticas comenzaron a usar mejores metodologías y datos. Se introdujo el uso de modelos regionales con mayor resolución horizontal y se empezaron a usar los escenarios de emisiones del IPCC para obtener los distintos forzamientos de los modelos en clima futuro.

En general, la mayoría de los trabajos realizados sobre ciclones mediterráneos en clima futuro (p. ej., Giorgi & Lionello, 2008; Ulbrich et al., 2009; Raible et al., 2010; Zappa et al., 2013; Nissen et al., 2014; Zappa et al., 2015) muestran un descenso más o menos significativo del número total de ciclones mediterráneos, siendo este descenso más pronunciado durante los meses de invierno (Zappa et al., 2015). Este descenso en la frecuencia de ciclones tiene repercusiones como es el descenso de la precipitación media anual en gran parte del Mediterráneo (Raible et al., 2010; Zappa et al., 2013), no obstante, esta reducción tendría un mayor impacto en zonas del este del Mediterráneo (Zappa et al., 2015; Hochman et al., 2018).

Como se ha podido ver en los estudios anteriores, la mayoría de los resultados obtenidos muestran una gran coincidencia con respecto al descenso del número de ciclones en clima futuro, sin embargo, no ocurre lo mismo con la intensidad. Algunos trabajos (p. ej., Giorgi & Lionello, 2008; Zappa et al., 2015) muestran que es esperable un incremento tanto en la velocidad del viento como en la precipitación asociada a cada ciclón, y este incremento afectaría sobre todo a zonas del norte de la cuenca mediterránea. En cambio, se espera que la intensidad de los ciclones en el este del Mediterráneo sea menor (Zappa et al., 2015; Hochman et al., 2018).

En los últimos años, el uso de modelos climáticos con acoplamiento atmósfera-oceano, han empezado a ser utilizados gracias en gran medida a que los avances computacionales permiten incluir el acoplamiento en modelos con alta resolución horizontal. Uno de los últimos trabajos sobre proyecciones climáticas ha sido el de (Reale et al., 2021), que usa un conjunto de modelos regionales de clima con acoplamiento atmósfera-oceano. Los resultados de este trabajo muestran que la frecuencia de ciclones mediterráneos tenderá a disminuir sobre todo en zonas del Mediterráneo oriental, donde además encontraremos un descenso de la intensidad de viento y precipitación. Mientras que, en la parte central del Mediterráneo, aunque encontremos un descenso de la frecuencia de ciclones, es esperable que estos sean más intensos con mayores velocidades de viento y precipitación.

Estos cambios que se pueden producir en la frecuencia e intensidad de ciclones pueden ser explicados debido al efecto del cambio climático en la circulación general atmosférica. La reducción del número de ciclones puede deberse por un lado al desplazamiento hacia zonas más septentrionales de la corriente en chorro polar y por tanto a una mayor extensión de las altas presiones subtropicales en zonas del Mediterráneo (Anagnostopoulou et al., 2006). Mientras que, por otro lado, este descenso también puede explicarse debido a la reducción de las intrusiones de aire frío procedente de latitudes

altas, que potencian los procesos de ciclogénesis (Hochman et al., 2018). En cuanto al posible aumento de la intensidad de ciclones mediterráneos, una posible explicación puede ser que, debido al aumento de las temperaturas, la capacidad de contención de humedad por parte de la atmósfera puede ser mayor, favoreciendo que las precipitaciones asociadas a ciclones puedan ser más intensas (Zappa et al., 2015).

1.6 Organización del documento

Esta tesis está organizada de la siguiente manera:

La **primera parte** del texto contiene dos capítulos: el primero es la introducción previa que introduce el contexto de la tesis, tratando los ciclones en el mediterráneo y el impacto del cambio climático en ellos. En el segundo capítulo (estado del conocimiento), se hace una revisión acerca del conocimiento de los medicanes en los últimos años, haciendo especial énfasis en su análisis mediante el uso de modelos climáticos, los efectos de la interacción atmósfera-océano en su desarrollo y los trabajos existentes sobre medicanes en proyecciones de cambio climático.

La **segunda parte** está compuesta por dos capítulos que incluyen la descripción de datos y la metodología seguida en los diferentes estudios. Es importante remarcar que cada capítulo de resultados tiene su propia sección de datos y metodología, por lo que esta segunda parte da una visión general de dichas cuestiones. Los contenidos de esta segunda parte están relacionados con la descripción de datos de reanálisis, modelos climáticos, el uso del método del espacio de fases de ciclones (CPS, del inglés “Cyclone Phase Space”), así como otros aspectos metodológicos.

Los resultados son presentados en la **tercera parte** del documento. En esta sección hay diferentes capítulos para cada uno de los principales aspectos investigados aquí. El contenido de estos capítulos procede de sendos artículos ya publicados en revistas científicas.

Por último, la **cuarta parte** de este documento contiene un capítulo con una discusión integradora de los resultados previamente presentados y las principales conclusiones.

2

Estado del conocimiento

En los últimos años, uno de los tipos de ciclones que se desarrollan en la cuenca del mediterráneo que mayor interés está generando en la comunidad científica son los llamados huracanes mediterráneos o medicanes. Estos ciclones han generado un gran interés en la comunidad científica debido a sus efectos e impactos, así como por su alto grado de desconocimiento sobre los mecanismos que los rigen. En este apartado de la tesis, se va a realizar una revisión del estado del conocimiento sobre los medicanes en zonas de la cuenca mediterránea de manera exhaustiva. Primero se va a realizar una revisión de los primeros trabajos que analizaron ciclones con características tropicales en el Mediterráneo, para centrar a continuación la atención en la definición y desarrollo de este tipo de ciclones, impactos generados, efectos de la interacción atmósfera-océano en su desarrollo e intensificación, revisión de los estudios de medicanes con modelos climáticos, y por último en el estudio de proyecciones en clima futuro.

2.1 Antecedentes en el estudio y definición de medicanes

Desde tiempos lejanos, se han realizado informes acerca de tempestades severas en zonas cercanas al mar Mediterráneo que fueron registradas a lo largo del tiempo por distintos cronistas (Cavicchia et al., 2014a). Con la llegada del S.XX y las mejoras realizadas en el mundo de la meteorología, comenzaron a detallarse una serie de fenómenos meteorológicos que con gran virulencia afectaban de vez en cuando a regiones costeras del Mediterráneo (Pytharoulis et al., 1999).

Uno de los primeros trabajos conocidos acerca de estos fenómenos fue realizado por Winstanley (1970) quien describió un ciclón que parecía tener características tropicales en el Mediterráneo central. Este ciclón afectó a zonas cercanas a Malta en torno al 23 de septiembre de 1969, y según el autor del artículo, poseía una región libre de nubosidad en su centro y además contaba con la presencia de fenómenos meteorológicos adversos como son fuertes vientos y precipitaciones torrenciales que se prologaron durante bastante tiempo.

Años más tarde, otro ciclón con características tropicales fue detectado en enero de 1982 (Ernst & Matson, 1983). Este ciclón que se generó en zonas del sistema montañoso del Atlas y se desplazó por gran parte del Mediterráneo central y oriental, afectó a zonas de Malta, Italia y Grecia (Mayengon, 1984). En cuanto a las características físicas observadas cabe destacar que fueron muy parecidas al estudio de Winstanley, (1970), destacando la presencia de una zona con ausencia de nubes en forma

circular en el centro del ciclón, en torno a la cual se observaban nubes con gran desarrollo vertical.

Al año siguiente otro ciclón fue observado en zonas orientales del Mediterráneo durante el otoño (Rasmussen & Zick, 1987). Se pudo observar que en este caso, el ciclón no tuvo un origen y desarrollo baroclínico, sino que surgió principalmente debido a los procesos de convección, unidos a la elevada temperatura que el mar Mediterráneo tenía en esa región. En el estudio de Rasmussen & Zick (1987) también se pudo determinar que el ciclón presentaba un radio pequeño cuyo tamaño variaba entre los 200 a 300 km.

Con el avance de la década de los 80, las imágenes de satélite mejoraron mucho en cuanto a su resolución y, por tanto, comenzaron a ser utilizadas para el seguimiento y detección de ciclones en la zona del Mediterráneo. A mediados de la década de los 90, un ciclón con un aspecto muy similar a los ciclones tropicales del Atlántico hace crecer el interés de la comunidad científica por el estudio de ciclones con características tropicales en el Mediterráneo. El ciclón en cuestión se desarrolló en enero de 1995 en el sur del Mediterráneo muy cerca de las costas de Libia (Pytharoulis et al., 1999).

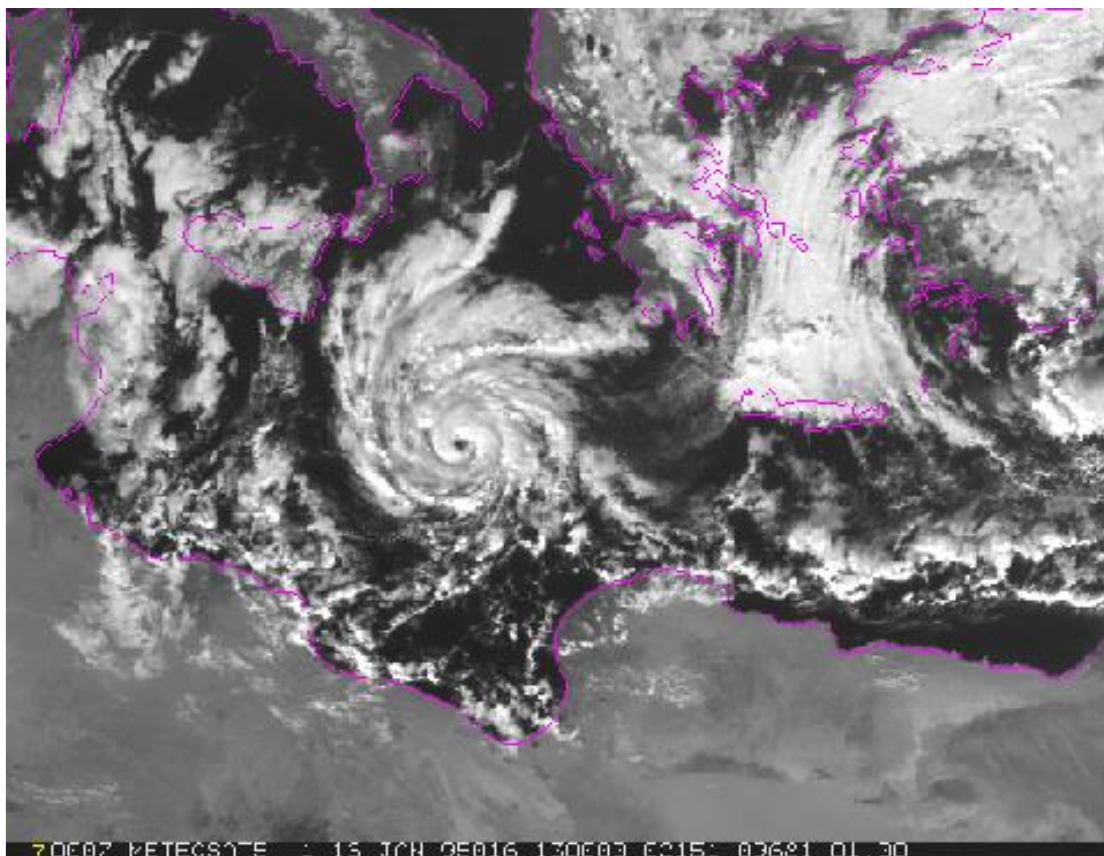


Figura 2.1. Medicanic generado en enero de 1995 en zonas del sur del Mediterráneo (16/01/1995 at 13:00 UTC) observado desde la imagen visible del satélite Meteosat. Figura extraída del trabajo de Fita et al. (2007)

Este ciclón fue detectado por las imágenes de satélite con un aspecto muy similar a un ciclón tropical maduro (huracán), pero de menor tamaño que los ciclones tropicales localizados en zonas del océano Atlántico, como se puede ver en la figura 2.1. Cabe

destacar que el ciclón presentaba una estructura simétrica bastante clara, así como una zona en el centro del ciclón libre de nubes que podría ser identificada como el ojo del ciclón, al igual que los huracanes en el Atlántico. El estudio realizado por Pytharoulis' et al., (1999) aportó mucha información acerca de cómo es el desarrollo e intensificación de ciclones que presentan características tropicales en el Mediterráneo. En cuanto a sus principales resultados, destaca que la fuente principal de energía no son los procesos adiabáticos, sino la intensificación de los flujos de calor latente y sensible cerca del centro del ciclón. Estos resultados fueron muy parecidos a los obtenidos por Malguzzi et al., (1998), que estudiaron el desarrollo de dos ciclones con características tropicales cerca de la costa de Sicilia en otoño de 1996. En este estudio se observó que la principal fuente de intensificación de estos ciclones fueron procesos de convección profunda (Reale & Atlas, 1998).

A partir de los estudios anteriormente mencionados, se comenzó a denominar a este tipo de ciclones como “hurricane-like Mediterranean cyclone” (Emanuel, 2005a). No obstante, a pesar de los avances realizados en la categorización de estos ciclones gracias al uso de imágenes de satélite, uno de los principales problemas en este tipo de ciclones era como distinguir entre ciclones con características tropicales de aquéllos que fueran ciclones extratropicales (Fita et al., 2007). Al principio se catalogaba como medicanes a aquellos ciclones que tuvieran estructura simétrica y con presencia de una región libre de nubes alrededor del centro del ciclón. Esta técnica al final solo permitía detectar aquellos medicanes que presentaran una clara estructura tropical en imágenes de satélite y, por tanto, había muchos casos que no podían ser detectados debido a que estos ciclones pueden o no tener la estructura típica de los ciclones tropicales del Atlántico (Tous & Romero, 2013).

Con el trabajo de Hart en 2003, se empezó a usar un método de clasificación de ciclones en base a su estructura térmica, que permite distinguir entre ciclones que tengan núcleo frío (ciclones extratropicales), núcleo híbrido (ciclones subtropicales o seclusiones cálidas) o núcleo cálido (ciclones tropicales). Además, también nos aporta información acerca de la estructura frontal del ciclón, si este es simétrico (ciclones tropicales principalmente) o asimétrico (ciclones extratropicales). La disponibilidad de este método permitió analizar la estructura térmica de los ciclones que potencialmente pudieran ser medicanes, y se pudo empezar a observar que estos ciclones tenían núcleo cálido como ocurre con los ciclones tropicales (p. ej., Gaertner et al., 2007; Cavicchia et al., 2014b; Romera et al., 2017).

Por tanto, y en base a todos los estudios anteriores, un **medicane** puede ser definido como un ciclón de mesoescala que posee una estructura de núcleo cálido simétrico, donde en ocasiones puede observarse la presencia de una región libre de nubosidad en el centro del ciclón, muy similar a los ciclones tropicales en otras regiones del planeta (Fita et al., 2007). En cuanto a su génesis y posterior desarrollo, este es debido al desequilibrio termodinámico entre la atmósfera y el mar Mediterráneo, lo que provoca que estos ciclones tengan como principal mecanismo de desarrollo los procesos convectivos (Miglietta et al., 2011). Estos ciclones además presentan fuertes vientos que

pueden exceder los 25 m/s e incluso llegar a superar los 33 m/s por lo que pueden llegar a tener intensidad similar a huracanes de categoría 1 (Ragone et al., 2018), fuertes precipitaciones, tormentas e intensas mareas ciclónicas que provocan inundaciones y daños materiales alrededor de la cuenca del Mediterráneo (Bakkensen, 2017; Nastos et al., 2018).

Los medicanes suelen ser ciclones muy poco frecuentes en el Mediterráneo. Distintos estudios climatológicos sobre medicanes (p. ej., Miglietta et al., 2013; Cavicchia et al., 2014a; Zhang et al., 2021) muestran una frecuencia anual de estos ciclones bastante baja en torno a unos 1,5 medicanes/año, y rara vez el número de estos ciclones supera el umbral de dos ciclones por año. En cuanto a su distribución espacial, este tipo de ciclones se desarrolla sobre todo en dos zonas: en el Mediterráneo Occidental entre la zona de Baleares y el Golfo de Génova y la región del mar Jónico (Cavicchia et al., 2014a).

Como ocurre con los ciclones extratropicales mediterráneos, los medicanes también tienen un marcado ciclo estacional. La época del año con mayor frecuencia de medicanes es el otoño y el invierno (Romera et al., 2017). Esto puede deberse a que durante esos meses del año el desequilibrio entre la atmósfera y el mar es máximo, debido a que encontramos un mar que aún se encuentra relativamente cálido con una atmósfera bastante inestable (Davolio et al., 2009). El mínimo de frecuencia de este tipo de ciclones ocurre en los meses de verano, ya que, en estos meses, aunque las temperaturas en el Mediterráneo sean elevadas, encontramos una situación atmosférica bastante estable con la presencia de altas presiones subtropicales en gran parte de la cuenca (Cavicchia et al., 2014a).

En cuanto a la duración de estos ciclones, también presentan un ciclo de vida mucho más corto que los ciclones extratropicales y tropicales del Atlántico. El tiempo de vida medio de este tipo de ciclones, en la fase con características tropicales, suele variar desde 6 hasta 48 horas en el caso de los ciclones más duraderos. No obstante, en general estos ciclones presentan un tiempo de vida medio con características tropicales de unas 24 horas (Cavicchia & von Storch, 2012).

2.2 Desarrollo de medicanes

Como se ha comentado anteriormente, los ciclones mediterráneos tienen en la mayoría de ocasiones un origen baroclínico (Buzzi & Tibaldi, 1978). No obstante, estos ciclones pueden sufrir cambios a lo largo de su ciclo de vida dependiendo de cuál sea su fuente de energía principal. Los ciclones extratropicales tienen como fuente principal de energía la inestabilidad baroclínica debido a la cizalladura de origen térmico entre niveles bajos y altos de la atmósfera (Trigo et al., 2002), mientras que en los ciclones tropicales encontramos que su desarrollo es debido a procesos de convección profunda debido a intensos flujos de calor latente (Demaria et al., 2001). Por tanto, es importante explicar las condiciones en las que un ciclón de naturaleza extratropical puede transformarse en un ciclón con características tropicales dentro de la cuenca del Mediterráneo.

Debido a su ubicación latitudinal, la cuenca mediterránea, no suele ser una región del planeta que presente unas características que a priori nos indiquen el desarrollo de ciclones tropicales, puesto que, la temperatura media superficial del mar suele ser de 15°C (Tous & Romero, 2013). Algunos trabajos como el realizado por Emanuel (2005a) muestran que la zona del Mediterráneo, en general, no presenta valores altos de intensidad potencial, una variable relacionada con la generación de ciclones tropicales. No obstante, como se muestra en dicho trabajo, eso no es un impedimento para que, en ocasiones concretas, se puedan dar condiciones propicias para el desarrollo de este tipo de ciclones (Claud et al., 2010).

Cuando un ciclón de núcleo frío se desplaza o se desarrolla en zonas del mar Mediterráneo, este ciclón puede provocar un fuerte contraste térmico entre los niveles altos y bajos de la troposfera. Esto puede deberse a que cerca de la superficie, podemos encontrar una masa de aire que, al estar en contacto con el mar, tenga un elevado contenido en humedad y una temperatura relativamente cálida con respecto a la temperatura en niveles altos de la troposfera. Cuando ese contraste ocurre se puede producir un proceso intenso de evaporación, dando lugar a que la masa de aire que ascienda aporte un gran contenido de humedad favoreciendo que se produzcan intensos procesos convectivos (Moscatello et al., 2008). A partir de este punto, la fuente de energía del ciclón puede comenzar a cambiar si se dan algunas condiciones como son una cizalladura vertical reducida del viento, y que los procesos de inestabilidad baroclínica den paso a procesos diabáticos donde los flujos de calor latente y sensible sean los que comiencen a ser la principal fuente de energía en el ciclón, favoreciendo que la actividad convectiva sea intensa (Emanuel, 2005a).

Una vez que ocurre lo anteriormente mencionado, es necesario que se produzca también una serie de condiciones en niveles altos para que la convección comience a originar un proceso de transición tropical en el ciclón (Kouroutzoglou et al., 2021). En los ciclones extratropicales es normal observar que el centro de la baja en superficie y en altura se encuentran desfasados horizontalmente. La causa de esto es el efecto de la cizalla vertical del viento provocada por la elevada intensidad del viento en niveles altos del ciclón (ver figura. 2.2.a).

Si estos vientos no disminuyen de intensidad en niveles altos es probable que, aunque en superficie se produzcan procesos de convección profunda, la liberación de calor latente no dé lugar a cambios térmicos en el núcleo frío en altura. Por tanto, en estos casos el ciclón podría tener núcleo cálido en superficie y núcleo frío en altura, dando lugar a un ciclón con núcleo híbrido. El efecto de la cizalla vertical en el desarrollo de ciclones tropicales en el océano Atlántico ha sido estudiado en numerosos artículos de ciclones subtropicales (p. ej., Guishard et al., 2009; González-Alemán et al., 2015). En estos estudios se observa que en algunos ciclones subtropicales la disminución de la cizalla vertical puede provocar el desarrollo de núcleo cálido profundo, mientras que, si la cizalla se mantiene en una velocidad de entre 10 y 20 m/s, el ciclón podría solamente núcleo cálido solo en superficie, y considerarse como un ciclón subtropical.

Si, por el contrario, tenemos una disminución de vientos en altura, y por tanto una disminución de la cizalla vertical del viento, es probable que se vaya produciendo una alineación de la baja en altura y en superficie (Kouroutzoglou et al., 2021). La posible causa de la disminución de vientos en altura puede deberse a que el ciclón al quedarse aislado de la circulación general atmosférica en la parte sur de un bloqueo anticiclónico provocase que el viento en altura conectado con la corriente en chorro polar comenzase a disminuir, y por tanto, la baja empezara a quedarse estacionaria, dando lugar a la alineación de la baja tanto en superficie como en altura (ver figura. 2.2.b).

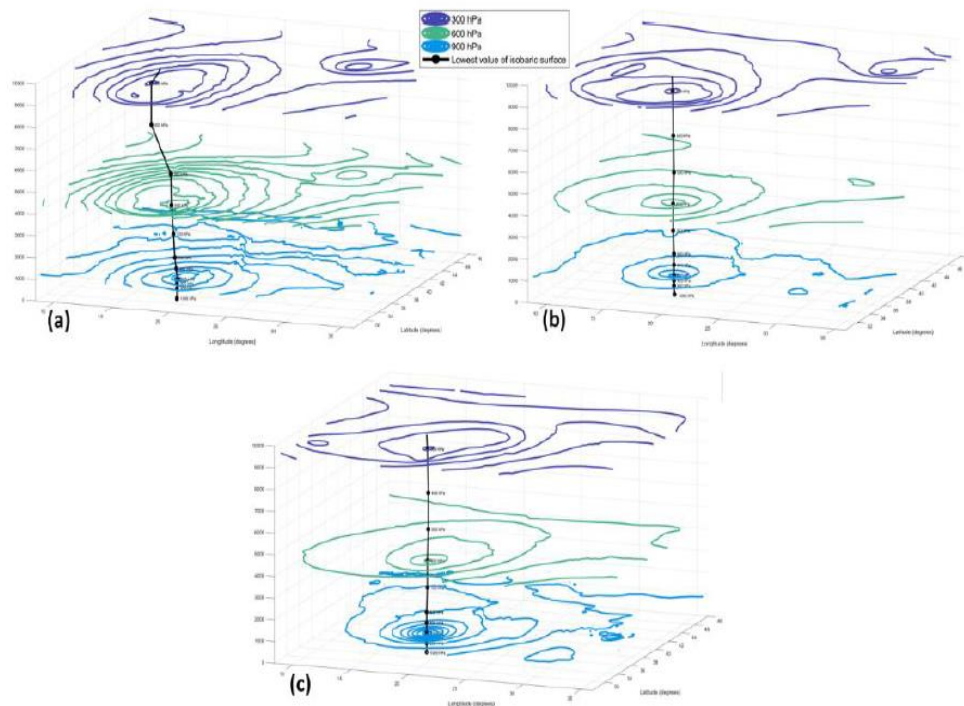


Figura 2.2. Representación en tres dimensiones de la distribución de la altura de geopotencial alrededor del medicane Zorbas a 900 hPa (azul), 600 hPa (verde) y 300 hPa para los días (a) 27/18 UTC, (b) 28/06 UTC y (c) 28/18 UTC de septiembre de 2018. Los puntos negros representan los valores mínimos de altura de geopotencial (en metros) en cada nivel isobárico y las líneas negras representan la inclinación vertical con la altura. Figura extraída del trabajo de Kouroutzoglou et al. (2021)

Cuando eso ocurre, se puede producir un aumento de las condiciones favorables para la convección profunda, debido a que el viento en altura sería menor, favoreciendo que la liberación de calor latente y sensible produzca un aumento de temperatura justo encima de la baja en superficie. A medida que estos flujos llegan a niveles más altos de la troposfera, pueden empezar a erosionar el núcleo frío de la baja en altura dando lugar a la formación de un núcleo cálido robusto tanto en superficie como en altura, y, por tanto, el ciclón podría ser considerado como un ciclón tropical (ver figura 2.2c).

Algunos artículos sobre ciclones en el Mediterráneo muestran que una de las causas posibles para la formación de ciclones con núcleo cálido en esta región puede ser la aparición de intensas corrientes de aire cálido o cintas transportadoras cálidas (WCB). El trabajo realizado por Kouroutzoglou et al. (2021) muestra que la intensificación en medicanes como ocurrió con el ciclón Zorbas en 2018 puede deberse a corrientes de ese

tipo que ayudan a aportar a los ciclones una intensa fuente de calor y humedad que favorece los procesos convectivos. No obstante, también es necesario que se produzca un aislamiento de la baja de la circulación general. Si no disminuye la cizalla vertical del viento, el ciclón puede ser muy intenso, pero sin poder llegar a tener un carácter tropical pleno.

2.3 Impacto de medicanes

Los eventos extremos afectan a la sociedad de muchas maneras. En el caso de los ciclones tropicales, estos efectos se encuentran asociados a fuertes vientos, intensas precipitaciones y mareas ciclónicas, que pueden provocar graves daños y destrozos (p. ej., Vongvisessomjai, 2009; Domínguez & Magaña, 2018). Aunque en la cuenca mediterránea los medicanes solo sean una pequeña porción de la cantidad de ciclones que causan eventos extremos, generan condiciones atmosféricas y oceánicas peligrosas muy variadas (p. ej., Winstanley, 1970; Miglietta et al., 2013; Tous & Romero, 2013; Cavicchia et al., 2014a; Pytharoulis et al., 2017; Nastos et al., 2018). Esto último, combinado con la gran cantidad de población que vive cerca de las costas de la cuenca mediterránea, aumenta aún más el impacto que se pueda generar.

Uno de los principales efectos que tienen los medicanes en el Mediterráneo es el intenso viento. Con respecto a este fenómeno, el viento máximo en medicanes suele producirse en zonas muy cercanas al núcleo del ciclón y suele ser provocado por los intensos procesos de convección que se generan cerca del núcleo (Tous & Romero, 2013). En los diferentes estudios de medicanes que se han realizado, se suele estimar que el viento máximo sostenido en este tipo de ciclones es de 22-28 m/s (Marra et al., 2019), no obstante, hay algunos ciclones que han llegado a sobrepasar este rango de valores. Uno de los últimos ciclones más estudiados en estos años por la intensidad que llegó a alcanzar fue el medicane Ianos (2020), cuya intensidad máxima de viento superó los 40 m/s (ver figura 2.3), provocando graves destrozos en zonas de Grecia y sur de Italia (Karagiannidis et al., 2021). Esta intensidad, está más cerca de los vientos asociados a huracanes de categoría 2.

Las precipitaciones asociadas a medicanes suelen tener un carácter algo irregular, debido a que en muchos casos dependen en gran medida de la zona a la que afecten y a la orografía que encontremos (Zhang et al., 2021). En medicanes, como ocurre con los ciclones tropicales, las precipitaciones suelen ser de tipo convectivo y con bastante intensidad en cortos espacios de tiempo (Davolio et al., 2009). Diversos estudios muestran precipitaciones diarias máximas que superan los 100 mm (Marra et al., 2019). Al igual que ocurre con el viento, uno de los medicanes que mayores datos de precipitación ha registrado fue Ianos (2020), que a su paso por Grecia dejó abundantes precipitaciones que puntualmente llegaron a superar los 300 mm/día en algunas regiones del interior de Grecia (ver figura 2.3; Karagiannidis et al., 2021). Las precipitaciones intensas además suelen llevar asociadas otros graves problemas como son desprendimientos de piedra, deslizamientos de tierra e inundaciones (Bakkensen, 2017).

Uno de los principales problemas que provoca el cambio climático en la región mediterránea es el aumento del nivel del mar. Según algunos estudios sobre este fenómeno como el de Tsimplis et al. (2008), se estima que el aumento del nivel del mar en la zona mediterránea a finales de este siglo será superior a 0.3 m de media, dando lugar a que la zona de costa se vea más mermada y vulnerable ante el peligro de intensas mareas ciclónicas. De todos los fenómenos extremos asociados a los medicanes en zonas costeras, uno de los que más interés y preocupación provocan en la comunidad científica, son las mareas ciclónicas. Diferentes estudios (p. ej., Scicchitano et al., 2020, 2021; Toomey et al., 2022) muestran que las mareas ciclónicas unidas a las mareas lunares pueden provocar que el nivel del mar se eleve hasta cerca de 0.5 metros. Esto tiene como consecuencias que el mar entre varios metros tierra adentro. En los últimos años, una de las regiones que más ha sido afectada por este tipo de extremos es la costa de Grecia y sur de Italia, en especial la isla de Sicilia, donde el trabajo de Scicchitano et al. (2021) muestra cómo ha afectado el paso de varios medicanes a esa región y el aumento que ha tenido el nivel del mar durante el tránsito de diferentes ciclones por la isla.

Otro de los fenómenos que suele acompañar a los medicanes, son las tormentas eléctricas. Diferentes estudios en ciclones tropicales muestran que la actividad eléctrica suele ser intensa en la fase previa a la intensificación y formación de los ciclones tropicales (Price et al., 2009). No obstante, una vez que el ciclón llega a su madurez, la actividad eléctrica tiende a descender claramente. Este mismo fenómeno suele observarse en los medicanes que presentan una mayor estructura tropical. En el estudio de Dafis et al. (2018) se puede observar como el pico máximo de actividad eléctrica ocurre antes de que el ciclón alcance su intensidad máxima de viento.

Todos estos fenómenos generan numerosos daños materiales. El estudio de Bakkensen (2017) cuantifica los daños por medicanes en los diferentes países de la cuenca mediterránea. Dentro de esta región, Italia es el país que mayor número de daños económicos tiene provocados por medicanes, superando los 25 millones de dólares de media anual de daños. Esto es debido a que es una zona que presenta un alto riesgo de ser afectada por medicanes. Después de Italia destaca España con 15 millones de dólares anuales, siendo la zona de las islas Baleares, la región más susceptible al impacto de estos ciclones, donde además el riesgo de deslizamientos de tierra es muy elevado. En tercer lugar, destaca la zona de Grecia que tiene unos daños estimados en torno a 10 millones de dólares, y le siguen de cerca países como Malta, Túnez y Francia.

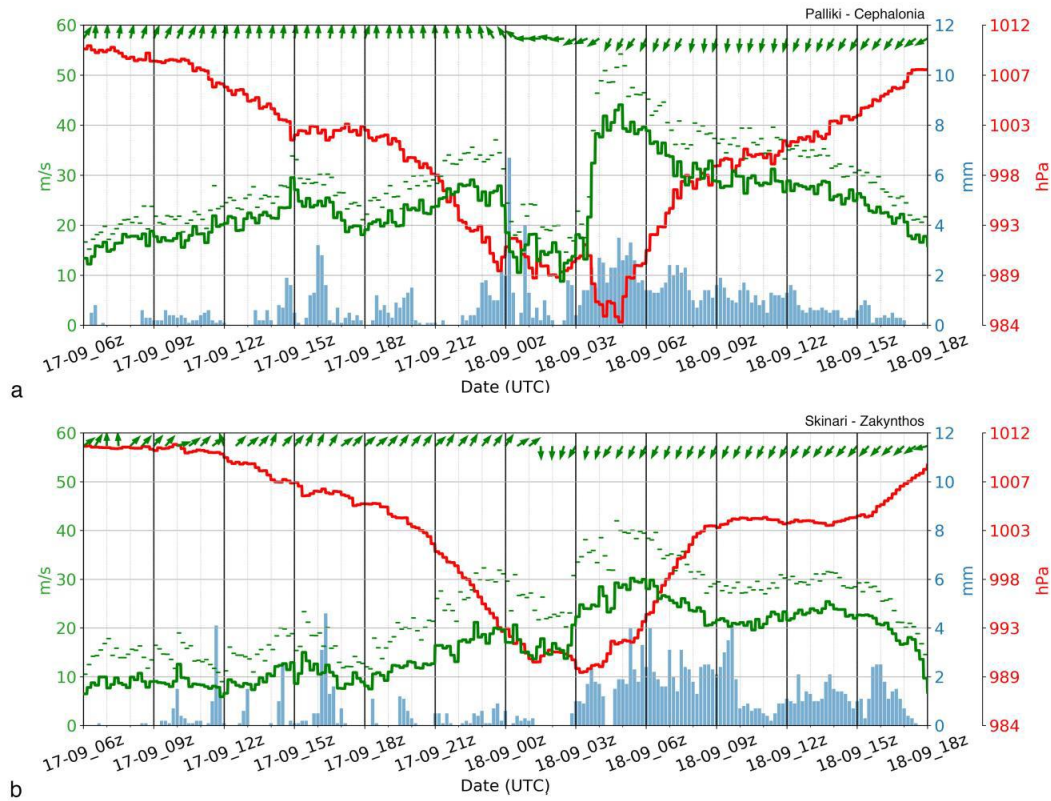


Figura 2.3. Serie temporal de presión a nivel del mar, viento y precipitación del medicane Ianos a su paso por (a) Palliki en Cefalonia y (b) Skinari en Zakynthos (Grecia) entre las 0600 UTC del 17 de septiembre y las 1800 UTC del 18 septiembre de 2020: (i) velocidad del viento máxima de 10 m en 10 minutos (m/s; línea verde), (ii) ráfaga de viento máxima (m/s; línea verde rectangular), (iii) dirección media del viento (vectores verdes), (iv) presión mínima al nivel del mar en 10 minutos (hPa) y (v) lluvia acumulada en 10 minutos (mm; barras azules). Figura extraída del trabajo de Karagiannidis et al. (2021).

2.4 Efectos de la interacción atmósfera-océano en medicanes

Los océanos son la principal fuente potencial de calor latente para la atmósfera, siendo la transferencia de calor latente desde el océano hacia la atmósfera extremadamente importante para el desarrollo y mantenimiento de ciclones con características tropicales (Emanuel, 1986). El acusado contraste térmico entre la temperatura de la superficie del mar con respecto a la atmósfera favorece el desarrollo de intercambios de flujos de calor entre ambos (Tous & Romero, 2013). Este mecanismo es muy importante para intentar explicar el desarrollo y mantenimiento de ciclones con características tropicales.

Como se ha indicado en apartados anteriores, el desarrollo y mantenimiento de ciclones extratropicales depende de manera directa de la cizalladura de viento de origen térmico entre los niveles bajos y altos de la troposfera (Bjerknes, 1951). Por el contrario, la mayor fuente de energía de los ciclones tropicales es la energía diabática producida por los intercambios de flujos de calor entre la atmósfera-océano. Por tanto, en esta sección vamos a estudiar como la interacción atmósfera-océano tiene una gran importancia en el desarrollo de medicanes en el Mediterráneo.

Una de las zonas con mayor cantidad de estudios acerca del desarrollo de ciclones tropicales es la cuenca atlántica. En esta región encontramos que la mayoría de este tipo

de ciclones se desarrollan en zonas cercanas a las costas de África tropical y zonas del mar del Caribe (Demaria et al., 2001). En estas regiones, la temperatura del mar suele estar cercana a 30°C durante la temporada de huracanes, en la que se concentra el mayor número de génesis de ciclones tropicales (Neumann, 1993). De acuerdo con esto, trabajos como el de Trenberth, (2005) establecieron que el valor mínimo de temperatura superficial del océano para el desarrollo de un ciclón tropical debería ser mayor de 26°C. No obstante, esta teoría no explica el desarrollo de ciclones tropicales en zonas que claramente tienen una temperatura superficial del mar inferior, como es la región de la cuenca nororiental del Atlántico norte.

En esa región del océano, se puede encontrar temperaturas de la superficie del mar por debajo de 26°C en latitudes a partir de 30°N (Xie & Carton, 2004). A pesar de estas bajas temperaturas en comparación con la cuenca atlántica occidental, en los últimos años se ha documentado en esa región el desarrollo de ciclones tropicales. Un ejemplo de ello es el caso del huracán Vince en 2005, que se desarrolló en zonas cercanas al suroeste de la península Ibérica sobre una región del océano Atlántico que tenía unas temperaturas por debajo de 25°C (Tapiador et al., 2007). Mas recientemente, tenemos el caso del huracán Ophelia en octubre de 2017, que incluso llego a alcanzar categoría 3 en la escala de Saffir-Simpson sobre aguas que se encontraban por debajo de 26 °C (Hafez & Labban, 2018).

Como se ha demostrado con los dos casos anteriores, la explicación de la formación de ciclones tropicales no puede ser desarrollada solo usando un criterio térmico con respecto a la temperatura superficial del océano. En este caso, el estudio de Emmanuel (1986) aporta una segunda condición para el desarrollo de ciclones tropicales. En este trabajo se menciona que también pueden desarrollarse ciclones tropicales en circunstancias en las que encontremos una fuerte inestabilidad debida al contraste térmico entre las temperaturas de la alta troposfera con respecto a la temperatura del mar, favoreciendo procesos intensos de convección profunda, que pueden dar lugar al proceso de transición tropical, en el que una baja originalmente extratropical adquiere propiedades tropicales (Davis & Bosart, 2004).

Aparte de en la génesis de ciclones tropicales, el océano también tiene un papel muy importante en los procesos de intensificación de ciclones tropicales (Emanuel, 1986; Rotunno & Emanuel, 1987). La temperatura de la superficie del mar puede dar lugar a una intensificación de los ciclones al transcurrir por aguas con mayores temperaturas que otras.

En el caso de los ciclones con características tropicales en el Mediterráneo, encontramos muchos puntos en común con los ciclones que se desarrollan en la cuenca oriental del Atlántico. En ambos tipos ciclones, la diferencia de temperatura entre la superficie del mar y la atmósfera juega un papel fundamental para el desarrollo de sus características tropicales (Palmen, 1948; Miglietta et al., 2011). Tanto en el Atlántico nororiental como en el mar Mediterráneo, la temperatura de formación de ciclones con características tropicales suele estar por debajo de 26°C, siendo la temperatura más baja observada en el mar Mediterráneo para el desarrollo de medicanes de alrededor de 15°C

(Tous & Romero, 2013). Con respecto a ese gradiente térmico, estudios como el de Cavicchia et al. (2014a), indican que la diferencia de temperatura entre la alta troposfera y la temperatura superficial del océano tiene que ser mayor de 57°C .

Si estudiamos distintos trabajos climatológicos sobre medicanes (p. ej., Miglietta et al., 2013; Cavicchia et al., 2014a; Zhang et al., 2021), encontramos que la mayor frecuencia de este tipo de ciclones se produce durante los meses de otoño e invierno, y especialmente, en la región del Mediterráneo occidental y central. Esto se debe a que la frecuencia máxima de medicanes está muy relacionada con la estacionalidad y zonas geográficas que presentan una mayor actividad baroclínica, y hace falta un precursor extratropical para el desarrollo de los medicanes.

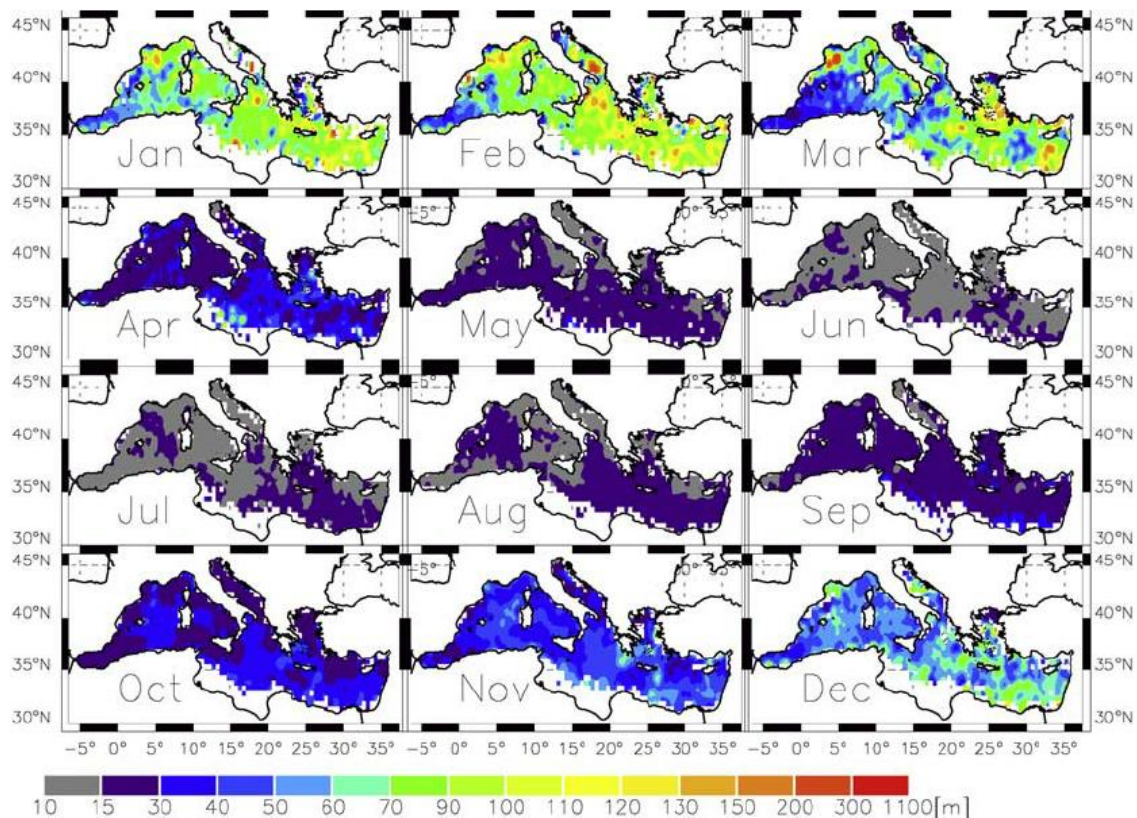


Figura 2.4. Climatología de la altura de la capa de mezcla en la región mediterránea. Figura extraída del trabajo de D'Ortenzio et al. (2005)

Durante los meses de otoño e invierno, es posible encontrar numerosos descuelgues de masas de aire frío hacia zonas del Mediterráneo, que una vez entran en contacto con el aire más cálido y húmedo asociado a las masas oceánica en superficie, pueden dar lugar a condiciones favorables para la formación de medicanes. No obstante, este hecho no es la única condición necesaria para que se desarrolle un ciclón con características tropicales. En el estudio de Gaertner et al. (2018) se lanza la hipótesis de que es posible que para un mantenimiento e intensificación de medicanes puede ser importante la profundidad de la capa de mezcla, debido a que estos ciclones pueden alterar la temperatura del mar si esta capa no es muy profunda. A este respecto, el trabajo de D'Ortenzio et al. (2005) muestra que la capa de mezcla durante los meses de verano es muy poco profunda (10-15 metros) y alcanza su máximo durante los meses de invierno

(130-150 metros), siendo más profunda en zonas del Mediterráneo occidental y central (ver figura 2.4).

Si la capa de mezcla no es lo suficientemente profunda, se puede producir una retroalimentación negativa en la intensidad de medicanes. Trabajos realizados sobre viento intenso en la zona del Mediterráneo como el de Berthou et al. (2016) muestran que episodios de vientos intensos de tramontana en el Mediterráneo occidental durante el verano, provocan un afloramiento de agua fría más profunda, lo que conduce a una disminución de la temperatura superficial del mar y una disminución de la intensidad de los flujos de calor.

Si se desarrollara un medicane en los meses de verano, es posible que, durante el proceso de intensificación, el ciclón pudiese provocar un afloramiento de aguas más frías debido al efecto del viento, dando lugar a un descenso significativo de la temperatura de la superficie del mar, lo que daría lugar a una disminución de los procesos convectivos al existir un menor contraste térmico entre las capas altas de la troposfera y la temperatura superficial del mar. No obstante, este efecto comentado anteriormente, puede reducirse en los meses de otoño e invierno (Gaertner et al., 2018). En esta época del año, la capa de mezcla alcanza sus valores máximos de espesor y, por tanto, el desarrollo de un medicane no causaría tan fácilmente procesos de afloramiento de aguas más frías. Incluso podría producirse el afloramiento de agua más cálida que el agua superficial, favoreciendo que el ciclón pueda desarrollarse e intensificarse con mayor facilidad.

En consecuencia, se puede decir que los procesos de interacción atmósfera-océano son muy importantes para poder explicar los diferentes procesos de génesis, mantenimiento e intensificación de medicanes. En esta tesis, uno de los puntos a tratar es investigar cómo afecta la interacción atmósfera-océano a la intensidad y frecuencia de medicanes mediante el uso de modelos que tengan en cuenta esta interacción en sus ecuaciones numéricas.

2.5 Progresos en la caracterización climática de medicanes en el Mediterráneo

Inicialmente, el estudio y detección de medicanes era solo posible mediante el uso de imágenes de satélite y radar (p. ej., Winstanley, 1970; Pytharoulis' et al., 1999; Fita et al., 2007, 2009). Esto comenzó a cambiar en el momento en que los diferentes avances en computación y mejoras en modelos climáticos y reanálisis comenzaron a hacer posible la detección de estos ciclones y por tanto pudieron empezar a ser analizados desde un punto de vista climático.

El uso de modelos climáticos para la detección de ciclones en la zona mediterránea se empezó a dar principalmente a finales del S. XX. Uno de los primeros trabajos que estudio el comportamiento de los ciclones mediterráneos en condiciones de clima presente y futuro fue el de Lionello et al. (2002). Ahora bien, el uso de modelos climáticos para la detección de medicanes requería de modelos que tuvieran una alta resolución horizontal, debido a que el tamaño medio de estos ciclones es inferior a 300 km. Como

los modelos globales no permitían la representación de este tipo de ciclones, una alternativa comenzó a ser el uso de modelos regionales de clima.

Con el uso de los modelos regionales y la posibilidad de empezar a hacer trabajos con una resolución horizontal más alta, se pudo empezar a trabajar en las primeras simulaciones de medicanes. El primer trabajo basado en simulaciones de cambio climático con este tipo de ciclones fue el estudio realizado por Gaertner et al. (2007). En este trabajo se usó un conjunto de modelos regionales de clima con una resolución horizontal de 50 – 55 km, anidados en un solo modelo global de atmósfera (HadAM3H). En este trabajo se utilizó el escenario de emisiones A2 del SRES (del inglés “Special Report on Emissions Scenarios”). No obstante, entre las principales conclusiones de este estudio, se encuentra la necesidad de emplear modelos con una mayor resolución horizontal.

Años más tarde, Cavicchia et al. (2014b), realizó un trabajo de simulación de medicanes en clima futuro usando un modelo regional de alta resolución horizontal (11 km) pero usando tres escenarios distintos del SRES (C2, B1, A2), este trabajo es especialmente relevante porque fue la primera climatología de medicanes de larga duración. Siguiendo la misma línea de este trabajo, estudios como el de Walsh et al. (2014) usó modelos regionales con una resolución de 25 km. Gracias a los avances computacionales pudo llevarse a cabo igualmente un trabajo sobre medicanes usando modelos globales de alta resolución. En el estudio de Tous et al. (2016) se utilizó un modelo global de alta resolución (N512 HadGEM3-GA3) con 25 km de resolución horizontal. Este trabajo incluía cinco simulaciones históricas de control y tres de clima futuro.

Pese a todo el creciente interés en la modelización climática global o regional a muy alta resolución, aún permanecen sin explicar múltiples incertidumbres entendidas como discrepancias que surgen entre los diferentes modelos a la hora de simular un proceso o variable física, sobre todo los procesos físicos relacionados con la convección. Estas fuentes de incertidumbre, bien sea relacionadas con la propia configuración del modelo, el dominio o producidas por las propias condiciones iniciales, entre otras, son importantes a la hora de interpretar los distintos resultados de los modelos (Lavín-Gullón, 2021)

En los últimos años, diferentes iniciativas internacionales han abordado la manera de intentar reducir la incertidumbre en los modelos climáticos mediante conjuntos de modelos. En este sentido, la iniciativa "Coordinated Regional Downscaling Experiment" (CORDEX; Gutowski Jr, 2009) ha coordinado la realización de simulaciones climáticas con diferentes modelos climáticos regionales en dominios comunes. El estudio de Romera et al. (2017) utilizó un conjunto grande de simulaciones realizadas sobre el dominio europeo del proyecto ENSEMBLES para analizar este tipo de incertidumbre en la simulación de medicanes.

En cuanto al estudio de medicanes con modelos acoplados, hasta el momento son pocos los trabajos que se han realizado de medicanes con este tipo de modelos, dada las

limitaciones computacionales para la realización de simulaciones acopladas a alta resolución. Los trabajos realizados con anterioridad se han centrado solo en clima actual (Akhtar et al., 2014; Gaertner et al., 2018). En el trabajo de Akhtar et al. (2014), se analizó como el efecto de la resolución horizontal podría afectar a los resultados de un modelo con acoplamiento parcial atmósfera-océano. Los resultados principales de este estudio mostraron que usar una mayor resolución horizontal (8 km) unido al acoplamiento atmósfera-océano, permitía obtener resultados de viento más realistas que los obtenidos con modelos climáticos no acoplados y de menor resolución. No obstante, fue el estudio de Gaertner et al. (2018), el primero en comparar modelos regionales plenamente acoplados con modelos no acoplados en cuanto a la simulación de medicanes. Los resultados de este estudio muestran que la introducción del acoplamiento no reduce en general la intensidad de los medicanes simulados sin acoplamiento, pero da lugar a un desplazamiento estacional de los medicanes desde el otoño hacia el invierno.

Una de las principales novedades que aporta esta tesis es el estudio de medicanes en clima futuro mediante el uso de modelos climáticos acoplados atmósfera-océano. Mientras que el capítulo quinto de la tesis se centra en el estudio de medicanes en clima futuro con un modelo global con acoplamiento atmósfera-océano parcial, el sexto capítulo analiza dos pares de simulaciones de un mismo modelo atmosférico regional, siendo una de las simulaciones con acoplamiento atmósfera-océano completo y siendo la otra una simulación no acoplada.

2.6 Proyecciones de medicanes en clima futuro

Una de las preguntas que más inquieta a la comunidad científica acerca de los medicanes es como será su comportamiento en clima futuro, al proyectarse un mar Mediterráneo más cálido (Walsh et al., 2014). Como se ha mencionado anteriormente, los estudios de proyecciones climáticas en medicanes no pudieron empezar a desarrollarse hasta finales de la década de los 2000. Anteriormente, como se había comentado en el capítulo 1.5 de esta tesis, se habían realizado algunos trabajos de proyecciones de ciclones mediterráneos sin tener en cuenta su naturaleza (Giorgi & Lionello, 2008; Lionello et al., 2002).

En cuanto al estudio de proyecciones climáticas de ciclones con características tropicales, el primer trabajo que se realizó fue el de Gaertner et al. (2007), usando un conjunto de nueve modelos regionales de clima. Los resultados obtenidos mostraron que, en varios modelos, se observó un aumento significativo de la intensidad de los ciclones, que al menos en uno de los modelos estaba ligado al desarrollo de características tropicales en los ciclones más intensos en clima futuro (2071-2100).

Los avances computacionales permitieron ampliar los trabajos acerca de proyecciones climáticas de medicanes (p. ej., Cavicchia et al., 2014b; Walsh et al., 2014; Tous et al., 2016; Romera et al., 2017; Romero & Emanuel, 2017). En general, la mayoría de los estudios de cambio climático coinciden que es esperable un descenso del número de medicanes a lo largo del presente siglo, encontrando diferencias en cuanto a la magnitud de ese descenso. En Cavicchia et al. (2014b), Tous et al., (2016) y Walsh et al. (2014) se obtiene un descenso significativo del número de medicanes en prácticamente

toda la cuenca mediterránea, sin embargo, otros estudios muestran una cierta incertidumbre con respecto a que ese descenso sea significativo (Romera et al., 2017), e incluso hay algún trabajo como el de Romero & Emanuel (2017) que muestra un posible aumento de medicanes en la región occidental del Mediterráneo. No obstante, espacialmente parece haber un acuerdo en la mayoría de los estudios, que muestran que la mayor disminución de frecuencia de medicanes se encontraría en zonas del norte del Mediterráneo.

No solo son esperables cambios en la frecuencia anual de medicanes, sino que también se observan cambios significativos en la frecuencia estacional. Algunos estudios (p. ej., Cavicchia et al., 2014b; Romera et al., 2017; Romero & Emanuel, 2017) muestran una disminución significativa del número de ciclones en los meses de invierno, dando lugar a que el máximo de medicanes pueda desplazarse hacia los meses de otoño.

Los cambios en la frecuencia de medicanes se ven muy influenciados por las variaciones que provocaría el cambio climático en la circulación general atmosférica en latitudes medias. Esto daría lugar a que las condiciones para el desarrollo de medicanes sean menos propicias, según el estudio de Cavicchia et al. (2014b): el aumento de la cizalladura vertical del viento, el descenso de condiciones de humedad relativa y la disminución en los valores medios de la diferencia de temperatura entre la alta troposfera y la temperatura superficial del océano, podrían provocar que las condiciones para el desarrollo de medicanes sean menos propicias. Por otro lado, la menor presencia de la corriente en chorro polar en latitudes más meridionales podría provocar que haya menor inestabilidad baroclínica y por tanto menor probabilidad de desarrollo de posibles bajas aisladas que den lugar a medicanes (Walsh et al., 2014). Otra posible causa que explique el descenso de medicanes en el Mediterráneo, y que estaría relacionada con lo anterior, puede ser la mayor presencia de altas presiones subtropicales sobre zonas del Mediterráneo (Tous et al., 2016), favoreciendo que las irrupciones de aire frío sean más escasas y con temperaturas en altura más elevadas (Romera et al., 2017).

No obstante, aunque se observe un claro patrón hacia una menor frecuencia de medicanes, las distintas proyecciones sobre la intensidad de estos ciclones muestran en general una tendencia a un incremento de su intensidad y potencial destructivo. Estudios como Cavicchia et al. (2014b), Tous et al. (2016) o Romera et al. (2017) muestran un aumento ligero a moderado de la intensidad del viento en medicanes, mientras que otros trabajos como el de Romero & Emanuel (2017), muestra una clara tendencia a un aumento de que estos ciclones alcancen intensidades de viento propias de huracanes. Algunos trabajos, como los de Gaertner et al. (2007) y Tous et al. (2016), muestran además que este tipo de ciclones podrían ser más duraderos.

Además de estudiar el viento como variable para determinar la intensidad de estos ciclones, trabajos como Romero & Emanuel (2017) y Tous & Romero (2013) han estudiado otros índices como es la intensidad potencial (Emanuel, 2005a) para determinar la posible intensidad máxima de un ciclón con características tropicales en base a las condiciones de su entorno. Los resultados de estos trabajos muestran que es esperable que

haya un aumento en los valores de la intensidad potencial a finales de siglo, por lo que los medicanes podrían ser mucho más intensos.

Por tanto, en general, podemos esperar que, aunque las condiciones atmosféricas sean menos favorables para el desarrollo de posibles bajas extratropicales que den lugar a medicanes (Giorgi & Lionello, 2008), es esperable que cuando se den condiciones propicias en altura, unido al contraste con un mar Mediterráneo mucho más caliente (Walsh et al., 2014) podría ayudar a que las condiciones para el desarrollo de características tropicales en ciclones sean más mucho más favorables.

2.7 Objetivos generales

El objetivo principal de esta tesis se puede definir en función de los antecedentes previos a la investigación realizada y la identificación de fuentes importantes de incertidumbre. Por un lado, encontramos que, hasta el momento, todos los trabajos realizados con proyecciones de cambio climático relativas a medicanes han sido realizados con modelos climáticos sin acoplamiento atmósfera-océano. Esto implica no tener en cuenta la posible interacción entre vientos fuertes de los ciclones y una reducción de temperatura superficial del mar por ascenso de agua profunda más fría, que podría limitar sustancialmente o incluso anular el aumento previsto de intensidad obtenido sin el acoplamiento atmósfera-océano. En los últimos años, algunos trabajos han detectado que el uso de modelos no acoplados puede dar lugar a una representación incorrecta de la intensidad de los medicanes en la estación de verano, cuando son muy infrecuentes. Debido al gran avance computacional que han tenido las simulaciones climáticas en los últimos años, estas tienen cada vez más resolución espacial, lo que unido a su gran duración temporal multiplica la necesidad de espacio de almacenamiento. Se hace por ello necesario optimizar en lo posible un análisis como el del espacio de fases de ciclones, que en su formulación original requiere una cantidad de datos particularmente grande.

Por tanto, el objetivo principal de esta tesis es la utilización de modelos acoplados atmósfera-océano para reducir incertidumbres en las proyecciones futuras de medicanes y mejorar su representación. Entre las novedades que presenta esta tesis se encuentra el uso de modelos climáticos de alta resolución con enfoques novedosos de acoplamiento atmósfera-océano para proyecciones climáticas de medicanes, así como la optimización del método del CPS para reducir su coste computacional. El objetivo principal es desglosado en tres capítulos diferentes, en los que se intenta abordar esta idea de manera más detallada:

1. El primer objetivo de esta tesis, que se aborda en el capítulo 5, es el estudio de las proyecciones de medicanes en clima futuro usando un modelo global de alta resolución con acoplamiento atmósfera-océano parcial, especialmente diseñado para incorporar las interacciones atmósfera-océano asociadas a ciclones intensos. Hasta el momento, ningún modelo global acoplado de alta resolución se había aplicado para el análisis de medicanes en clima futuro, por lo que este trabajo aporta esta principal novedad. En este estudio también se consideran aspectos de

medicanees en clima futuro no analizados previamente, como la intensidad del núcleo cálido y precipitaciones.

2. En segundo lugar, en el capítulo 6, el objetivo es intentar analizar el impacto de un modelo con acoplamiento atmósfera-océano pleno, en comparación con el modelo regional de atmósfera no acoplado en proyecciones de cambio climático. Este trabajo tiene como finalidad cuantificar el cambio en intensidad y frecuencia de medicanees en clima futuro al usar un modelo u otro, con el fin de entender la importancia de obtener las proyecciones de medicanees con modelos acoplados.
3. Finalmente, el ultimo objetivo a tratar en esta tesis, es el desarrollo de una optimización del método CPS para la caracterización de medicanees. Esta idea de mejora se deriva de la gran cantidad de datos de geopotencial que son necesarios originalmente para este método. En este estudio se realiza un análisis de sensibilidad, comparando el método original con diferentes experimentos usando menos niveles de geopotencial, con el fin de dar lugar a un posible ahorro computacional sin perder fiabilidad en esta metodología.

PARTE II

DATOS Y METODOLOGÍA

3

Datos

En este capítulo, se describen los diferentes datos que han sido utilizado en esta tesis. Hoy en día el estudio de ciclones y en especial de ciclones con características tropicales desde un punto de vista climatológico, se realiza a través, sobre todo, del uso de modelos climáticos y datos de reanálisis.

En nuestro ámbito de estudio, como se ha comentado en los anteriores capítulos, la utilización de modelos climáticos para simular medicanes necesita de modelos y datos de reanálisis que presenten una alta resolución horizontal, en especial por debajo de los 50 km. Además del hándicap de la resolución, aparece la necesidad del uso de modelos que tengan en cuenta las interacciones atmósfera-océano, muy necesarias para el estudio de los procesos de génesis, mantenimiento e intensificación de estos ciclones, debido a que su principal fuente de energía son los intensos procesos de convección.

En esta tesis se van a usar dos modelos de alta resolución horizontal con acoplamiento atmósfera-océano. Estos modelos son el modelo HiFLOR (Murakami et al., 2015) y el modelo ROM (Sein et al., 2015). Además, en el último capítulo de resultados de esta tesis, se usarán datos de reanálisis globales de alta resolución, en este caso ERA5 (Hersbach et al., 2020).

Esta sección se divide en dos subsecciones en base a la naturaleza de los datos utilizados: (3.1) datos de reanálisis y (3.2) modelos climáticos.

3.1 Datos de reanálisis

Un reanálisis es una aproximación sistemática que reproduce una variedad de datos que describen el estado real de la atmósfera. Estos datos son herramientas muy útiles para monitorizar el clima y el estado de la atmósfera, debido a que aportan información de las condiciones climáticas pasadas a nivel global (Bengtsson et al., 2007).

El principal propósito de los datos de reanálisis es estimar el estado del clima de una manera dinámica y homogénea en cada paso de tiempo de todo el dominio temporal. Cada paso de tiempo está habilitado para todas las variables disponibles durante todo el período analizado. No obstante, los datos de reanálisis tienen una componente observacional muy variable, dependiendo de la zona de estudio, puedes tener una red observacional mejor o peor. Dentro de esta red, encontramos datos obtenidos con radiosondas, boyas, satélites, aeronaves y barcos, entre otras fuentes. En total se utilizan entre 7 y 9 millones de observaciones en cada paso de tiempo (Hersbach et al., 2020)

Aunque los datos de reanálisis nos aportan una buena herramienta investigadora en clima, es necesario tener en cuenta tanto sus ventajas como sus limitaciones a la hora de usarlos. Uno de los principales problemas que tiene el uso de datos de reanálisis es la gran variabilidad de observaciones que presentan. El estado resultante de la atmósfera en base al conjunto de datos de reanálisis en cada paso de tiempo y lugar está muy condicionado a las observaciones disponibles. Zonas con una mayor densidad y mejor red de observaciones espaciotemporales (p. ej., América del Norte, Europa y algunas zonas de Asia oriental) o zonas marítimas que presentan un complejo sistema de boyas (p. ej., cuenca del Atlántico norte) se representan mejor que aquellas áreas donde no hay apenas observaciones directas y solo los satélites juegan un papel fundamental para la asimilación de datos.

Otro posible problema es la combinación de observaciones nuevas de mayor calidad con observaciones antiguas, dando lugar a que se puedan producir tendencias temporales algo erróneas (Trenberth et al., 2001). No obstante, y a pesar de estos sesgos comentados, los datos de reanálisis han demostrado ser bastante útiles en estudio de clima siempre que se utilicen sabiendo que pueden tener algún grado de error.

En cuanto a los puntos a favor de usar datos de reanálisis, una de las principales ventajas es que estos datos son globales. Por tanto, tiene una distribución espacial y temporal consistente con un gran número de variables disponibles, muchas más que las disponibles en datos de estaciones. Esto ha permitido la realización de una gran variedad de estudios en base a procesos climáticos (p. ej., Saha et al., 2014; Feng et al., 2016; Wang et al., 2019).

Hoy en día, la comunidad científica puede tener acceso a los diferentes conjuntos de datos de reanálisis de manera rápida y efectiva. De entre los reanálisis disponibles destacan: NASA MERRA (Rienecker et al., 2011); ECMWF ERA-40 (Uppala et al., 2005); ECMWF ERA-Interim (Dee et al., 2011); JMA JRA-55 (Kobayashi et al., 2015), entre otros. Las principales diferencias entre los distintos datos de reanálisis se basan sobre todo en su resolución horizontal y vertical, así como en el periodo de tiempo cubierto.

Uno de los primeros reanálisis globales fue el reanálisis de NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996), que abarca un espacio temporal de cuarenta años, pero con una resolución baja alrededor de 2.5°. Con el avance de los años, los reanálisis han ido mejorando su resolución horizontal. Un ejemplo es ERA5, que presenta una alta resolución horizontal (0.25°) a nivel global y una gran cantidad de variables disponibles.

3.1.1 ERA5

Es el último reanálisis climático producido por el ECMWF (Hersbach et al., 2020). Este reanálisis proporciona datos cada hora sobre muchas variables atmosféricas, de la superficie terrestre y del estado del mar, junto con estimaciones de incertidumbre y error. ERA5 tiene una resolución horizontal de 0.25° x 0.25° con parámetros atmosféricos en 37 niveles de presión. Aunque inicialmente solo estaban disponibles datos desde 1979 hasta el presente, el reanálisis permitirá tener datos desde 1950. Este modelo presenta una

gran cantidad de mejoras en cuanto a su predecesor ERA-INTERIM, proporcionando un mejor análisis de pronósticos tanto a corto como largo plazo (ver figura. 3.1). Un control de calidad previo a la ampliación del periodo del reanálisis reveló algunos problemas que afectan a los datos en las zonas de los trópicos, por lo que no se aconseja realizar análisis de ciclones tropicales desde 1950-1978, hasta que este problema no esté resuelto. La estrategia para hacer frente a este contratiempo ha retrasado la publicación definitiva de la ampliación de los datos, que previsiblemente estará disponible a lo largo del 2022.

Gracias a su alta resolución horizontal, este reanálisis ha sido elegido en el capítulo 7 de esta tesis como base de datos para identificar medicanes, ya que para la identificación de medicanes es conveniente el uso de modelos o datos de reanálisis con una resolución menor de 50 km, que es un requisito que cumple este reanálisis. ERA5 además ha sido utilizado en otros trabajos recientes sobre medicanes como es el estudio de Zhang et al. (2021).

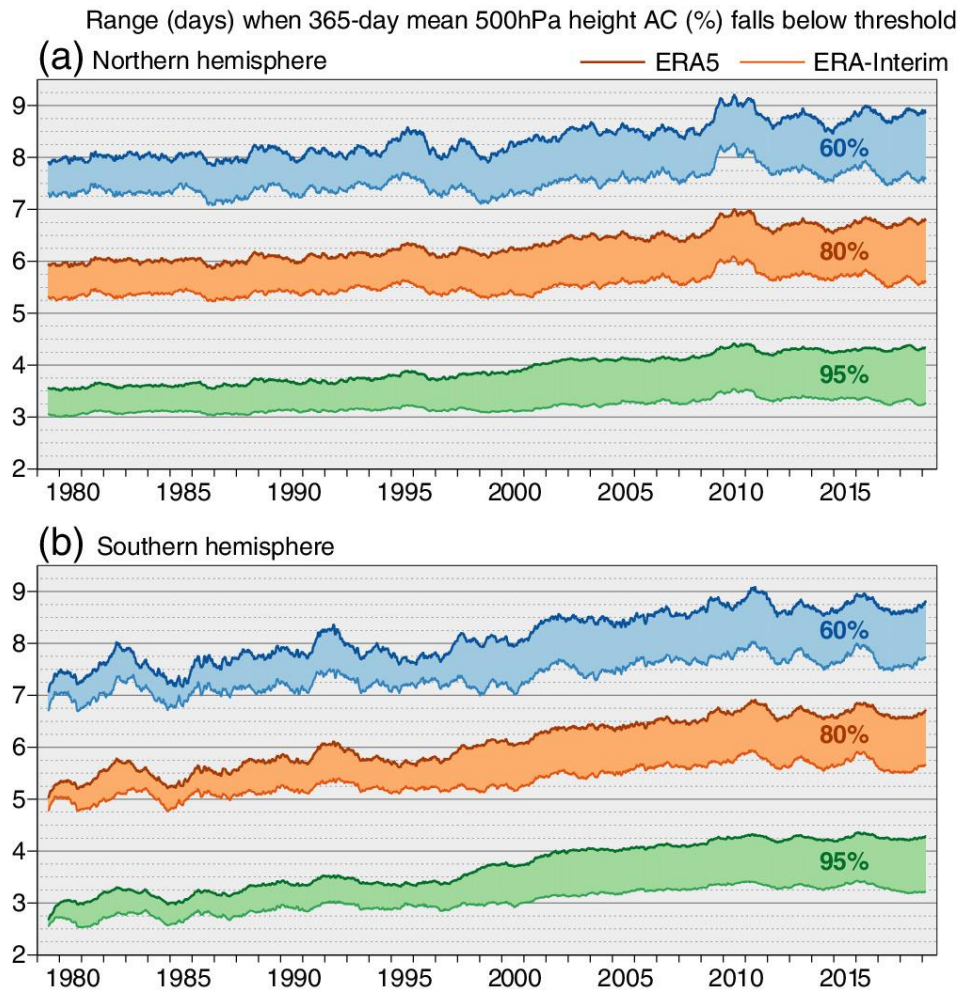


Figura 3.1. Intervalo en días en el que las correlaciones de anomalías medias de 365 días de los pronósticos de altura de 500 hPa desde las 00 y las 12 UTC alcanzan el 95 % (verde), el 80 % (naranja) y el 60 % (azul). Las líneas más gruesas indican ERA5 y las líneas finas ERA-Interim. El sombreado indica la diferencia entre ERA5 y ERA-Interim. Figura extraída de Hersbach et al. (2020)

3.2 Modelos climáticos

Un modelo climático puede ser definido como una compleja representación matemática de los principales componentes del sistema climático (atmósfera, superficie terrestre, océano y hielo) y sus interacciones. El balance entre la energía de la tierra y estos cuatro componentes es esencial para poder realizar predicción climática a largo plazo. En esta tesis se trabaja con dos modelos climáticos (HiFLOR y ROM), que tienen como característica común ser modelos de alta resolución horizontal y disponer de acoplamiento atmósfera-océano.

3.2.1 Modelo HiFLOR

HiFLOR (Murakami et al., 2015) es la versión de alta resolución atmosférica (tamaño de celdilla ~25 km) del modelo FLOR (Forecast-Oriented Low Ocean Resolution), que tiene una resolución horizontal de ~50 km (Vecchi et al., 2014). El modelo FLOR fue creado a partir del modelo climático del GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory), y es un modelo que comprende una componente atmosférica con una resolución de malla de 50 km con 32 niveles verticales, así como componentes terrestres, oceánicos y de hielo marino con una malla de 100 km. Los componentes atmosféricos y terrestres de FLOR se toman del modelo acoplado CM2.5 (Delworth et al., 2012), desarrollado en el GFDL, mientras que los componentes de océano y hielo marino se basan en el modelo CM2.1 (Delworth et al., 2006).

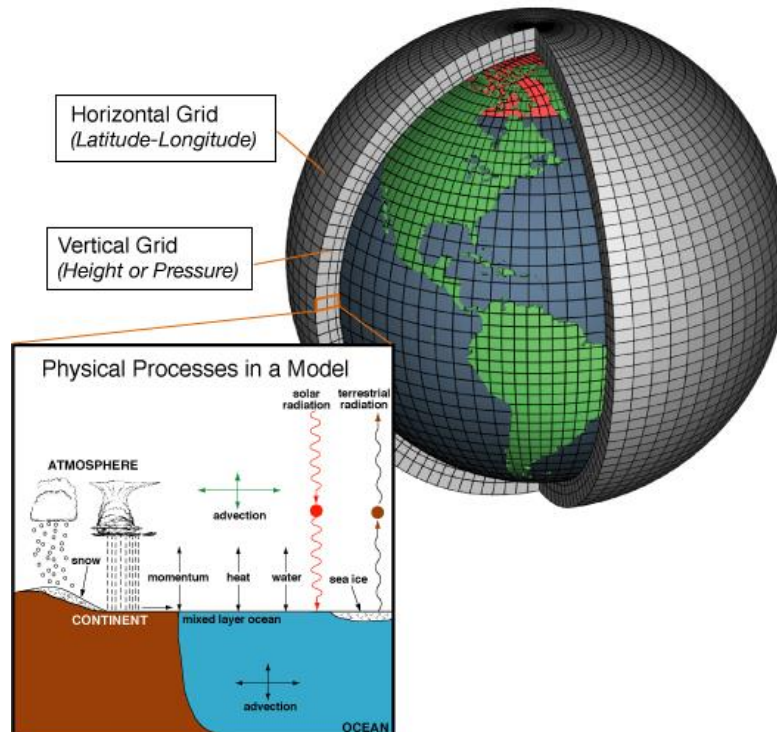


Figura 3.2. Esquema conceptual utilizado en los modelos climáticos globales, así como un esquema de los procesos físicos que ocurren en un modelo climático. Figura extraída de la página de la NOAA (<https://www.noaa.gov/>).

HiFLOR fue desarrollado a partir del modelo FLOR al incrementar su resolución horizontal de las componentes atmosféricas y terrestres a 25 km, mientras que la resolución horizontal de su componente oceánica no fue alterada, incluyendo solo algunos cambios menores en parametrizaciones (ver figura 3.2). La principal novedad que presenta este modelo es que es el primer modelo global de alta resolución parcialmente acoplado. Este acoplamiento consiste en que la interacción entre el aire y el mar actúa para escalas de tiempo inferiores a 5 días, mientras que para escalas de tiempo superiores se produce una relajación de la SST (del inglés, “Sea Surface Temperature”) a valores de SST climatológicos observados para las simulaciones de clima pasado, y a valores de SST obtenidos a partir de conjuntos multi-modelo de simulaciones climáticas globales para las simulaciones de clima futuro. De este modo se evitan derivas y sesgos de la SST a largo plazo que se observan frecuentemente cuando el modelo oceánico evoluciona libremente, al tiempo que se tienen en cuenta las interacciones entre ciclones y SST que son muy importantes para ciclones intensos y que actúan en escalas de tiempo cortas (días).

Además de ser el primer modelo global parcialmente acoplado, este modelo presenta la novedad de tener la capacidad de simular con bastante precisión la estructura, distribución y variación de ciclones tropicales extremadamente intensos (categorías 4 y 5 dentro de la escala de Saffir-Simpson). Para conseguir esta mejora en la reproducción de ciclones tropicales con respecto a su modelo antecesor FLOR, se realizó una reducción de la rugosidad del océano en situaciones de viento intenso como puede ocurrir en el desarrollo de ciclones tropicales (Murakami et al., 2015).

Las simulaciones de este modelo cubren condiciones de clima presente (simulaciones históricas; 1986-2005) y escenarios de clima futuro (2016-2035; 2081-2100) con el escenario de emisiones del IPCC (RCP4.5), que es considerado como un escenario intermedio en cuanto a emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

3.2.2 Modelo ROM

Este modelo regional acoplado, comprende el modelo atmosférico regional (REMO), el modelo oceánico del Instituto Max Planck (MPIOM), el modelo del ciclo del carbono oceánico de Hamburgo (HAMOCC) y el modelo de descarga hidrológica (HD) que se acoplan a través del acoplador OASIS. De los modelos mencionados anteriormente, solo el modelo REMO es regional, el resto son modelos de configuración global. El acrónimo de este modelo (ROM) proviene de la combinación REMO-OASIS-MPIOM (Sein et al., 2015).

El componente oceánico de ROM es el modelo oceánico MPIOM, desarrollado en el Instituto Max Planck de Meteorología (Marsland et al., 2003; Jungclaus et al., 2013). MPIOM es un modelo oceánico de ecuaciones primitivas de superficie libre, que utiliza las aproximaciones de Boussinesq y de incompresibilidad. El modelo está formulado en una cuadrícula C ortogonal curvilínea de Arakawa (Arakawa & Lamb, 1977) con una alta resolución que va desde 5 km en zonas cercanas al oeste del Mediterráneo y zonas del Atlántico Norte, a resoluciones cercanas a los 220 km en zonas cercanas al continente

antártico. Este modelo además cuenta con 40 niveles verticales con un incremento del espesor de sus capas a medida que aumenta la profundidad.

REMO es el modelo regional de atmósfera (p. ej., Jacob et al., 2001). Este modelo toma las parametrizaciones físicas del modelo climático global ECHAM v4 y v5 (Roeckner et al., 1996, 2003). La malla computacional de REMO tiene una resolución horizontal de 25 km y cuenta con 27 niveles verticales híbridos con un dominio que cubre toda Europa y partes del Ártico y del Atlántico Norte. Para evitar una baja resolución en las zonas cercanas a los polos, REMO utiliza una cuadrícula rotada, con el ecuador y los polos del sistema rotados.

El modelo de descarga hidrológica (HD; Hagemann & Dümenil, 1998) simula globalmente los flujos laterales de agua dulce en la superficie terrestre. Este modelo también es parte del modelo global acoplado (AOGCM ECHAM5/MPIOM; Roeckner et al., 2003; Jungclaus et al., 2006). Por último, tenemos el modelo del ciclo del carbono del océano de Hamburgo (HAMOCC; Maier-Reimer, 1993), el cual simula las interacciones entre las reservas de carbono existente en la atmósfera, el océano y los sedimentos. El modelo además recibe información acerca de los cambios de temperatura y salinidad de MPIOM para calcular las tasas de intercambio atmósfera-océano.

El acoplamiento entre el modelo atmosférico (REMO) y el modelo global de océano (MPIOM) es realizado mediante OASIS (Valcke et al., 2003). No obstante, este acoplamiento solo abarca el dominio del modelo regional REMO. El modelo oceánico que se ejecuta en el dominio acoplado recibe los flujos de calor, agua dulce y momento calculados en REMO a una frecuencia específica, y pasa las condiciones de la superficie del mar al modelo atmosférico y viceversa. En el dominio desacoplado, MPIOM es impulsado por el forzamiento atmosférico prescrito proporcionado por el modelo climático global MPI-ESM-LR (Giorgetta et al., 2013), que tiene una resolución horizontal de 200 km.

El modelo ROM en esta tesis ha sido comparado con una versión desacoplada del mismo (ver figura 3.3) que solo usa la componente atmosférica del modelo (REMO). En la simulación desacoplada, la SST necesaria para condiciones de contorno sobre el océano se toma de MPI-ESM-LR. Por lo tanto, la principal diferencia entre las simulaciones realizadas con ROM y REMO es el efecto del acoplamiento océano-atmósfera interactivo. Mientras que ROM es capaz de simular las retroalimentaciones existentes entre la atmósfera y el océano, en REMO se prescriben las variables oceánicas y por lo tanto no responden a los cambios en la atmósfera. En ambas simulaciones el escenario de emisiones que se utiliza es el RCP8.5 que es uno de los más negativos en cuanto al ritmo de emisiones.

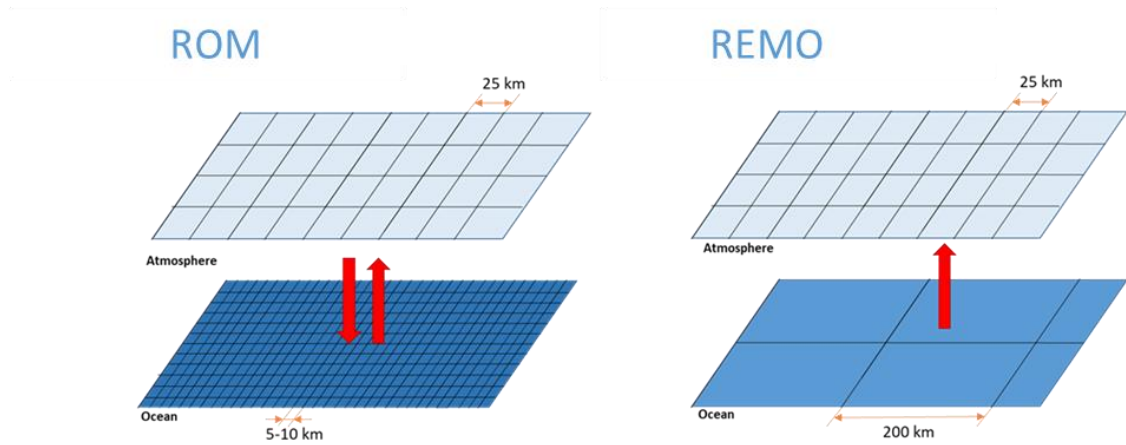


Figura 3.3. Representación de la malla horizontal de atmósfera y océano para el modelo ROM y REMO. Elaboración propia

El modelo ROM ha sido utilizado en otros trabajos sobre medicanes, en este caso en el trabajo de Gaertner et al. (2018) donde se realizó una comparación de modelos acoplados y no acoplados en clima presente y anidados en datos de reanálisis. La principal novedad de usar el modelo ROM en este estudio es que es el primer modelo regional totalmente acoplado utilizado para proyecciones de clima futuro relativas a medicanes. Y, además, nos permite realizar un análisis de sensibilidad con su versión no acoplada (REMO), para intentar estudiar y entender como el acoplamiento afecta a la simulación de ciclones con características tropicales.

4

Metodología

Para cumplir con los objetivos de esta tesis, es necesario explicar las diferentes metodologías que han sido aplicadas en cada uno de los capítulos de resultados. Aunque todas ellos se explican de una manera detallada y exhaustiva en los capítulos 5, 6 y 7 de esta tesis, en este capítulo se presentan las diferentes herramientas de manera general y conjunta.

En los tres capítulos de resultados se aplica el mismo procedimiento para la detección de medicanes. En este caso las herramientas para diagnóstico e identificación de medicanes constan de dos partes básicas. Primero la detección y seguimiento de ciclones mediante el uso del algoritmo de Picornell et al. (2001), y después, una vez identificados todos los ciclones, se aplica el método CPS o método de Hart (2003), para analizar la estructura térmica del ciclón con el fin de detectar aquellos ciclones que presenten características tropicales y, por tanto, puedan ser identificados como medicanes.

En cuanto al procesamiento de los datos, las metodologías aplicadas son muy similares en los tres capítulos, destacando la técnica del método del mejor ajuste de funciones (“Best Fit Function Calculation”), que permite el estudio de variables como pueden ser el viento, precipitación y viento térmico del ciclón en altura (-VTU) a partir de sus distribuciones de probabilidad. Esta técnica permite cuantificar los cambios de estas variables en clima futuro (capítulos 5 y 6), así como comparar los datos obtenidos en base a cambios en la metodología de caracterización del carácter térmico de los ciclones (capítulo 7).

4.1 Herramientas de diagnóstico e identificación de medicanes

En este apartado, se describen los métodos usados en esta tesis para la detección y caracterización de medicanes (ver figura 4.1). En el primer subapartado (4.1.1) se analiza el procedimiento para la detección y seguimiento de ciclones, mediante el método de Picornell et al. (2001), mientras que en el segundo subapartado (4.1.2) se analiza el procedimiento para la detección de ciclones con características tropicales mediante el uso del método CPS (Hart, 2003).

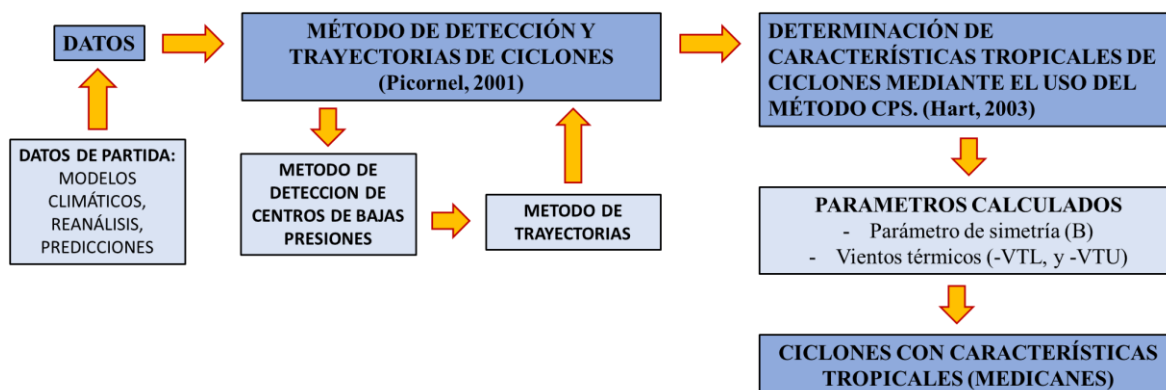


Figura 4.1. Esquema de diagnóstico e identificación de ciclones con características tropicales en el Mediterráneo. Elaboración propia.

4.1.1 Detección y trayectorias de ciclones en el Mediterráneo

En los tres trabajos que componen esta tesis se usó el método de Picornell et al. (2001) para la detección y seguimiento de trayectorias de ciclones. Este método está recomendado especialmente para el estudio de ciclones de mesoescala y es adecuado para la identificación objetiva de ciclones en estudio de cambio climático. El método de Picornell se divide en dos partes, la primera parte corresponde al apartado de detección de ciclones y eliminación de ciclones débiles, mientras que la segunda parte se basa en el estudio de las trayectorias que siguen estos ciclones.

Método de detección: esta primera parte consiste sobre todo en detectar los centros de bajas presiones relativas. Este algoritmo consta de tres pasos:

1. **Detección de centros de bajas presiones:** en este punto se consideran todos los mínimos de presión relativa como ciclones potenciales. Para ello, primero se aplica un análisis de detección de mínimos de presión y después se aplica un filtro de Cressman con un radio de 200 km (Sinclair, 1997). El filtro se aplica para suavizar el campo de presión a nivel del mar, que puede tener detalles ruidosos, y eliminar así posibles estructuras ciclónicas demasiado pequeñas.
2. **Filtro de ciclones débiles:** en este paso se estudia el comportamiento del campo de presión en las ocho direcciones principales que rodean los mínimos de presión, tras lo cual se seleccionan ciclones que tengan un gradiente superior a 0.005 hPa/km en al menos seis de las ocho direcciones, lo que equivale a una velocidad media del viento geostrofico de 5 m/s.
3. **Restricción de tamaños del ciclón:** si dos mínimos de presión están más cerca de cuatro puntos de malla, solo se selecciona aquel que tiene una mayor intensidad, con el fin de evitar la selección de bajas secundarias muy juntas entre sí.

Método de seguimiento de trayectorias: en este punto del procedimiento se sigue un método automatizado para determinar las trayectorias de los ciclones de acuerdo con Alpert et al. (1990). Este método se basa en la suposición de que el nivel de 700 hPa es el nivel de dirección del movimiento de un ciclón (Gill & Adrian, 1982). Por lo tanto, considerando las distintas ubicaciones del ciclón en sucesivos pasos de tiempo, unido a las componentes del viento horizontal a 700 hPa, se puede determinar la dirección preferente del ciclón a lo largo del espacio, haciendo posible calcular la trayectoria del ciclón a lo largo de su ciclo de vida.

4.1.2 Determinación de características tropicales de ciclones mediante el uso del método CPS

La formación y desarrollo de ciclones es uno de los principales temas de investigación en la comunidad meteorológica. Al principio de los años 50, se creía que los ciclones tropicales tenían un ciclo de vida completamente diferente al de los ciclones extratropicales (Bjerknes & Solberg, 1922; Charney & Eliassen, 1964). Con el avance de las técnicas de detección por satélite y de una mayor cantidad de observaciones marítimas, se comenzó a identificar ciclones que podían poseer características tanto tropicales como extratropicales (seclusiones cálidas y ciclones subtropicales; Pierce, 1939). El descubrimiento de ciclones con naturaleza híbrida da lugar a que sea muy difícil determinar la naturaleza del ciclón solo con ayuda de imágenes de satélite y observaciones. Como resultado del estudio de los numerosos casos de ciclones no convencionales, la comunidad meteorológica demandaba el desarrollo de un método de tres dimensiones para estudiar la estructura y naturaleza de los ciclones. El objetivo de este nuevo método era poder detectar como era la temperatura del núcleo del ciclón (cálido o frío), así como determinar su carácter frontal.

Tras varias propuestas para un método de este tipo (p. ej., Beven, 1997; O. Reale & Atlas, 2001), el trabajo realizado por Hart (2003) permitió aplicar un método para detectar y representar la estructura térmica del ciclón en tres dimensiones y que a su vez permitía la clasificación de los ciclones con respecto a su simetría horizontal y el carácter frío o cálido de su núcleo.

En esta tesis, se aplica el método CPS o del espacio de fases de ciclones (Hart, 2003) para seleccionar medicanes entre todos los ciclones detectados. De acuerdo con Hart (2003), el método CPS puede ser utilizado para clasificar cualquier ciclón con una circulación cerrada en su superficie a partir de un modelo numérico o de resultados de datos de reanálisis. Una vez aplicado este método, el ciclón se puede clasificar según su estructura térmica (extratropical, tropical o híbrido). Para ello, se utilizan tres parámetros que se definen a continuación:

Parámetro de simetría térmica (b): este parámetro es el gradiente de espesor de la capa de 900-600 hPa a través del ciclón, y proporciona una medida de la naturaleza frontal del ciclón. Este parámetro puede expresarse de la siguiente manera:

$$B = h(\overline{\Delta Z_R} - \overline{\Delta Z_L}) \quad (4.1)$$

donde, Z es la altura geopotencial, R y L indican el lado derecho (R) y el lado izquierdo (L) del ciclón, y la barra superior indica la media del área sobre un semicírculo del radio considerado para el cálculo de esta ecuación. h es un parámetro que tiene el valor de 1 para el hemisferio norte y -1 para el hemisferio sur. B se calcula generalmente dentro de un radio de 500 km del centro del ciclón, aunque en esta tesis será de 150 km debido al pequeño tamaño de los medicanes. Dependiendo del valor de B , puede haber dos posibilidades:

- $B \approx 10 \text{ m} \rightarrow \overline{\Delta Z_R} \approx \overline{\Delta Z_L}$, es decir, el ciclón tiene características no frontales.
- $B > 10 \text{ m} \rightarrow \overline{\Delta Z_R} > \overline{\Delta Z_L}$ en el hemisferio norte. En este caso el ciclón tiene naturaleza frontal, con gradientes de temperatura horizontales dentro de la región ciclónica.

Viento térmico (-VTL, -VTU): Los parámetros del viento térmico se evalúan sobre capas en la parte inferior de la troposfera (-VTL: 900–600 hPa) y en la parte superior (-VTU: 600–300 hPa) de la siguiente manera:

$$-V_T^L = \left. \frac{\partial(\Delta Z)}{\partial \ln p} \right|_{900 \text{ hPa}}^{600 \text{ hPa}} \quad (4.2)$$

$$-V_T^U = \left. \frac{\partial(\Delta Z)}{\partial \ln p} \right|_{600 \text{ hPa}}^{300 \text{ hPa}} \quad (4.3)$$

Donde ΔZ es la diferencia entre la altura geopotencial máxima y la mínima en niveles de presión constante dentro del mismo radio que B . -VTU and -VTL miden la estructura térmica vertical del ciclón.

Si $-V_T^L$ & $-V_T^U < 0$: el ciclón presenta núcleo frío

Si $-V_T^L > 0$ & $-V_T^U < 0$: el ciclón presenta núcleo híbrido

Si $-V_T^L$ & $-V_T^U > 0$: el ciclón presenta núcleo cálido

La combinación de estos tres parámetros permite obtener dos gráficos 2D diferentes con un sistema de coordenadas en la forma de $(-VTL, B)$ y $(-VTL, -VTU)$. Ambos diagramas aportan la información necesaria para deducir la naturaleza frontal y la estructura termal de los ciclones.

Como se ha comentado anteriormente para la detección de medicanes, es necesario cambiar el radio en el que se calculan los parámetros del método CPS. El método original usó un radio de 500 km. No obstante, son muchos los trabajos sobre medicanes que utilizan un radio menor de 200 km para calcular estos parámetros (Cavicchia et al., 2014; Romera et al., 2017). En los diferentes trabajos de esta tesis se usará un radio de 150 km.

Son muchos los trabajos que han usado el método CPS en zonas del Mediterráneo para identificar ciclones con características tropicales (Miglietta et al., 2011; Kouroutzoglou et al., 2021). En esta tesis se han catalogado como medicanes aquellos ciclones que tienen valores de $-V_T^L$ & $-V_T^U > 0$ (núcleo cálido profundo) y parámetro B < 10 m (carácter simétrico) en al menos un paso de tiempo. Este criterio es el mismo que usaron Cavicchia et al. (2014a) en su climatología de medicanes.

4.2 Procesamiento de datos

En este punto, se describen las técnicas de procesamiento de datos aplicadas en esta tesis.

4.2.1 Estadísticos básicos

Uno de los medios para calcular la dispersión de los datos con respecto a la media (μ) es la desviación estándar (σ). Tanto la media como la desviación estándar se calculan de la siguiente manera:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (4.4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (4.5)$$

donde x_i son un conjunto de N valores que tienen igual probabilidad.

4.2.2 Calculo de anomalías

El análisis de anomalías es uno de los métodos fundamentales para el diagnóstico de variabilidad climática a la hora de realizar investigaciones acerca del clima. En esta tesis se han realizado cálculos de anomalía de variables (A) con respecto a su periodo temporal ($\overline{A_t}$).

$$A'_t = A - \overline{A_t} \quad (4.6)$$

En cuanto a las variables utilizadas destacan la precipitación en medicanes, así como el estudio de frecuencia espacial y estacional de ciclones desde un punto de vista climático.

4.2.3 Método del mejor ajuste de funciones

Algunas de las variables meteorológicas como el viento máximo que se utilizan para medir la intensidad en ciclones tropicales, no siguen una distribución de tipo normal, sino que en la mayoría de los casos suelen ser distribuciones que presentan una elevada frecuencia de aparición de valores bajos y largas colas en su distribución (ver figura 4.2). Esto hace que, si queremos comparar valores extremos, sea necesario aplicar un análisis que permita encontrar distribuciones de probabilidad que se ajusten de la mejor manera posible a nuestros datos.

Para ello se aplica el análisis conocido como “Best Fit Function Calculation”. Este método se basa en encontrar las funciones que mejor se ajustan a una distribución de probabilidad empírica. Estas se calculan comparando el criterio de información bayesiano (Schwarz, 1978) al ajustar numerosas distribuciones continuas potenciales en el paquete de software MATLAB (p. ej., Beta, Exponencial, Gamma, generalizada de Pareto, Gaussiana inversa, Lognormal, Normal, Weibull, etc.).

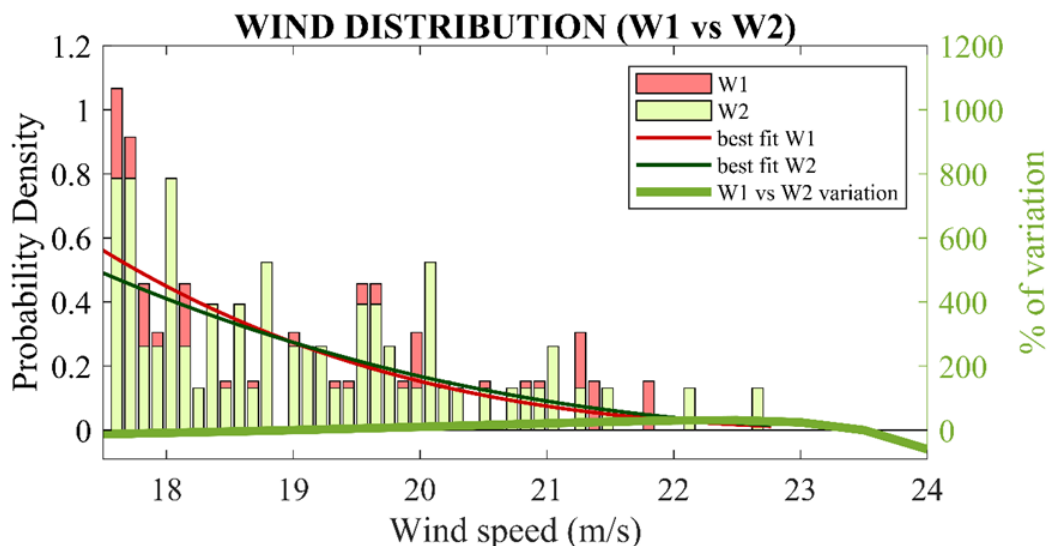


Figura 4.2. Ejemplo del método de mejor ajuste de funciones para dos distribuciones de velocidad máxima de viento en medicanes (líneas roja y verde oscura) con su tasa de variación entre ambas (línea verde clara).

En general se observa que la distribución que más se suele ajustar tanto a los datos de viento en superficie como de viento térmico en altura (-VTU) ha sido la distribución generalizada de Pareto (ver figura 4.2; Kotz & Nadarajah, 2000). Además, esta distribución se usa a menudo para modelizar las colas o valores extremos de distribuciones.

Una vez calculadas las funciones que mejor se ajustan a las distribuciones, se puede realizar un análisis de comparación entre dos distribuciones mediante un cálculo de tasa de variación (ver figura 4.2; Ecuación 4.7). Con este último paso, se pretende observar si hay cambio en los valores más extremos de dichas distribuciones.

$$VAR (\%) = \left(\frac{A-B}{A} \right) * 100 \tag{4.7}$$

donde A es el valor de la primera distribución que comparar y B el valor de la segunda.

4.2.4 Gráficos compuestos

Un gráfico compuesto ("composite" en inglés) se obtiene a partir de la media aritmética de un conjunto de datos de variables meteorológicas a lo largo de un dominio espacial. Este tipo de gráficos es muy útil para conocer las características espaciales de un determinado fenómeno meteorológico, realizando una media de los diferentes pasos temporales que tengamos para distintos casos del mismo tipo (por ejemplo, distintos casos de ciclones con características tropicales). Además del cálculo de medias, este tipo de gráficos se pueden utilizar para calcular anomalías y determinar si éstas son estadísticamente significativas.

En esta tesis, se va a utilizar esta técnica para conocer la precipitación media asociada a ciclones para clima presente y clima futuro, así como para el estudio de las diferencias entre ambos periodos.

4.2.5 índice de disipación de potencia

Una de las cuestiones sobre medicanes que más preocupa es la capacidad destructiva que pueden tener este tipo de ciclones. Una forma de cuantificar la intensidad de ciclones tropicales es mediante el índice de disipación de potencia o PDI (del inglés, Power Dissipation Index; Emanuel, 2005b). Este método es un buen indicador de la energía e intensidad que pueden tener los ciclones tropicales, acumulada en un periodo de tiempo determinado (estacional, anual o decadal), o también puede cuantificar la intensidad de un ciclón de manera individual.

El PDI puede ser calculado como la suma de la velocidad máxima del viento al cubo de todos los pasos de tiempo de vida del ciclón con características tropicales.

$$PDI = \sum_{s=1}^{\emptyset} \sum_{\tau=1}^{d(s)} u^3(s, \tau) \quad (4.8)$$

Donde \emptyset es el numero total de ciclones, d es la duración de cada ciclón (s) y u es la velocidad máxima de viento en cada paso de tiempo (τ). Para el cálculo del PDI para cada ciclón de manera individual, el cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$PDI_{IS} = \sum_{\tau=1}^{d(s)} u^3(\tau) \quad (4.9)$$

4.2.6 Evaluación de hipótesis

Cuando se realizan cálculos estadísticos para obtener conclusiones, es necesario realizar alguna prueba de significación estadística para evaluar si la conclusión es robusta o no. La evaluación de hipótesis es una poderosa herramienta para poder argumentar sobre un fenómeno específico que esté basado en propiedades estadísticas. En investigación climática, es esencial realizar este tipo de pruebas, para excluir la posibilidad de que los resultados hayan sido obtenidos por azar.

Los pasos a seguir para realizar una evaluación de hipótesis son los siguientes:

1. Se considera una **hipótesis inicial** (hipótesis nula; H_0): La prueba de hipótesis proporciona un conjunto de métodos estadísticos, que se aplican sobre una muestra de datos, para obtener el grado de confianza para tomar una decisión con respecto a aceptar o rechazar H_0 .
2. Se lanza una **hipótesis alternativa** (H_1) que puede o no aceptarse con cierto grado de confianza.
3. Se realiza el **estudio de las hipótesis**: para este paso, los parámetros más comúnmente utilizados son α , que es el nivel de significación, y p . La comparación de ambos nos permitirá determinar si el resultado es estadísticamente significativo o no:
 - a. Si $p > \alpha$, se acepta la hipótesis nula (H_0) y se rechaza la hipótesis alternativa (H_1).
 - b. Si $p \leq \alpha$, se rechaza la hipótesis nula (H_0), y se acepta la hipótesis alternativa.

El resultado será estadísticamente significativo en el segundo caso, cuando se rechaza la hipótesis nula.

Para la prueba de hipótesis, se dispone de un número considerable de métodos, dependiendo de la distribución estadística de los datos. Estas pruebas pueden ser divididas en pruebas paramétricas y no paramétricas. Las pruebas paramétricas asumen que los datos siguen una distribución estadística determinada (por ejemplo, una distribución normal). Las pruebas no paramétricas no asumen ninguna distribución estadística particular.

En esta tesis, se utilizan principalmente dos pruebas de evaluación de hipótesis, la primera de ellas es la **t de Student** (Efron, 1969), que es una prueba paramétrica mientras que la segunda, la prueba U de **Mann-Whitney** (Wilks, 2006), es no paramétrica. La prueba t de Student ha sido usada para saber si dos conjuntos de datos están significativamente correlacionados entre sí (análisis de significación de la correlación) o si una regresión lineal en una serie temporal tiene una tendencia significativa (análisis de significación de la tendencia). La prueba U de Mann-Whitney ha sido usada para comprobar si las distribuciones de vientos en medicanes (con distribución no conocida) presentan diferencias significativas entre sí.

PARTE III

RESULTADOS

CHAPTER

5

Potential Increase in Hazard From Mediterranean Hurricane Activity With Global Warming

This chapter shows the results of the paper published in American Geophysical Union: *Potential Increase in Hazard From Mediterranean Hurricane Activity With Global Warming* <https://doi.org/10.1029/2018GL081253>

Abstract

Mediterranean hurricanes (medicanes) are intense cyclones that acquire tropical characteristics, associated with extreme winds and rainfall, thus posing a serious natural hazard to populated areas along Mediterranean coasts. Understanding how medicanes will change with global warming remains, however, a challenge, because coarse resolution and/or the lack of atmosphere-ocean coupling limit the reliability of numerical simulations.

Here we investigate the medicanes' response to global warming using a recently developed 25-km global coupled climate model, which features a realistic representation of medicanes in present climate conditions. It is found that despite a decrease in frequency, medicanes potentially become more hazardous in the late century, lasting longer and producing stronger winds and rainfall.

These changes are associated with a more robust hurricane-like structure and are mainly confined to autumn. Thus, continued anthropogenic warming will increase the risks associated with medicanes even in an intermediate scenario (Representative Concentration Pathway, RCP4.5), with potential natural and socioeconomic consequences.

5.1 Introduction

Medicanes arise from extratropical cyclones (ECs), which undergo a tropical transition process over the Mediterranean Sea (Emanuel, 2005a; Moscatello et al., 2008). They resemble tropical cyclones (TCs) as they develop a warm core, symmetric structure and concentric convective clouds around a central eye-like feature (Tous & Romero, 2013). Given their size of a few hundred kilometers (Gaertner et al., 2018), dynamical downscaling of global climate models (GCMs) outputs with regional climate models (RCMs) has been so far the most common method to study the impact of Anthropogenic Climate Change (ACC) on medicanes. RCMs project a decrease in the number of medicanes over the 21st century, accompanied by an increasing maximum wind intensity (Gaertner et al., 2007; Romera et al., 2017; Cavicchia et al., 2014b; Walsh et al., 2014). However, these results based on RCMs may have important limitations due to (1) the lack of atmospheric-ocean coupling and (2) the lack of an interactive cross-scale coupling with their GCMs (Lorenz & Jacob, 2005). These two factors can lead to: (1) misrepresent characteristics of medicanes (Ricchi et al., 2017; Gaertner et al., 2018) and overestimate medicanes' intensity (Schade & Emanuel, 1999; Akhtar et al., 2014), and (2) solutions over the limited domain that are dynamically inconsistent with global drivers (Køltzow et al., 2011).

Here we investigate the impact of ACC on medicanes' activity with the High-Resolution Forecast-Oriented Low Ocean Resolution (HiFLOR; section 5.2) model (Vecchi et al., 2014; Murakami et al., 2015), a 25-km GCM developed at the National Oceanic and Atmospheric Administration Geophysical Fluid Dynamics Laboratory. While an atmosphere-only global model has recently been able to resolve medicanes (Tous et al., 2016), ours is the first study in which a global coupled model at high horizontal atmospheric resolution is used to study the effect of ACC on multiple features of medicanes. HiFLOR has proven to be a useful tool in studying the response of TCs to ACC (Murakami et al., 2017, 2018; Bhatia et al., 2018), and it features a horizontal resolution sufficiently high to resolve medicanes' structure (supporting information figure S1). Being a global model, HiFLOR explicitly accounts for nonlinear dynamics associated with extratropical weather systems (e.g., cutoff lows and wave breaking) and it is one of the few GCMs that is capable to capture category 4 and 5 TCs (Murakami et al., 2015). Being a coupled model, it includes wind-induced ocean mixing and representation of the oceanic mixed layer. However, due to the relatively low resolution of the ocean component of the model (see section 5.2.1), strong sea surface temperature (SST) gradients in small horizontal scale, which are usually present in the Mediterranean Sea (Ricchi et al., 2017), are not captured.

We perform three 50-year numerical simulations (section 5.2), representative of different 20-year periods: the climatological run (CLIM), representative of the climate mean state during the years 1986–2005, and the early future (EARLY) and late future (LATE) Representative Concentration Pathway (RCP4.5; van Vuuren et al., 2011) runs, representative of the multimodel projected SST and radiative forcing conditions during the periods (2016–2035) and (2081–2100), respectively. Under the RCP4.5 scenario,

global temperature change is likely to be within 2 and 4 °C by the end of the 21st century, and it is compatible with measures to reduce CO₂ emissions and land use to stabilize radiative forcing at 4.5 W/m² by 2100 (Collins et al., 2013). In these three numerical experiments SSTs are restored, with a timescale of about 5 days, to the reference monthly SSTs climatology for each time period (section 5.2). This experimental setup (van der Wiel et al., 2017; Bhatia et al., 2018) prevents the development of substantial biases in SSTs arising in the freely running coupled model (Li & Xie, 2012), while still retaining the effects of air-sea interaction for timescale shorter than 5 days.

5.2 Methods

5.2.1 The HiFLOR GCM

HiFLOR (Murakami et al., 2015) is the high atmospheric resolution (grid spacing of ~25 km) version of the FLOR (Vecchi et al., 2014) model (~50 km). FLOR was derived from the Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Climate Model, version 2.5 (GFDL CM2.5 [Delworth et al., 2012]). CM2.5 features a ~ 0.5 × 0.5° atmospheric resolution with 32 vertical levels. FLOR is identical to CM2.5 but features a coarser ocean horizontal resolution (1 × 1°), which increases toward the equator. This considerably reduces running times, allowing for long integrations. Both CM2.5 and FLOR have been used in several studies on regional climate change (e. g., Delworth & Zeng, 2014; Kapnick et al., 2014; Delworth et al., 2016; Pascale et al., 2017; Bhatia et al., 2018). GFDL HiFLOR has been developed from FLOR by decreasing the horizontal grid spacing of the atmospheric/land component from 50 to 25 km, while leaving most of the subgrid-scale physical parameterizations unchanged. The ocean and ice components of HiFLOR are at a more moderate resolution (~100-km mesh), which is identical to FLOR's resolution. More information on GFDL CM2.5, FLOR, and HiFLOR is publicly available at <https://www.gfdl.noaa.gov/cm2-5-and-flor/>.

Relative to FLOR, HiFLOR considerably improved the simulation of the structure, global distribution, and seasonal and interannual variations of TCs (Murakami et al., 2015, 2016; W. Zhang et al., 2016). HiFLOR also proved to be able to simulate and predict extremely intense TCs (categories 4 and 5) and their interannual variations (Murakami et al., 2015). This represented the first time a fully coupled GCM had been able to simulate such extremely intense TCs in a multicentury simulation. This better representation of TCs and the response to climate also lead to improved skill (relative to FLOR) in predicting the frequencies of major hurricanes in the North Atlantic as well as landfalling TCs over its western regions a few months in advance (Murakami et al., 2016).

5.2.2 Restored-SST simulations

To prevent the development of substantial biases in SSTs arising in the freely running coupled model, which impact the simulation as well as the response to climate variability and change of TCs (Murakami et al., 2015; Vecchi et al., 2014), while still retaining the effects of air-sea interaction for timescale shorter than 5 days, we use three restored-SST numerical experiments (50 year each). In each experiment, simulated SSTs are restored

toward (1) the climatological monthly SST means during the period 1986–2005 (CLIM); (2) the sum of observed climatological monthly SST means over 1986–2005 and the multimodel projected climatological SST anomalies (by models from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5; see below) during the period 2016–2035 relative to 1986–2005 from the RCP4.5 scenario (EARLY); and the sum of observed climatological monthly SST means over 1986–2005 and the multimodel projected climatological SST anomalies during the period 2081–2100 from the RCP4.5 scenario (LATE). It is therefore important to note that here we run idealized simulations that are representative of each 20-year periods where interannual variability is not considered. These runs are simulations with 50 years of repeating climatology in each climate state, and thus, the 50 years in each experiment are statistically equivalent. The 20 years are the periods used to define the climatology for each state. These experiments are described in further detail in previous studies (van der Wiel et al., 2017; Bhatia et al., 2018)

In these runs, simulated SSTs are nudged toward the target SST while allowing high-frequency (i.e., on timescales smaller than the restoration timescale τ) SST fluctuations and air-sea interactions:

$$\frac{\partial SST(x,y,t)}{\partial t} = K(x,y,t) + \frac{1}{\tau} [SST(x,y,t)_T - SST(x,y,t)], \quad (5.1)$$

where $\partial SST/\partial t$ is the time tendency of SST in the nudged-SST experiment, K is the coupled model's tendency term for SST from the model governing equations, τ is the nudging timescale (5 days in this case), and SST_T is the target SST toward which the model is nudged (interpolated to the model time step from a monthly mean value).

5.2.3 Cyclonic and medicane detection

The detection of medicanes is done in two steps. First, a cyclone tracking method (Picornell et al., 2001) is applied. It has been designed particularly for mesoscale cyclones and is therefore highly suited to the identification of medicanes. The initial detection is based on the sea level pressure field, and the wind field at 700 hPa is used as an auxiliary variable for obtaining cyclone tracks. The cyclone intensity is measured by the maximum wind at 10 m every 6 hr within the cyclonic region. To focus the analysis on the most intense cyclones, only those cyclones exceeding tropical storm intensity (17.5 m/s) are considered in this work. Additionally, cyclones are required to last at least 36 hr. ECs are herein defined as those identified cyclones (in this first step) lasting at least 36 hr, of which 24 hr (not consecutively) must be over the sea, a measure of the overall cyclonic maritime activity.

The second step is to filter out those cyclones with tropical characteristics based on their thermal structure. This is done by applying the CPS method (Hart, 2003). The CPS is a straightforward and objective method to represent the 3-D structure of cyclones and classify them. The CPS is constructed by three parameters: B , $-VTL$, and $-VTU$, derived from the geopotential field within the 900- to 600-hPa and 600- to 300-hPa layers. B measures the horizontal thermal symmetry of the cyclone within the lower layer, with positive values above 10 m indicating an asymmetric (frontal) cyclone and values below

that threshold indicating a symmetric (nonfrontal) cyclone. The thermal wind parameters for the lower layer ($-VTL$) and the upper layer ($-VTU$) describe the thermal anomaly in the 3-D structure of the cyclone. Values above 0 indicate a warm core and negative values a cold core. Due to the small size of medicanes, the calculation of the CPS parameters has been applied to a reduced radius of 150 km from the cyclone center, as opposed to the typical radius of 500 km (Hart, 2003). In this study, medicanes are defined as the subset of cyclones, which acquire deep warm core, that is, tropical structure for at least two time steps (i.e., 12 not necessarily consecutive hours) while being over the ocean. The tropical structure is identified in the CPS as $-VTL > 0$ m, $-VTU > 0$ m, and $B < 10$ m. This last criterion in B is to ensure that medicanes are nonfrontal as would be expected in a TC (Hart, 2003).

For medicane intensity, the comparison is done with respect to the only available study (Cavicchia et al., 2014b), which analyses it. Note that this study changes the methodology detection with respect to the reference climatology (Cavicchia et al., 2014a), resulting in more medicanes detected. Medicane's track density in Figure 5.1a is obtained by applying a filter (200-km radius average to avoid noisy patterns) to the number of track points per year. Number of track point is defined as the number of times when a medicane has been in each grid point.

5.2.4 Power dissipation index

The power dissipation index (Emanuel, 2005b) is calculated as the sum over the lifetime of the storm of the maximum surface wind speed cubed:

$$PDI = \sum_{s=1}^{\phi} \sum_{\tau=1}^{d(s)} u^3(s, \tau), \quad (5.2)$$

where ϕ is the total number of storms, d is the duration of each storm (s), and u is the wind maximum speed at each time interval (τ). Although PDI is defined herein for certain period of time, PDI can also be computed for individual storms (PDI_IS), which is equally defined but without the first summatory in s .

5.2.5 Tropicality index

We define the tropicality index (TI) as the sum over the lifetime of the storm of $-VTU$ values:

$$TI = \sum_{\tau=1}^{d(s)} -VTU(s, \tau), \quad (5.3)$$

where d is the duration of each storm (s) and $-VTU$ is thermal wind parameter for upper levels from the CPS, at each time interval (τ). In other words, TI is the accumulation of $-VTU$ in each storm, a measure of how tropical the storm is overall.

5.2.6 Statistical significance

The statistical significance analysis of the differences between periods' distributions is computed through the p value of a two-sided Wilcoxon rank sum test (Wilks, 2006). This computation tests the null hypothesis that data in x and y are samples from continuous

distributions with equal medians, against the alternative that they are not. The test assumes that the two samples are independent. This test is equivalent to the Mann-Whitney U test. Unlike the Student's t test, it does not require the assumption of normal distributions and it is nearly as efficient as the Student's t test on normal distributions. Statistical significance analysis for correlations is obtained through the p value of a two-sided Student's t test. For Figure 5.3d, a bootstrap method is used.

5.2.7. Best fit function calculation

The functions that best fit empirical probability distribution Figure 5.3a are calculated by comparing the Bayesian information criterion (Schwarz, 1978) when fitting numerous potential continuous distributions in the MATLAB software package (e.g., Beta, Exponential, Gamma, Generalized Pareto, Inverse Gaussian, Lognormal, Normal, Weibull, etc). The function with the lowest Bayesian information criterion is then selected. Generalized Pareto (Kotz & Nadarajah, 2000) distribution was found as the best fit function for each CLIM's and LATE's distributions. This distribution is often used to model the tails or extreme values of another distribution.

5.3 Results and discussion

Compared to climatology (Cavicchia et al., 2014a), HiFLOR reasonably matches observational estimates of 1.9 ± 1.3 medicanes per year in present climate conditions. Cyclones are classified as medicanes when they acquire TC-like characteristics, that is, warm-core structure without fronts as per the Cyclone Phases Space (section 5.2) classification.

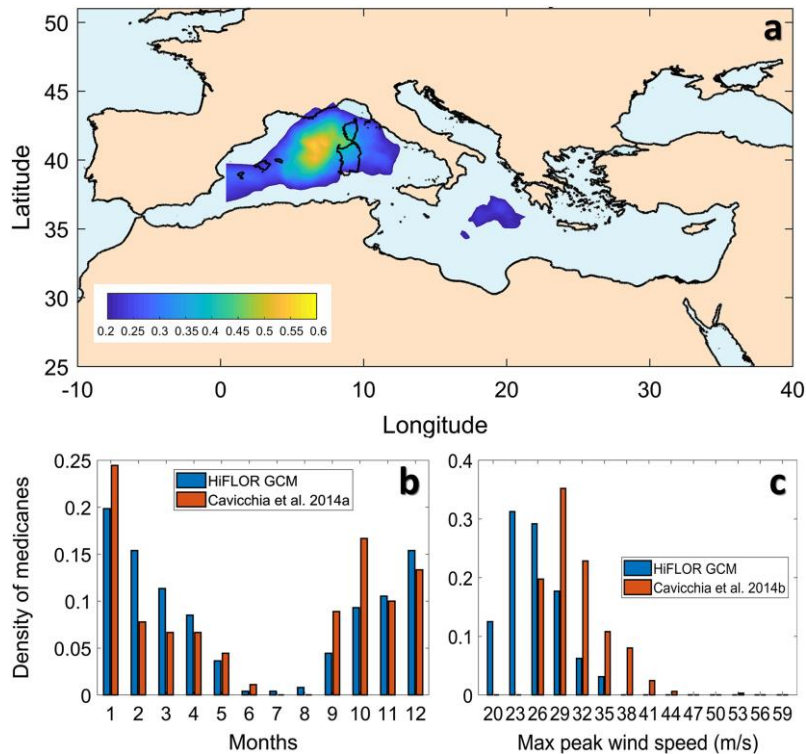


Figure 5.1. (a) Medicanes' track density (number per year; section 5.2) in CLIM, (b) monthly distribution, and (c) lifetime maximum intensity distribution of the medicanes in CLIM (National Centers for

Environmental Prediction). HiFLOR = High-Resolution Forecast-Oriented Low Ocean Resolution; GCM = global climate model.

HiFLOR reasonably reproduces the observed medicanes' spatial distribution (Figure 5.1a), with a maximum south of the Gulf of Lion-Genoa (western Mediterranean), and another weaker maximum southeast of Sicily (Ionian Sea). This latter maximum is weaker probably because only a subset of medicanes has been chosen (12 hr of warm core), compared to the reference study. The observed seasonal distribution is also well captured with a prevalence of medicanes during the cold season months and higher frequency in winter (Figure 5.1b). Medicanes predominantly form from autumn to spring, when baroclinic cyclones forced by upper-level cyclonic disturbances shift southward over the Mediterranean Sea (Tous & Romero, 2013). The correlation with the observed distribution (Cavicchia et al., 2014a) is high ($r = 0.83$; p value < 0.001) and the strong observed summer minimum is reproduced too. HiFLOR tends to underestimate the wind intensity (Figure 5.1c), probably because of lower horizontal resolution (Cavicchia et al., 2014b; Gaertner et al., 2018).

The projected climate changes over the 21st century impact medicane activity in the model. The frequency of medicanes' formation is reduced by ~34% (p value < 0.01) in the LATE experiment (Figure 5.2a). This reduction is stronger in winter (~37%; supporting information Figure 5.S3), and weaker in spring (~29%) and autumn (~24%). However, this lower frequency of medicanes contrasts with their longer duration in the late 21st century RCP4.5 scenario. The number of medicanes lasting at least 24 hr increases substantially (Figure 5.2b), consistently with previous studies (Gaertner et al., 2007; Tous et al., 2016). Additionally, there is a substantial shift in the medicanes' location, with a higher density in the Ionian Sea and in proximity of South Italy's eastern coasts, and a reduction accompanied by an eastward shift in the western Mediterranean in proximity of the Balearic Islands (Figure 5.2c).

The reduction in medicane frequency is likely in part due to a decrease in baroclinic precursors. Medicanes are annually correlated with ECs (section 5.2) with $r = 0.45$ (p value < 0.001) and ECs indeed show a decrease in number in LATE with respect to CLIM (~12%; Figure 5.2a), although only statistically significant at the 90% confidence level. Therefore, other factors such as a reduced mean temperature difference between the sea surface and the high troposphere (Cavicchia et al., 2014b; Romera et al., 2017) are likely to also play a role. This projected decrease in the frequency of medicanes due to ACC is consistent with estimates (15%–60% reduction) from previous studies (Cavicchia et al., 2014b; Walsh et al., 2014; Tous et al., 2016; Romera et al., 2017). Similar conclusions about the role of ECs are reached in subtropical cyclones over the northeastern cyclones in southern Mediterranean in the LATE run suggests that medicanes will tend to develop more over warmer waters.

5. POTENTIAL INCREASE IN HAZARD FROM MEDITERRANEAN HURRICANE ACTIVITY WITH GLOBAL WARMING

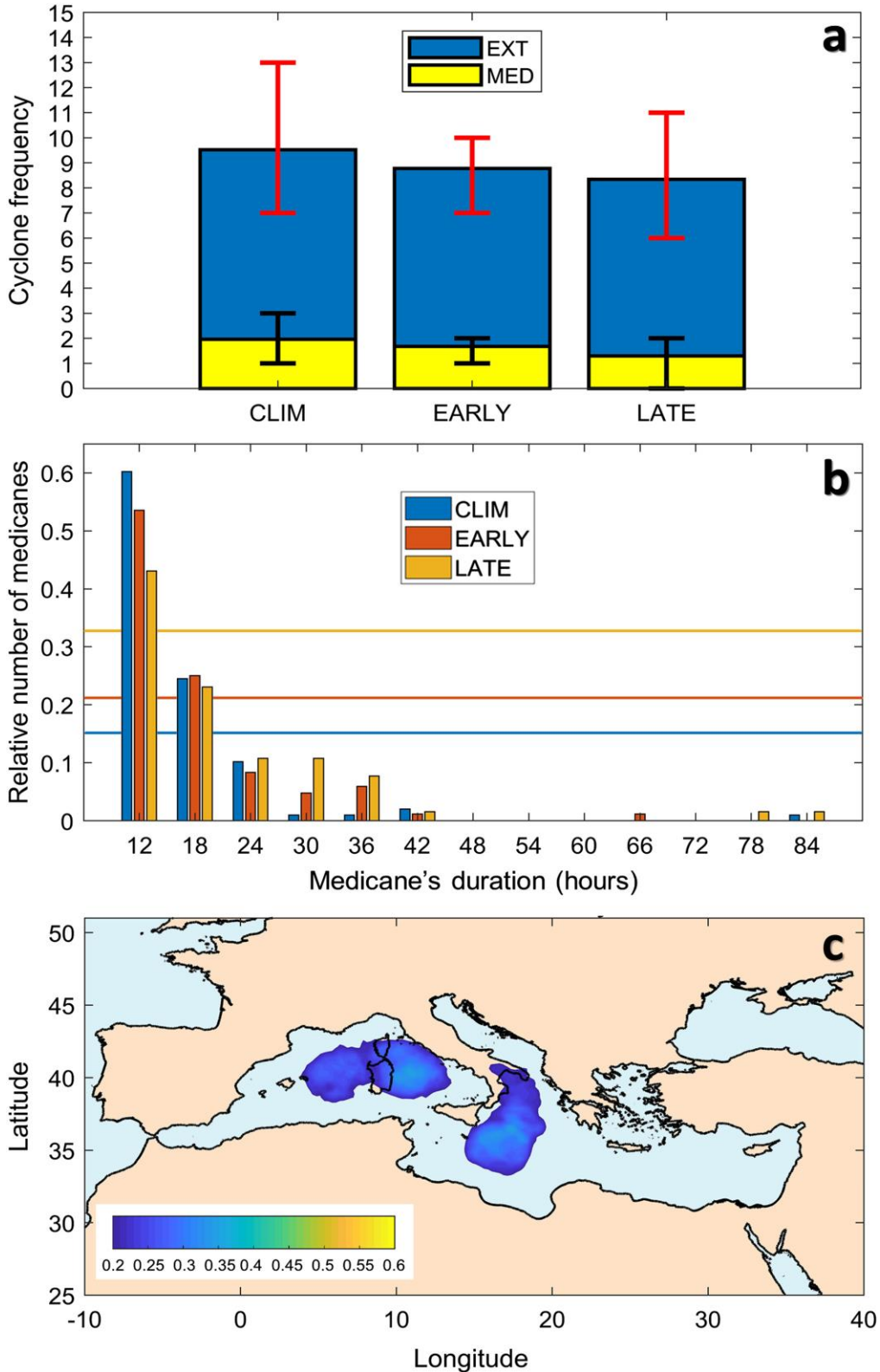


Figure 5.2. (a) Changes in annual medicane (MED) and extratropical cyclone (EXT) mean frequency. Upper and lower bar indicates percentiles 75 and 25, respectively. (b) Relative number (number of medicanes at duration divided by the total number of medicanes in the period) of medicanes based on their duration in hours. Also plotted (horizontal lines) is the sum of the number of medicanes lasting at least 24 hr. (c) Medicane's track density (number per year) in LATE. CLIM = climatological run; EARLY = early future; LATE = late future.

5. POTENTIAL INCREASE IN HAZARD FROM MEDITERRANEAN HURRICANE ACTIVITY WITH GLOBAL WARMING

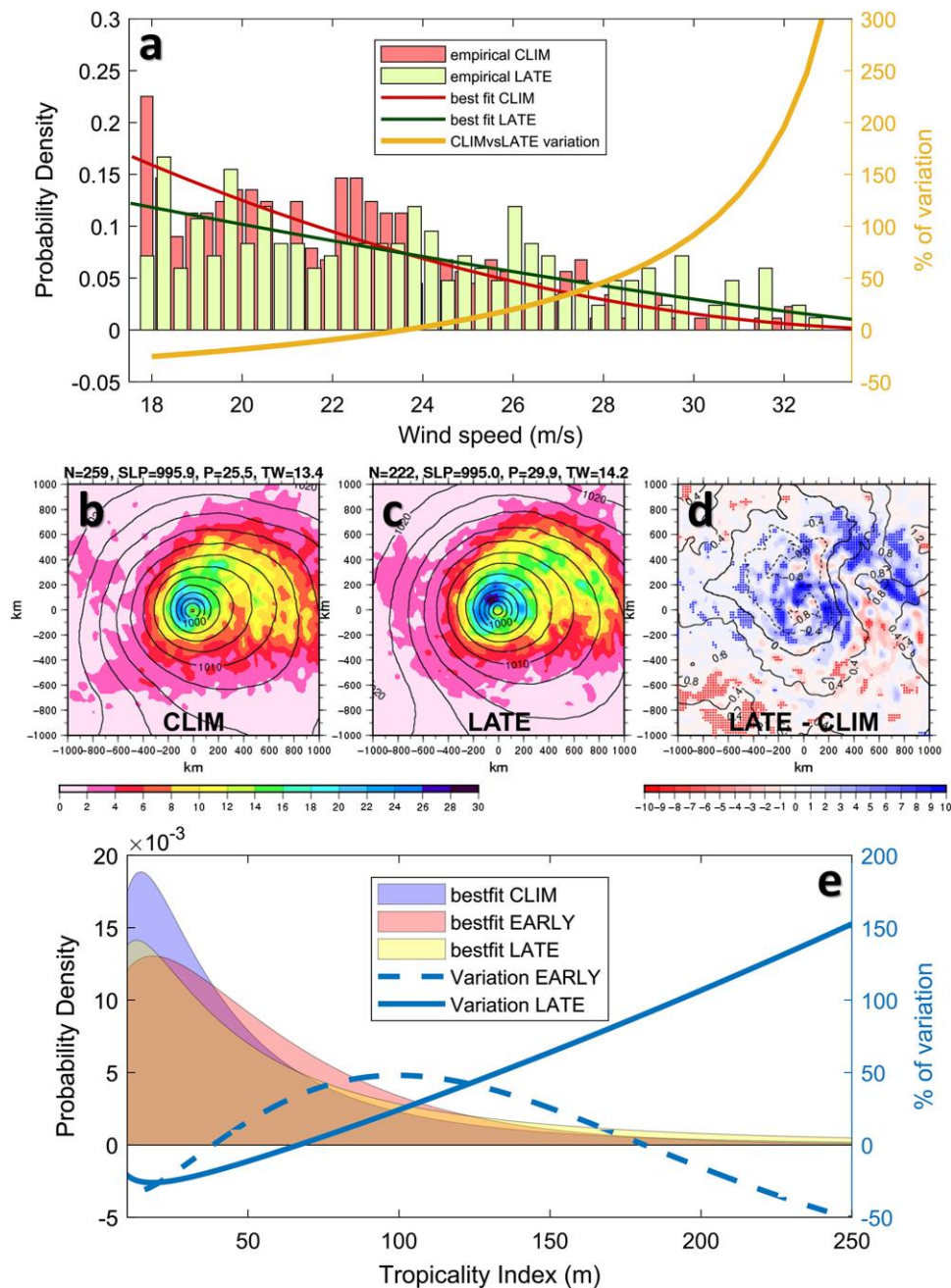


Figure 5.3. (a) Probability distribution for 10-m wind speed associated with the medicane stages. Also plotted are the probability density functions that best fit (section 5.2) each empirical probability distribution. Orange function is the percentage of variation of LATE's function with respect to CLIM's function. (b) Composites of accumulated precipitation (shaded; mm/day) and sea level pressure (black contours) for medicanes in their tropical stages in CLIM. N is the number of the sample, SLP is the minimum sea level pressure, P is the maximum precipitation, and TW is the maximum tangential wind speed. (c) Same as (b) but for LATE. (d) Same as (b) and (c) but for differences between LATE and CLIM. Statistical significant differences (at the 90% confidence level) are highlighted by strong color. (e) Probability density functions that best fit (section 5.2) each empirical probability distribution for tropicality index. Blue function is the percentage of variation with respect to CLIM. CLIM = climatological run; EARLY = early future; LATE = late future.

The model projects that over the 21st century medicanes tend to be associated more frequently with stronger winds; winds exceeding 24 m/s are more recurrent in LATE run relative to CLIM (Figure 5.3a). We note that in these experiments, the wind speed changes in the EARLY experiment are not statistically significant (supporting information Figure 5.S4). The strongest tangential winds typically occur from the maximum wind radius (~100 km) outward (supporting information Figure 5.S5a). This radius is higher than in most observed cases (e.g., Cavicchia et al., 2014a) and is probably related to the grid spacing used herein (Pielke, 1991). The projected increase in medicane winds is most evident in autumn (supporting information Figure 5.S6). Precipitation associated with medicanes is also a serious hazard as they can cause coastal flash floods (Reale & Atlas, 2001). In Figure 5.3, we compute composites of rainfall in CLIM and LATE. Precipitation significantly increases (Figure 5.3d) in the LATE run relative to the CLIM run, especially in the inner zone (100–300 km from the centre, supporting information Figure 5.S5b). This confirms that they become more hazardous regarding rainfall impact.

Is the projected future increase in medicane wind intensity associated with medicanes developing a more robust tropical structure and thus stronger and deeper convection in the core? This effect can be measured by the thermal wind parameter for the upper tropospheric layer ($-VTU$; section 5.2), which describes the upper thermal anomaly in the 3-D structure of the cyclone, with values above 0 indicating a warm core. We find that in medicanes $-VTU$ values are correlated ($r = 0.34$; p value < 0.001) with the surface wind speed, in CLIM + EARLY + LATE. This indicates that the more robust their tropical structure, the stronger the near-surface winds. $-VTU$'s median in LATE, as opposed to EARLY, is statistically different from $-VTU$'s median in CLIM, with a noticeable increase in the upper percentiles, as for the wind. This suggests that medicanes in the future will be more likely to achieve higher intensity because of a more robust tropical structure within their central region. This implies stronger convection and thus a larger release of latent heating, which in turns leads to a higher radial pressure gradient, thus increasing wind speed (Figure 5.3a, and supporting information Figure 5.S5a). Changes in convective activity have been linked to wind intensity in the case of TCs (Jiang, 2012). Indeed, the relationship between wind and $-VTU$ is much higher in LATE ($r = 0.45$; p value < 0.001) than in CLIM ($r = 0.28$; p value < 0.001). This indicates that wind speed is more sensitive to the depth of the upper-level warm core (moist convection activity) in ACC context and could even point to wind-induced surface heat exchange (Emanuel, 1986) feedback being more effective. This concept is better highlighted by the change in the Tropicality Index (TI; section 5.2), an overall measure quantifying the degree to which a medicane is tropical in structure (or maturity). Figure 5.3e shows higher values of TI noticeably increasing in LATE, as opposed to EARLY run, where the increase only occurs at moderate values.

The concurrent increase in medicanes' intensity and duration are suggestive of an increase in their hazard to natural and human resources. To better quantify this, we analyse the PDI (PDI_IS; section 5.2). PDI_IS quantifies the power dissipated by the

near-surface winds acting on the surface, thus being a measure of the destructiveness of medicanes. We find a remarkable positive statistical change in PDI_IS in the late 21st century run as compared to the 1986–2005 and 2016–2035 runs (Figure 5.4a), which confirms their higher destructive effects in the late future. For the PDI (a measure for the overall activity; section 5.2), an increase is also found for the LATE experiment compared to CLIM (from $\sim 308 \cdot 10^4$ to $\sim 316 \cdot 10^4$ m^3/s^2 ; Figure 5.4b), which is consistent with the idea of each medicanes being more durable and intense, since they are less frequent in LATE. This increase is exclusively due to the notable positive change ($\sim 47\%$) during autumn (Figure 5.4b), whereas the PDI decreases in the rest of the seasons (summer has marginal contribution). This notable contribution from the autumn season is consistent with the more hurricane-like structure of medicanes, and it could be related to the enhanced autumn SSTs warming relative to spring and winter (Figure 5.4c). This relationship between PDI and SSTs has been explained through the SSTs positive influences on the potential intensity of TCs, which is related to alterations of the surface energy flux (Emanuel, 1987). However, no robust evidence is obtained when analysing PDI changes in the future for TCs (Knutson et al., 2013).

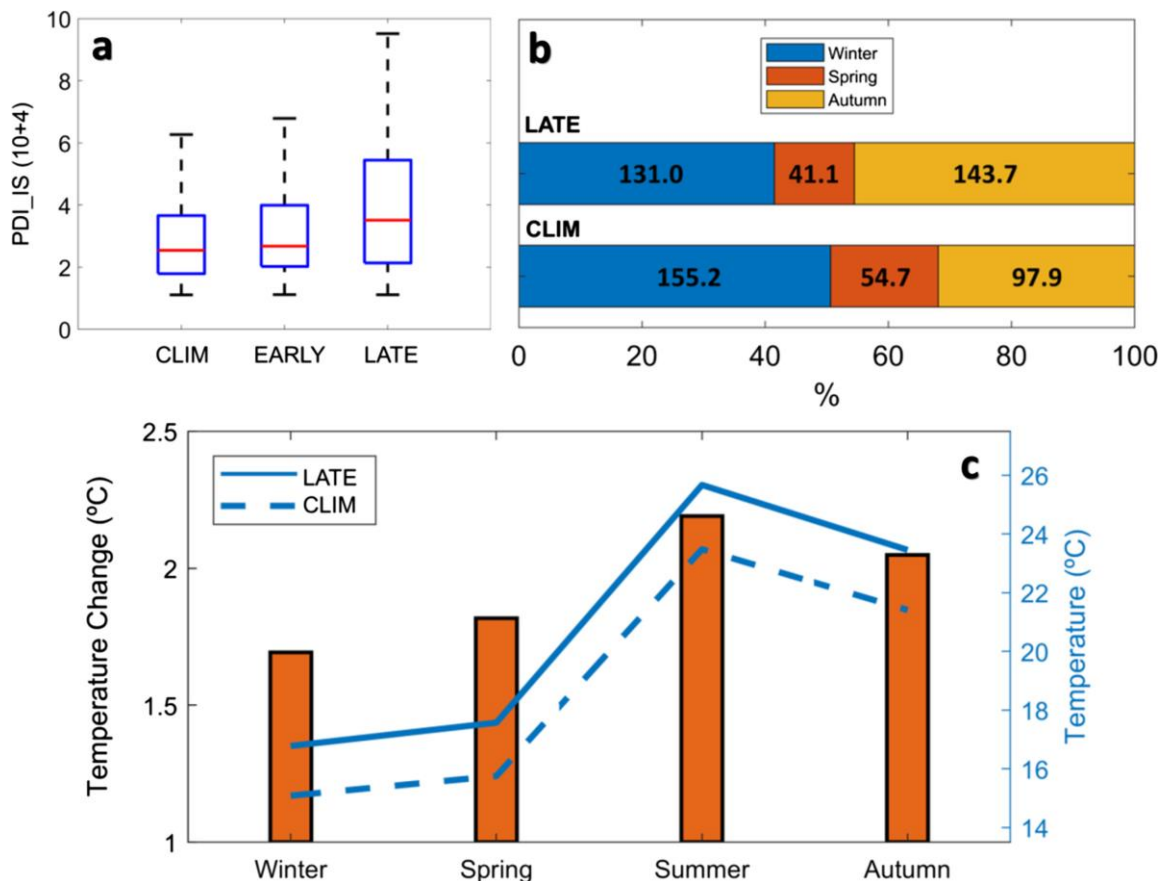


Figure 5.4. (a) Boxplot for PDI_IS's distribution. (b) Percentage of power dissipation index (PDI) contribution of each season to the annual PDI in each 50-year run. Real PDI values ($10^{+04} m^3/s^2$) are indicated within each bar. (c) Sea surface temperatures value and change (LATE vs. CLIM) for each season. CLIM = climatological run; EARLY = early future; LATE = late future; PDI = power dissipation index

5.4 Conclusions

In conclusion, by using a global high-resolution coupled GCM under an intermediate-emission 21st century scenario (RCP4.5), we found a number of dramatic shifts in medicane-related hazards by the end of the 21st century. Although our results are based on a single model, this is the first global coupled model capable to reproduce the basic physics of medicanes and featuring a horizontal grid spacing (~25 km) high enough to reproduce their mesoscale circulation. While fewer in number, medicanes are likely to become more vigorous in autumn relative to spring and winter and to develop long-lasting deeper warm cores, that is, more robust tropical structure, increasing the likelihood of achieving hurricane intensity. This more tropical nature of medicanes is also accompanied by projections of more intense precipitation—mirroring projections of precipitation change by U.S. landfalling hurricanes (Liu et al., 2018). More intense precipitation is also a cause for concern given flood risks posed by these storms. Additionally, medicanes tend to change their favored genesis and passage location, becoming more common in the Ionian Sea and less common in the western Mediterranean Sea. However, it is important to note some limitations arising from both the resolution of the ocean and atmospheric components of the model, which could still be insufficient to realistically simulate specific mesoscale characteristics of medicanes and the Mediterranean Sea. Significant changes in the medicanes' activity is found only in late future conditions as opposed to early future, indicating that medicanes are not likely going to change substantially in the next few decades but will be significantly affected by ACC by the end of the 21st century. In the RCP4.5 scenario assumed here, considerable efforts are required to reduce the cumulative emissions of greenhouse gases. Stronger-emission scenarios like the RCP8.5 (van Vuuren et al., 2011) would see an even stronger global temperature change by the end of the 21st century (~5–9 °C) and a warmer Mediterranean Sea, thus amplifying even more the medicanes' potential destructiveness in response to ACC. These changes found in medicane activity potentially increase their societal and natural damage, and the shifting locations of these risks will affect populations previously unaccustomed, thus enhancing the potential damage.

5.A Supporting information

Text S1

Bayesian information criterion

The Bayesian information criterion (BIC; Schwarz, 1978) is used in statistics for model selection among a finite set of models. The model with the lowest BIC is preferred. It is based, in part, on the likelihood function, which describes the plausibility of a model parameter value, given specific observed data. When fitting models, it is possible to increase the likelihood by adding parameters, but this may also result in overfitting. Thus, BIC was designed to resolve this problem by introducing a penalty term for the number of parameters in the model. More information on this criterion can be found at:

<https://www.sciencedirect.com/topics/medicine-and-dentistry/bayesian-informationcriterion>.

Medicane example

To illustrate the idea of medicanes becoming more tropical and destructive with global warming, we show herein one from the LATE experiment. It forms in autumn and lasts 4 days with a fully developed tropical structure, acquiring a maximum intensity of ~ 36 m/s (a category 1 hurricane) and leading to a PDI_IS of $\sim 31 \cdot 10^4$ m³/s². As indicative of its fully hurricane structure and the importance of surface fluxes in its maintenance, the cyclone rapidly weakens (maximum intensity from ~ 32 m/s to ~ 12 m/s in 24 hours) once it makes land fall over Italy. This Medicane forms in a baroclinic setup (Supplementary Figure 5.S1a), i.e. a midlatitude trough reaching the Mediterranean Sea which forces extratropical cyclogenesis.

The storm first appears in the CPS (Supplementary Figure. 5.S2) with non-frontal ($B < 10$ m) hybrid-core characteristics, i.e. shallow low-level warm core ($-VTL > 0$ m and $-VTU < 0$ m), but it acquires a fully deep warm-core ($-VTL > 0$ m and $-VTU > 0$ m) in 24 hours, without important thermal gradients in lower-levels. As the trough cuts off, the lower-level centre of the cyclone collocates below the upper-level low (Supplementary Figure 5.S1b). During its mature stage, the surface cyclone intensifies acquiring wind and pressure fields typical of hurricanes, and a warm core within the entire troposphere, as denoted by the 300-900 hPa thickness field (Supplementary Figures. 5.S1c and 5.S1d).

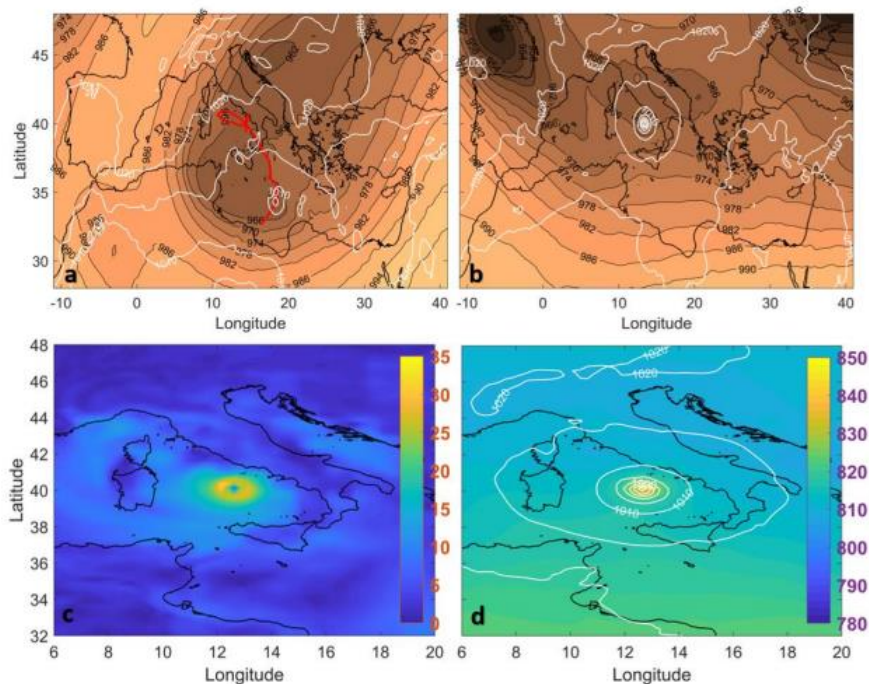


Figure 5.S1. 300-hPa geopotential height (dam; shaded and black contours) and sea level pressure (hPa; white contours) for a, 12 hours and b, 114 hours after the cyclogenesis. c, Wind at 10 m (ms⁻¹; shaded) for 114 hours after the cyclogenesis. d, 300-900 hPa thickness (dam, shaded) and sea level pressure (hPa; white contours) for 114 hours after the cyclogenesis. The medicane's track is represented in red in (a).

5. POTENTIAL INCREASE IN HAZARD FROM MEDITERRANEAN HURRICANE ACTIVITY WITH GLOBAL WARMING

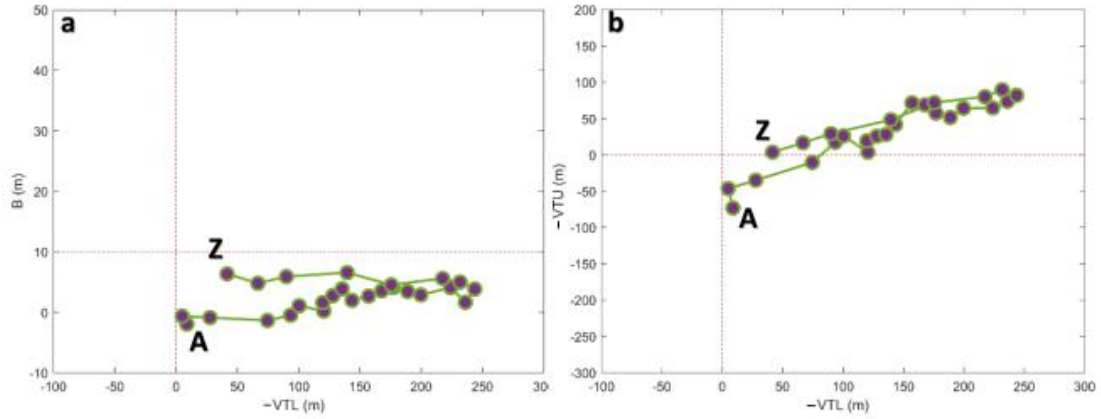


Figure 5.S2. Cyclone phase space in B-VTL (a) and VTL-VTU (b) of the medicane case described in Supplementary Fig. 5.S1. A indicates the initial temporal point (cyclogenesis) and Z indicates the last temporal point, as identified in the tracking.

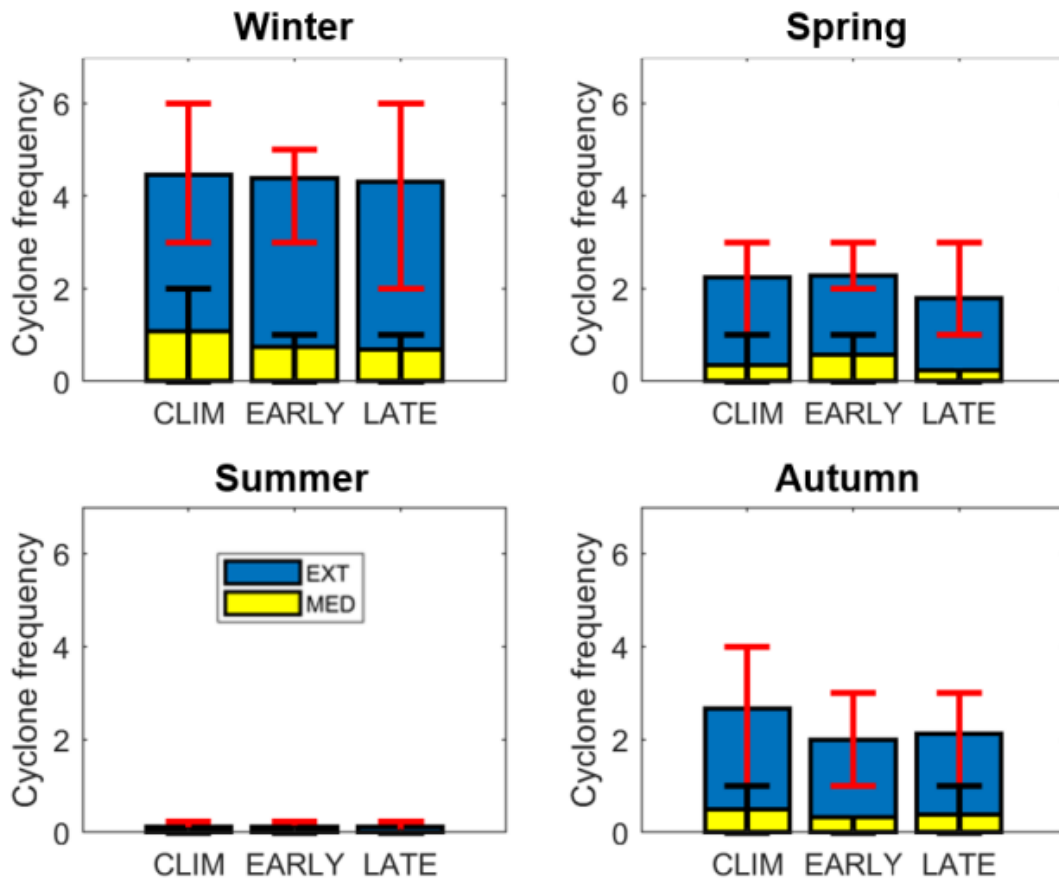


Figure 5.S3. Changes in seasonal medicane (MED) and extratropical cyclone (EXT) mean frequency. Upper and lower bar indicates percentiles 75 and 25.

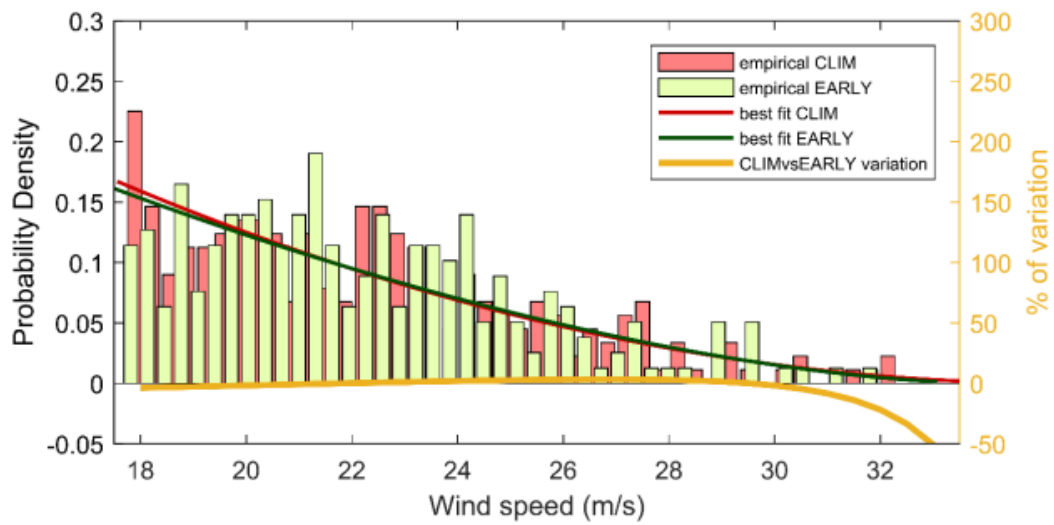


Figure 5.S4. Probability distribution for 10-m wind speed associated with the medicane stages. Also plotted are the probability density functions which best fit (Methods) each empirical probability distribution. Orange function is the % of variation of EARLY’s function with respect to CLIM’s function.

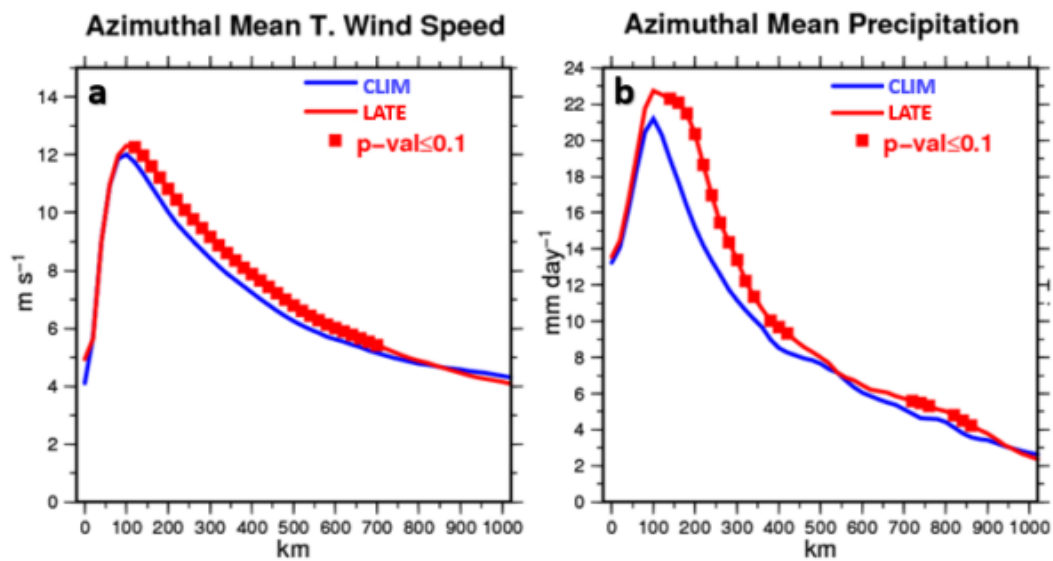


Figure 5.S5. a, Azimuthal mean of tangential wind speed at 10 m. b, Azimuthal mean of precipitation. Squares indicate where differences are statistically significant at the 90% confidence level.

5. POTENTIAL INCREASE IN HAZARD FROM MEDITERRANEAN HURRICANE
ACTIVITY WITH GLOBAL WARMING

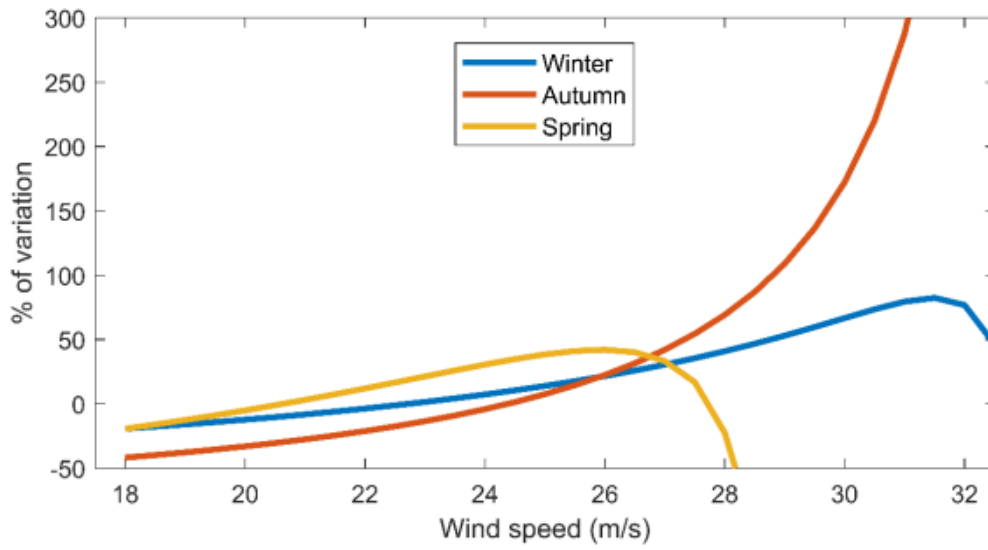


Figure 5.S6. Seasonal percentage of variation of LATE's probability density function with respect that of CLIM

CHAPTER

6

Impact of ocean–atmosphere coupling on future projection of medicanes in the Mediterranean sea

This chapter shows the results of the paper published in International Journal of Climatology: *Impact of ocean–atmosphere coupling on future projection of medicanes in the Mediterranean sea*
<https://doi.org/10.1002/joc.6955>

Abstract

Cyclones with tropical characteristics called medicanes eventually develop in the Mediterranean Sea. They have large harmful potential and a correct simulation of their evolution in climate projections is important for an adequate adaptation to climate change. Different studies suggest that ocean–atmosphere coupled models provide a better representation of medicanes, especially in terms of intensity and frequency. In this work, we use the regionally coupled model ROM to study how air-sea interactions affect the evolution of medicanes in future climate projections.

We find that under the RCP8.5 scenario our climate simulations show an overall frequency decrease which is more pronounced in the coupled than in the uncoupled configuration, whereas the intensity displays a different behaviour depending on the coupling. In the coupled run, the relative frequency of higher-intensity medicanes increases, but this is not found in the uncoupled simulation.

Also, this study indicates that the coupled model simulates better the summer minimum in the occurrence of medicanes, avoiding the reproduction of unrealistically intense events that can be found in summer in the uncoupled model.

6.1 Introduction

The Mediterranean basin is one of the main cyclogenetic regions in the world (Alpert & Neeman, 2016). This is likely due to the orographic conditions, as well as the thermodynamic characteristics found over the Mediterranean sea (Trigo et al., 2002). Among the large amount of cyclones that develop in this area, cyclones with tropical characteristics - often referred to as medicanes (Cavicchia et al., 2014a) - have lately attracted special attention from the scientific community due to its large harmful potential, especially in coastal regions. In recent years, there have been some instances of intense medicanes. For example, the one that occurred in November 2011 (Miglietta et al., 2013; Dafis et al., 2018) affecting coastal regions of the Western Mediterranean, or the medicane Zorbas in September 2018, which caused heavy rains and strong winds in zones of Greece.

Although medicanes do not develop frequently, they are associated with extreme weather phenomena (Cavicchia et al., 2014a). Medicanes present some similarities with tropical cyclones and tend to have a circular cloud pattern, often with an eye-like feature (Claud et al., 2010). Medicanes are typically a few hundred kilometres wide, while tropical cyclones can exceed 1000 km in diameter (Zhang et al., 1998). These storms are more frequent during autumn and winter, and are practically non-existent in summer (Cavicchia et al., 2014a). Medicanes are usually associated with strong winds, heavy precipitations, and enhanced oceanic waves (Mazza et al., 2017).

A few decades ago, medicane detection was only possible through the use of satellite images and radar (Reed et al., 2001; Fita et al., 2007). Nowadays, thanks to advances in computing power and improvements in model formulation, they can be identified in high resolution weather prediction models. Moreover, climate simulation of medicanes became possible with the development of regional climate models which downscale reanalysis data or global climate models. Although their low horizontal resolution (i.e., 50 km) was initially insufficient to properly identify medicanes due to their small size (Giorgi and Lionello, 2008), the recent introduction of high-resolution regional models led to a considerable improvement in medicane detection because they are able to simulate mesoscale cyclones (Romera et al., 2017; Gaertner et al., 2018) with resolutions that in some cases are close to 10 km.

Until recently, the impact of atmosphere–ocean coupling has been analysed using global models with low resolution both in the atmosphere and in the ocean (Bristol et al., 2017). However, in regional scales, for the representation of many key oceanic and atmospheric processes, higher horizontal resolution in the atmosphere and ocean is a priority (i.e., Haarsma et al., 2016; Hewitt et al., 2017). Increasing ocean model resolution has a key impact on the representation of the role eddies play in the ocean heat budget and, in turn, in the climate system (Griffies et al., 2015). In the extratropical atmosphere, in the large scale, increased surface wind stresses lower the sea-surface temperature through increased turbulent fluxes out of the ocean (Frankignoul, 1985) but, in a smaller scale, the relationship can be of opposite sign: a warmer SST leads to an increased surface

wind stress (Small et al., 2008). Impacts are also seen in coupled atmosphere–ocean models, provided they have an ocean resolution of $1/4^\circ$ or finer (Roberts et al., 2016). Although the increase of computational resources has allowed coupled Earth System Models to achieve a greater horizontal resolution, they are still run with relatively low resolutions in long-term climate simulations. This, together with the necessary parameterisations of subgridscale processes does not allow GCMs to capture some key physical phenomena and hampers the accuracy of climate projections on regional and local scales. This is especially true in the Mediterranean region, where high resolution is necessary for both the oceanic and atmospheric components (Xie et al., 2015).

Downscaled climate projections performed with uncoupled regional atmospheric models indicate a rise in intensity and a decrease in frequency of medicanes by the end of this century (Gaertner et al., 2007; Cavicchia et al., 2014b). Some studies on medicanes have been performed with coupled models during the last years, but using models with limited coupling and horizontal resolution, or without addressing the changes of medicanes in the future climate. In the analysis performed in the chapter 5 of this thesis, the authors use a global coupled model with high-resolution in the atmosphere (i.e., 25 km), but a coarser resolution for the oceanic component (i.e., 100 km). Furthermore, in that study air-sea coupling is partial. The climatological analysis by Gaertner et al. (2018) of the role of air-sea coupling and horizontal resolution is limited to present-day medicanes, like in the study of Akhtar et al. (2014), in which a high-resolution atmospheric model is coupled to a simplified one-dimensional ocean model.

The main novelty of the present work is the analysis of future projections of medicanes under anthropogenic climate change, using a fully-coupled regional climate model with high horizontal resolution in both the atmosphere (25 km grid spacing) and the ocean (between 5 and 10 km grid spacing). We use the regionally-coupled model ROM, which is composed of the regional atmospheric model REMO and the global ocean-sea ice model MPIOM. ROM has been previously used to address the oceanography and climatology of different regions of the world, including the Mediterranean (e.g., Cabos et al., 2017; Parras-Berrocal et al., 2020). For the analysis of the impact of coupling on the changes in frequency and intensity of the medicanes in the future under the RCP8.5 scenario, we compare two ROM and REMO simulations that share the same configuration in the atmosphere and only differ by the coupling. Then, we propose some plausible hypotheses about the causes of the difference of these changes in the future. This paper is organized as follows: in Section 6.2 we present the configurations of ROM and REMO used in this study and the methodology used to detect medicanes. The decadal and monthly frequency and intensity of simulated medicanes are discussed in Section 6.3. Finally, the conclusions are presented in Section 6.4.

6.2 Methodology

6.2.1 Model setup and simulations

In this work, we use the regionally coupled model ROM (Sein et al., 2015) and its stand-alone atmospheric component REMO (Jacob et al., 2001). ROM is composed of the global oceanic model MPIOM coupled to the regional atmospheric model REMO. It has a dynamical core based on the Europa-Model of the German Weather service (Majewski, 1991) and physical parameterisations from the global climate model ECHAM6 (Roeckner et al., 1996, 2003). The REMO domain used in this study covers a relatively large area, including parts of the Pacific Ocean, the North Atlantic and the Mediterranean region (see Figure 6.1), with a constant horizontal resolution of 25 km and 27 vertical levels from surface up to 10 hPa. The oceanic component of ROM is the global ocean–sea ice model MPIOM (Marsland et al., 2003) which has a variable horizontal resolution in the Mediterranean Sea ranging from ~5 km in the Western Mediterranean to ~20 km in the Eastern Mediterranean. MPIOM has 40 vertical levels with thicknesses that increase with depth, from 16 m at the uppermost layer to 500 m at the seafloor.

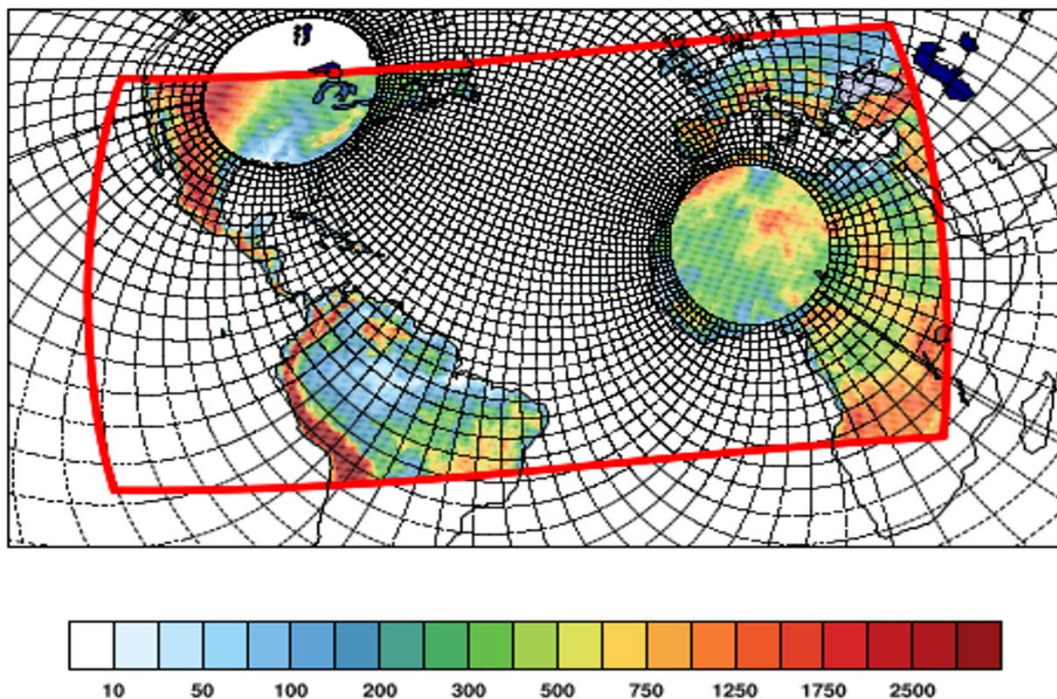


Figure 6.1. Domain boundaries of the regional atmospheric model REMO (thick red line), land orography (shading, in m) and grid of the global ocean model MPIOM (fine black lines; for clarity, only part of the grid lines are drawn). The uncoupled run only includes the atmospheric component that is delimited by the red line. While the coupled model covers the area of convergence between the atmospheric model (thick red line) and the oceanic model.

ROM includes also a global hydrological discharge model (HD, Hagemann & Gates, 2001) which computes river runoff with a resolution of 0.5° and is coupled to the atmospheric and ocean components. REMO and MPIOM are coupled via the OASIS3

coupler (Valcke et al., 2003), with a coupling interval of 3 hr, which allows us to take into account the diurnal cycle. The ocean and the atmosphere are coupled in the region covered by the atmospheric domain. In the uncoupled domain, MPIOM is driven by prescribed atmospheric forcing provided by the global climate model MPI-ESMLR (Giorgetta et al., 2013), which has a horizontal resolution of 200 km. MPI-ESM-LR also provides lateral boundary conditions for REMO in both coupled and uncoupled setups and the SST forcing for standalone REMO. In this work, we assume the RCP8.5 emissions scenario.

Table 6.1. Different runs used in this research

		Uncoupled simulation	Coupled simulation
Atmosphere	Atmospheric component	REMO	REMO
	Horizontal resolution	25 km	25 km
	Vertical resolution	27 levels to 10 hPa	27 levels to 10 hPa
Ocean	Oceanic component	--	MPIOM
	Horizontal resolution	--	5-10 km
	Vertical resolution	--	40 levels (10-500 m)
Atmosphere-ocean coupling		No	Yes

As stated above, in the uncoupled simulation with REMO, the SST needed for lower boundary conditions over the ocean is taken from MPI-ESM-LR. Therefore, the main difference between the simulations performed with ROM and REMO is the effect of interactive air-sea coupling. Whilst ROM is able to simulate the existing air-sea feedbacks, in REMO the oceanic variables are prescribed and thus do not respond to changes in the atmospheric state. In ROM the air-sea fluxes are interactively calculated every coupled time step. This has a concomitant effect on the sea-surface temperature and sea-surface salinity which, in turn, determine the depth of the ocean mixed layer. Thus, we can assess the impact of air-sea interactions on medicane characteristics by comparing a coupled simulation with ROM and a stand-alone atmospheric simulation with REMO (see Table 6.1 for details). In our study, the simulations cover the 1951–2099 time period, which is divided into: past climate period (P1; 1951–2000), present/ near future climate period (P2; 2001–2050) and future climate period (P3; 2051–2099). In the analysis, we have mainly used periods P1 and P3, as they allow to detect more clearly the effect of climate change on medicanes.

6.2.2 Tracking and detection of medicanes.

Medicanes are detected with the tracking method of Picornell et al. (2001), which is designed for mesoscale cyclones and therefore suitable for medicane detection. A wind speed filter is used to detect cyclones with at least tropical storm intensity, using a maximum 10 m-wind speed threshold of 17.5 ms^{-1} following the criterion of (Walsh et al., 2007). Only cyclones that exceed the tropical storm threshold are considered.

After the tracking, the structure of the detected cyclones is examined. This allows us to exclusively consider those cyclones with tropical characteristics. To do so, we apply

the cyclone phase space method (Hart, 2003). The CPS is an objective method to represent the 3-D structure of cyclones and classify them depending on their thermal structure. As a result of the small size of medicanes, it is necessary to apply the CPS criteria over a reduced radius of 150 km around the low-pressure centre. This method is based on three different parameters: B, VTU and VTL. The B parameter gives an indication of the cyclone symmetry. Following Hart (2003), we assume that values of the B parameter above 10 m indicate an asymmetric (frontal) cyclone, while values below this threshold correspond to a symmetric (non-frontal) cyclone. The upper troposphere thermal wind (VTU) and the lower troposphere thermal wind (VTL), derive from the geopotential field from 600 to 300 hPa and from 900 to 600 hPa, respectively. These parameters determine the existence of a warm core or cold core cyclone (Hart, 2003). Specifically, negative values of thermal wind indicate a cold core cyclone, whereas positive values indicate a warm core cyclone. In the case of the tropical cyclones, values of both VTU and VTL should be positive to show a full-troposphere warm core cyclone. Cyclones having tropical characteristics for at least one time step of the model output (6 hr) are classified as medicanes. Because medicanes always develop over the sea, a mask is additionally applied in order to rule out those cyclones that arise over land.

6.3 Results

6.3.1 Evaluation of the historical runs

First, we present a brief evaluation of the most important aspects of the medicane climatology simulated by both configurations of the model. Based on medicane climatologies (Miglietta et al., 2013; Cavicchia et al., 2014a), an annual frequency of 1.57 medicanes has been estimated for past climate conditions (1950–2000). In good agreement with this, we find 1.60 and 1.82 medicanes per year in the coupled (ROM) and uncoupled runs (REMO), respectively (Table 6.2). We would like to point out that we also performed coupled and uncoupled simulations with a low-resolution configuration of the atmospheric component in REMO (50 km). However, these simulations clearly underestimated the observed yearly frequency of medicanes and reproduced less than one event per year. Therefore, we decided not to use these runs in this work.

Table 6.2. Annual frequency of medicane frequency with the corresponding standard deviations for the different runs and the Cavicchia medicane climatology (Cavicchia et al., 2014a)

Name	Annual frequency	SD
REMO	1.82	1.56
ROM	1.60	1.29
CAVICCHIA (Climatology)	1.57	1.30

For evaluating past trends of medicane frequency, we use the climatology of Cavicchia et al. (2014a) because it is the most complete climatology of medicanes available, and it covers a long time period (1950–2010). We have performed an analysis of the annual frequency of medicanes for this time period, comparing the observed trend of the climatology of Cavicchia with the trends the coupled and uncoupled runs. Results

(Figure 6.2a) indicate a subtle increasing trend of medicanes for the climatology of Cavicchia, while a slight declining trend is found for both the coupled and uncoupled runs. Nonetheless, all trends are not significant, and it should be taken into account that the simulations are nested in a global climate model, not in reanalysis, so that a very close coincidence should not be expected.

We have also compared the spatial distribution of the simulated medicanes with the distribution shown in Cavicchia et al. (2014a). The main area of observed medicane development in the Western Mediterranean is well captured in both simulations, while the observed secondary maximum of the Central Mediterranean is less clearly reproduced in the simulations (Supplementary Figure 6.1S).

Finally, regarding the quality of the SST simulated in the coupled run, there is a study from Parras-Berrocal et al. (2020), where the same configuration of ROM is used to investigate in detail the Mediterranean Sea, including the regional distribution of the SST and the SST trend. The validation performed in that study for the 1950–2000 period indicates that ROM has a performance similar to other state-of-the-art AOGCMs. These authors also perform an analysis of the SST trend under the 8.5 RCP scenario. Their results show an increment of the SST of 2.7°C by the end of the XXI century in the Mediterranean basin.

This trend is very close to the values obtained with the global earth system models MPI-ESMLR and MPI-ESM-MR, which project respectively an increase of the SST of 2.8 and 2.9°C.

6.3.2 Frequency

In this section, we first focus on the evolution of the decadal frequency of occurrence of medicanes. We focus on the changes in the trend of medicanes per decade in the future climate simulation for the different model configurations and the possible mechanisms that affect the decadal frequency under climatic change conditions. Lastly, we also study the monthly and seasonal frequency of medicanes.

6.3.2.1 Decadal frequency of medicanes

Previous studies addressing the impact of climate change on medicanes have found a progressive decrease from 1951 until the end of the XXI century (e.g., Cavicchia et al., 2014b; Chapter 5 of this thesis). In line with this, the number of medicanes in our simulations decreases with time (Figure 6.2b). The significance of the linear trend has been calculated with a Student's t test. Results from the coupled run show a significant reduction of 1.01 (p-value < .05) medicanes per decade from 1951 to 2099, whereas a nonsignificant decrease of 0.45 (p-value > .05) medicanes per decade is found for the uncoupled run. These results highlight that air-sea coupling has a clear impact on the trend of the number of simulated medicanes.

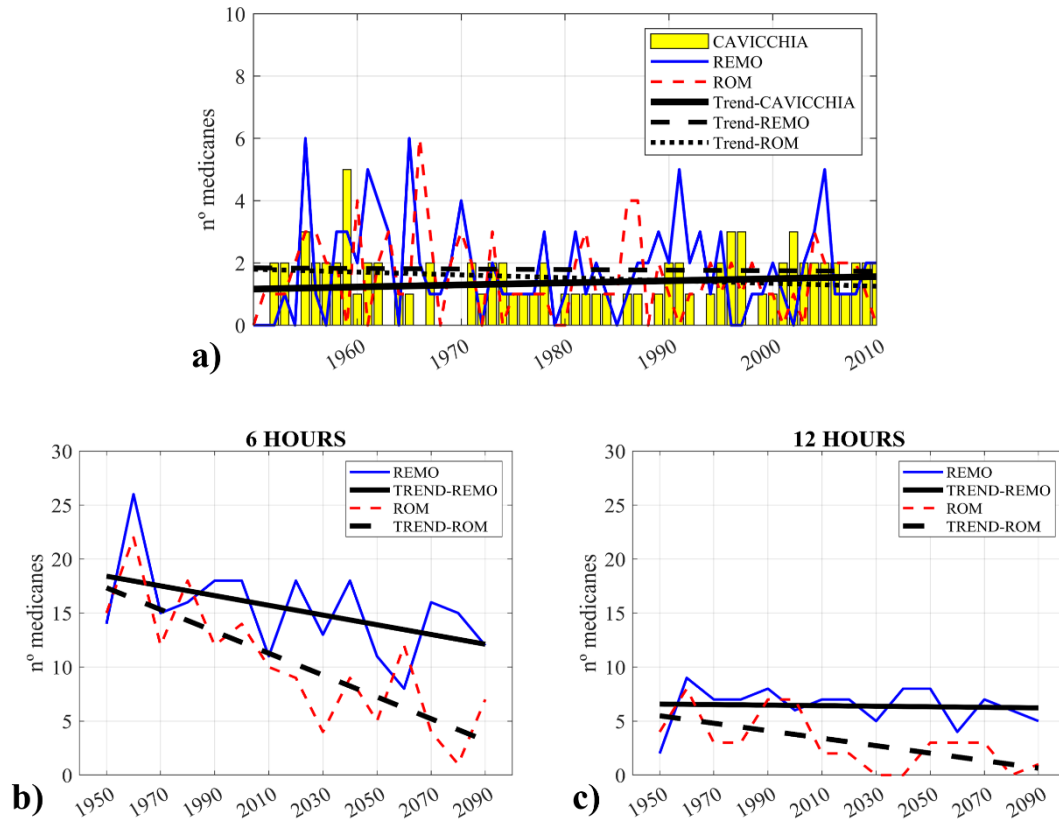


Figure 6.2. (a) Annual frequency of medicanes from Cavicchia climatology (Cavicchia et al. (2014); yellow bars), the uncoupled simulation (REMO; solid blue line) and coupled model (ROM; dashed red line) with its annual trends from 1951 to 2010. (b) Decadal frequency for the different runs until the end of the XXI century, assuming 6 hr as the minimum duration of the warm core criteria for selecting medicanes. The dashed red line shows the results from the coupled model (ROM) and the solid blue line those from the uncoupled model (REMO). The decadal frequency trend for the uncoupled and coupled runs in the last 150 years of the simulation time period (1950–2100) are shown with a solid black line and a dashed black line, respectively. (c) Same as (b) but establishing 12 hr as the minimum duration of the warm core criteria.

In (Figure 6.2c) we can see that the number of medicanes with a deep warm core duration of at least 12 hr is clearly smaller than in the standard case (at least 6 hr of warm core duration) both in ROM and REMO. We also note that the frequency of these medicanes remains almost constant in the uncoupled simulation, with a nonsignificant trend of -0.025 medicanes/decade (p -value $> .05$). In the coupled run, however, a significant trend of -0.35 medicanes/decade (p -value $< .05$) is found.

The consistent decline observed in the number of simulated medicanes towards the end of the XXI century could be explained by several mechanisms. On the one hand, this may be due to a reduction of the amount of extratropical/baroclinic precursors in the Mediterranean zone, as suggested in previous works (Ulbrich et al., 2009; Chapter 5 of this thesis). In our results, a statistically significant correlation between the decadal timeseries of medicanes and extratropical cyclones is found, which is stronger in the coupled (0.79 ; p value $< .05$) than in the uncoupled (0.56 ; p value $< .05$) run. This therefore implies that a reduction of the ECs will trigger a decrease in the number of

simulated medicanes. The evolution of the number of both ECs and medicanes is presented in Figure 6.3a,b. In general, a decline in the number of ECs can be noticed (Zappa et al., 2013), which is in agreement with the trend observed for medicanes. This decrease is more important in the coupled version, where there is also stronger correlation, as mentioned above, between ECs and medicanes. On the other hand, the future reduction in the number of medicanes may be triggered by an increase of the atmospheric stability over the Mediterranean Sea (Giorgi & Lionello, 2008). Cavicchia et al. (2014a) propose an “instability index” which is computed as the difference between the temperature at 350 hPa and the sea-surface temperature (SST). The authors find that values of this index below -58°C represent a favourable environment for medicane development. To quantify future variations of atmospheric instability, we first calculate this index for the past (P1; 1951–2000) and future (P3; 2051–2099) time periods for the coupled and uncoupled simulations. Then, for each configuration, we compute the differences between the historical and future indexes (Figure 6.3c,d). In these figures, negative values prevail (comparing absolute values of the index).

This indicates that this index becomes smaller (in absolute value) and thus that the environmental conditions are less prone to medicane generation. Therefore, both the decrease in the number of extratropical cyclones in the Mediterranean Sea and the increase of atmospheric stability conditions are contributing to the decreasing trend of medicanes.

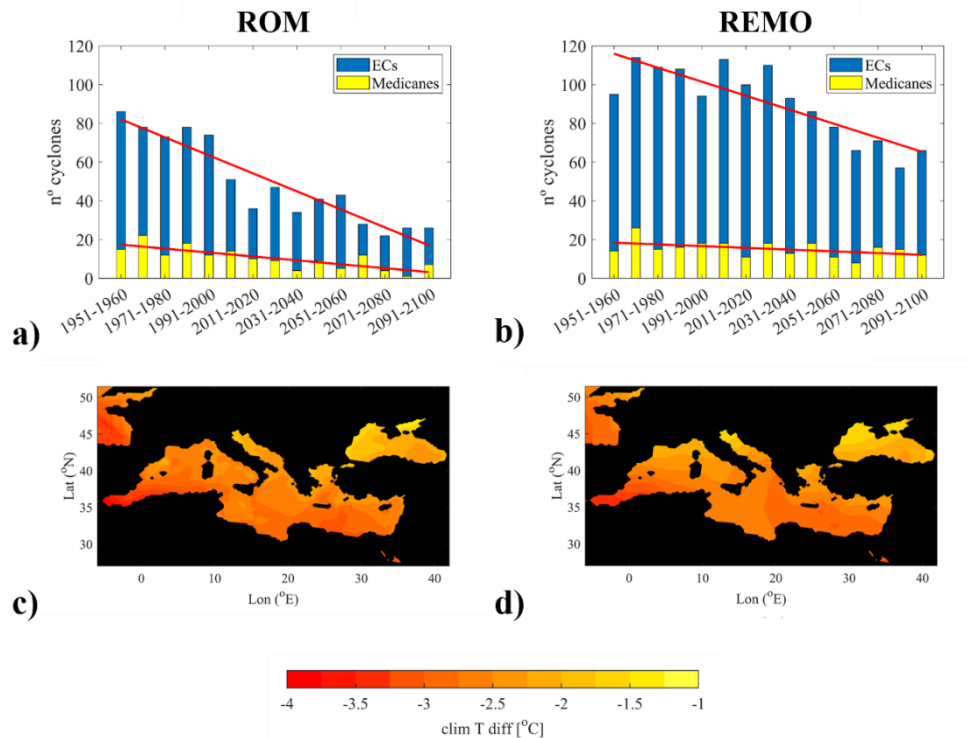


Figure 6.3. (a) Decadal frequency of medicanes (yellow bars) and extratropical cyclones (ECs; blue bars), as well as their trend over the simulation period (1951–2099; red lines) for the coupled model (ROM). (b) Same as (a), but for the uncoupled model (REMO). (c) Change of the instability index ($^{\circ}\text{C}$) in the

Mediterranean region between past (1951–2000) and future climate (2051–2099) for the coupled model (ROM). (d) Same (c), but for the uncoupled simulation (REMO).

6.3.2.2 Monthly frequency

In previous works, it has been found that medicanes and ECs which affect Europe and the Mediterranean region have a similar monthly distribution (Lionello et al., 2008). In general, the monthly frequency is maximum in winter and minimum in summer. In Figure 6.4a we show the monthly frequency for our set of simulations and the observed climatology (Cavicchia et al., 2014b). It is relevant to highlight that both coupled and uncoupled configurations capture well the main aspects of the observed seasonal cycle particularly the summer minimum.

The seasonal variation in the number of medicanes in the future relative to the past climate is presented in Figure 6.4b for the uncoupled simulation and in Figure 6.4c for the coupled one. Results show a reduction of medicanes for both simulations in all seasons. The reduction is more pronounced in winter months. It is interesting to note that winter and autumn changes in ROM are clearly larger than in REMO.

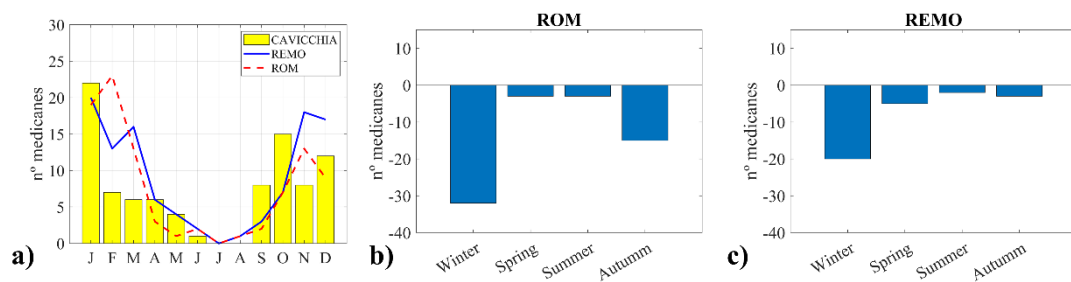


Figure 6.4. a) Monthly frequency of medicanes in past climate (P1; 1951–2000) for the coupled run (ROM; dashed red line), the uncoupled run (REMO; solid blue line) and the climatology from Cavicchia et al., 2014b (yellow bars). (b) Variation of total number of medicanes per season between past (P1; 1951–2000) and future (P3; 2051–2099) climates for the coupled run (ROM). (c) Same as (b), but for the uncoupled run (REMO)

To assess the significance of the changes in the number of medicanes per season in the future we use the Student's t test. We find that the number of medicanes in winter will be significantly lower than in past climate for both model configurations (p-value < .05). The main differences between runs appear in autumn. ROM shows an important decrease of the number of medicanes in 50 years (15 medicanes; p-value < .1), while REMO shows a much smaller reduction which is not statistically significant (3 medicanes; p-value > .1).

6.3.3 Medicane intensity

In this section we address the study of medicane intensity taking into consideration the following variables: VTU (the parameter from the cyclone phase space method indicating the cold/warm core character of the cyclone in the upper troposphere) and the maximum wind speed (representative of the medicane intensity). The correlation between the

maximum wind speed and VTU is also examined to detect the possible relationship between intensity and tropical characteristics in medicanes.

6.3.3.1 Maximum wind speed

As stated above, in Cavicchia et al. (2014b) the authors make use of reanalysis data to investigate the past-day climate distribution of maximum wind speed within the cyclonic region. Following that study, we perform a similar analysis but taking into consideration winds from the two model setups considered (Figure 6.5a).

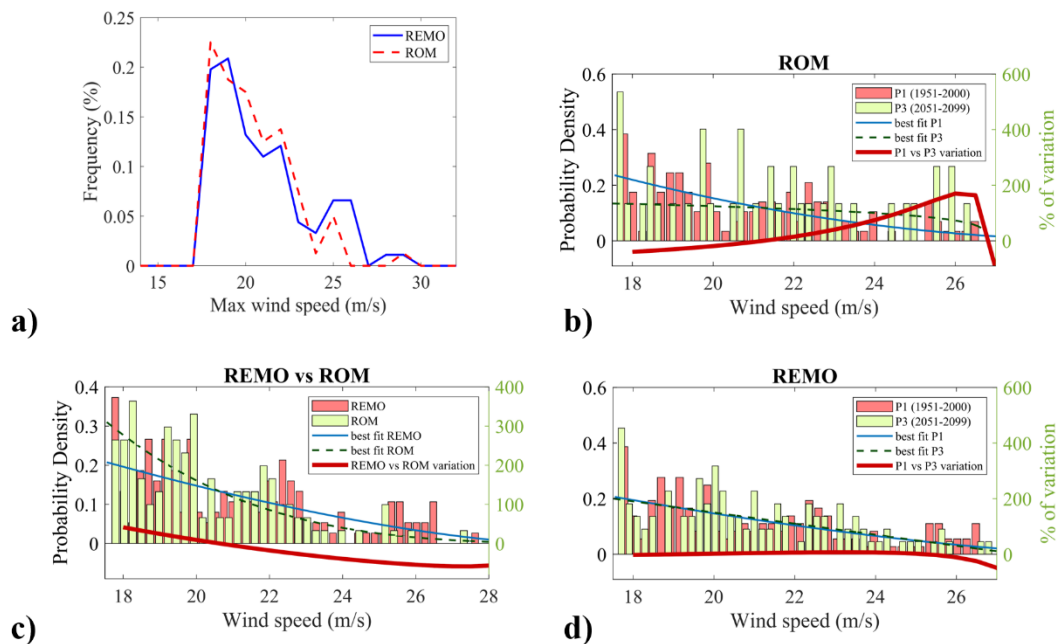


Figure 6.5. (a) Distribution of maximum wind speed per cyclone in past climate (period 1, P1: 1951–2000) for the uncoupled model (REMO; solid blue line) and the coupled model (ROM; dashed red line). (b) Values of maximum wind speed in medicanes for present climate (P1; red bars) and future climate (period 3, P3: 2051–2099; green bars), probability density function (pdf) of maximum wind speed for past climate (best fit for P1; solid blue line) and future climate (best fit for P3; dashed green line), for the coupled model (ROM). The thick red curve shows the percentage variation of the pdf for P3 with respect to the pdf for P1. (c) Same type of graph as b) but comparing the coupled model (ROM) to the uncoupled model (REMO). (d) Same as (b) but for the uncoupled model (REMO)

The differences between the coupled and uncoupled simulations indicate that the wind speed distribution for the coupled run is displaced towards lower wind speed values in comparison to the uncoupled run. For the higher intensity values, the uncoupled run shows higher frequency of medicanes than the coupled run (Figure 6.5c).

To determine the statistical significance of these differences we perform a Wilcoxon rank sum test (Wilks, 2006). This statistic is used to assess whether the two wind distributions are different with a confidence interval of 95%. We find that results

obtained from the two simulations are significantly different (p -value = 0.021). This allows us to conclude that wind intensity of medicanes simulated in the coupled and uncoupled runs is different.

The simulated maximum wind speeds in our models are smaller wind than in the 10-km resolution climatology (not shown; see Cavicchia et al., 2014b). This may be because the atmospheric resolution considered in this study (25 km) is still insufficient to allow for a correct representation of the maximum wind speed in mesoscale cyclones. This is an indication that the use of atmospheric models with a greater horizontal resolution is required to further improve the representation of mesoscale cyclones.

Future changes in medicane intensity are examined through the analysis of the probability density function for the maximum wind speed in the coupled (Figure 6.5b) and the uncoupled (Figure 6.5d) runs. Specifically, these figures show the distribution function of wind speed and its associated variation between past (P1 in Figure 6.5b,c; 1951–2000) and future (P3 in Figure 6.5b,c; 2051–2099) climates. In the coupled run, the frequency of high wind speeds (above 22 m/s) increases, whereas almost no change in wind speed frequency is found in the uncoupled run. The future decline in frequency found for the highest wind speeds (above 27 m/s) in the coupled run might just be an artefact of the very low number of medicanes simulated with these wind speeds.

6.3.3.2 Tropical structure analysis

As mentioned above, positive values of VTU indicate an upper-troposphere warm core cyclone (which is typically associated with a deep warm core cyclone), while negative values correspond to an upper-troposphere cold core cyclone. High values of VTU indicate that the cyclone has strong tropical characteristics.

The work performed in the chapter 5 of this thesis shows that the values of VTU and the maximum wind speed are correlated for medicanes. Therefore, medicanes with a more intense warm core will have typically a greater maximum wind speed. An explanation for this association is that the more intense warm core implies stronger convection and thus a larger release of latent heating which, in turns, leads to a higher radial pressure gradient, thus increasing wind speed. Such a link has been found more generally in the case of tropical cyclones, for example, by Jiang (2012).

The correlation analysis for past climate medicanes reveals a statistically significant (p -value < 0.05) relationship between the maximum wind speed and VTU both in the uncoupled ($r = .204$) and the coupled ($r = .282$) simulations. However, the results obtained for future climate are different for each model. The coupled model shows higher values of both maximum wind speed and VTU (supplementary figure 6.S2) in the future. At the same time, the correlation between maximum wind speed and VTU is also greater in the future ($r = 0.435$; p -value < 0.05). In contrast to this, the uncoupled model shows a future decrease of both the maximum wind and the values of VTU parameter (supplementary figure 6.S2). No statistically significant correlation ($r = -0.008$; p -value > 0.05) is found in this latter case between the maximum wind and the warm core

intensity. This contrasting behaviour suggests a clearer relationship between intensity and tropical characteristics in the future, which is consistent with the findings of the chapter 5 of this thesis.

6.3.4 Seasonal dependence of the effects of coupling

In order to assess whether the effects of coupling are seasonally dependent, we make a seasonal comparison of the duration of the medicanes (measured by the number of 6 hr time steps) and the intensity distribution between the coupled and uncoupled simulations (Figure 6.6). As the number of medicanes for some seasons is very low, in order to have a reasonable sample of medicanes, we take into account the whole simulation period (1951–2099) for both model configurations.

We note that the largest differences in medicane intensity between the coupled and uncoupled simulations take place in summer (Figure 6.6g). Almost no summer medicanes are simulated by the coupled model, and the intensity of the few cases is clearly lower than that of the uncoupled model. An examination of individual cyclone cases indicates that in the uncoupled simulation, cases of long-lasting summer cyclones associated with high wind speeds are found, which does not occur in the coupled run. Observations and reanalysis-based studies indicate, in good agreement with the coupled simulation, that medicanes are very infrequent in summer (e.g., Miglietta et al., 2013; Cavicchia et al., 2014a).

A likely explanation for the occurrence of unrealistic intense summer medicanes in the uncoupled simulation is that in this model configuration the SST does not undergo changes due to the action of the strong winds of the cyclone since the SSTs are prescribed. In contrast to this, in the coupled run the SSTs can vary in response to atmospheric forcing. We hypothesize that in the coupled run, due to air-sea coupling the ocean would respond to any intensifying atmospheric disturbance in their initial phase, through an SST reduction due to upwelling of colder water from below the mixed layer caused by the accelerating winds. Decreasing SSTs would limit a further development of the medicane. The mixed layer in summer over the Mediterranean Sea is very shallow, which would facilitate this negative feedback. But due precisely to the lack of intense summer medicanes in the coupled simulation, this explanation cannot be verified directly. The mixing effect induced by intense winds can only be assessed through proxies, like strong wind situations that are unrelated to cyclones. In the work from Berthou et al. (2016) the authors find a strong decrease of the SST (about 3°C) in the Western Mediterranean after an extreme Tramontane event in September. This shows the cooling potential of strong winds over shallow mixed layer waters in the Mediterranean.

6. IMPACT OF OCEAN-ATMOSPHERE COUPLING ON FUTURE PROJECTION OF MEDICANES IN THE MEDITERRANEAN SEA

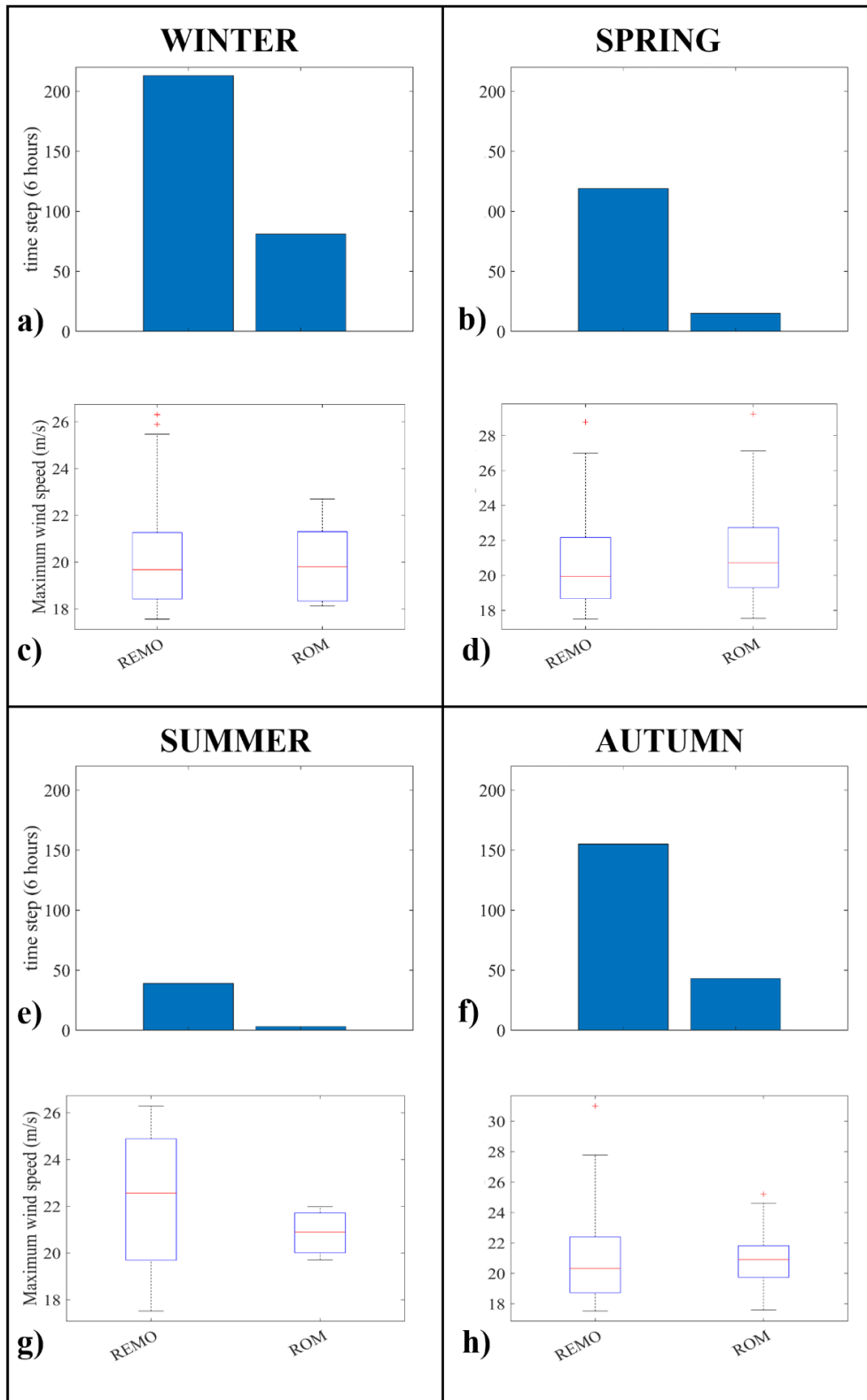


Figure 6.6. (a) Accumulated number of cyclone time steps in winter, considering the entire time period studied (1950–2100). (b), (e) and (f): as (a), but for spring, summer, and autumn, respectively. (c) Boxplots of maximum wind speed for each time step for the whole study period (1951–2099) in winter. (d), (g), (h): as (c) but for spring, summer, and autumn, respectively.

6.4 Concluding remarks

In this paper, we have examined the influence of air-sea coupling on future projections of medicanes. To that end, we run a set of coupled and uncoupled simulations with the regionally-coupled climate model ROM and its atmospheric stand-alone model REMO. In ROM, the global ocean model MPIOM is regionally coupled to the limited-area atmospheric model REMO. This allows us to have air-sea interactions at a rather high resolution in the area of interest at an acceptable computational cost. Our results highlight the importance of the use of high resolution coupled models to represent mesoscale cyclones like the medicanes.

The frequency of present time medicanes in the coupled model is closer to that obtained from downscaling of reanalysis data (Cavicchia et al., 2014a) than the frequency for the uncoupled model. In future climate, the frequency of medicanes experiences a significant decrease which is more pronounced in the coupled configuration. Our interpretation is that this decline may be due to: (a) a reduction in the number of extratropical cyclones (ECs) and (b) an increase of atmospheric stability, which is unfavourable for medicane generation. This is in agreement with several works in which a significant lowering of ECs and increased stability conditions (Giorgi and Lionello, 2008; Ulbrich et al., 2009; Romera et al., 2017) have been found in future climate projections.

The two runs reproduce quite well the main aspects of the monthly cycle of medicanes inferred from downscaled reanalysis data (Cavicchia et al., 2013). In future climate, a reduction of the number of medicanes per season is obtained. This reduction is more pronounced in winter in the coupled model (30 medicanes in 50 years). There are also differences in the projected change in autumn between the coupled (15 medicanes in 50 years) and the uncoupled simulations (3 medicanes in 50 years).

Previous works about the impact of climate change on medicanes, show an intensity increase of medicanes in the future. Our results show the response of the intensity depends on the coupling. In the coupled version there is an increase in the relative frequency of higher wind speeds, while in the uncoupled run we did not find significant change in the relative distribution. Additionally, wind speeds and VTU values (upper-troposphere warm/cold core parameter) show a significant, positive correlation in the coupled simulation both for past and future climate, while no significant correlation is found in the uncoupled run for future climate. The fact that VTU is higher in the future in the coupled run, indicates that medicanes could have more robust tropical-like characteristics in the future, and these enhanced tropical features appear to be linked to higher medicane intensities. The opposite occurs in the uncoupled configuration.

An analysis of the seasonal dependence of the effects of coupling on medicanes reveals that the largest differences in medicane intensity between the coupled and uncoupled simulations take place in summer. In the uncoupled simulation, cases of intense long-lasting summer cyclones are simulated, while this does not occur in the coupled run. Summer medicanes are nearly nonexistent in observed climatologies

(Miglietta et al., 2013; Cavicchia et al., 2014a), and this is better reproduced by the coupled model. We hypothesize that this might be due to a negative feedback for cyclone intensity in summer that could only act in the coupled model. This feedback is due to the shallow summer mixed-layer depth in summer in the Mediterranean Sea and the associated presence of cold water at small depths. This cold water would be upwelled to the surface in case of intensifying winds, limiting the latent heat fluxes necessary for the development of a medicane. Though the absence of intense medicanes in the coupled simulation does not allow a direct verification of this suggested mechanism, observed strong wind situations unrelated to cyclones (Berthou et al., 2016) demonstrate the cooling potential of strong winds over shallow mixed layer waters in summer in the Mediterranean.

6.5 Supplementary information

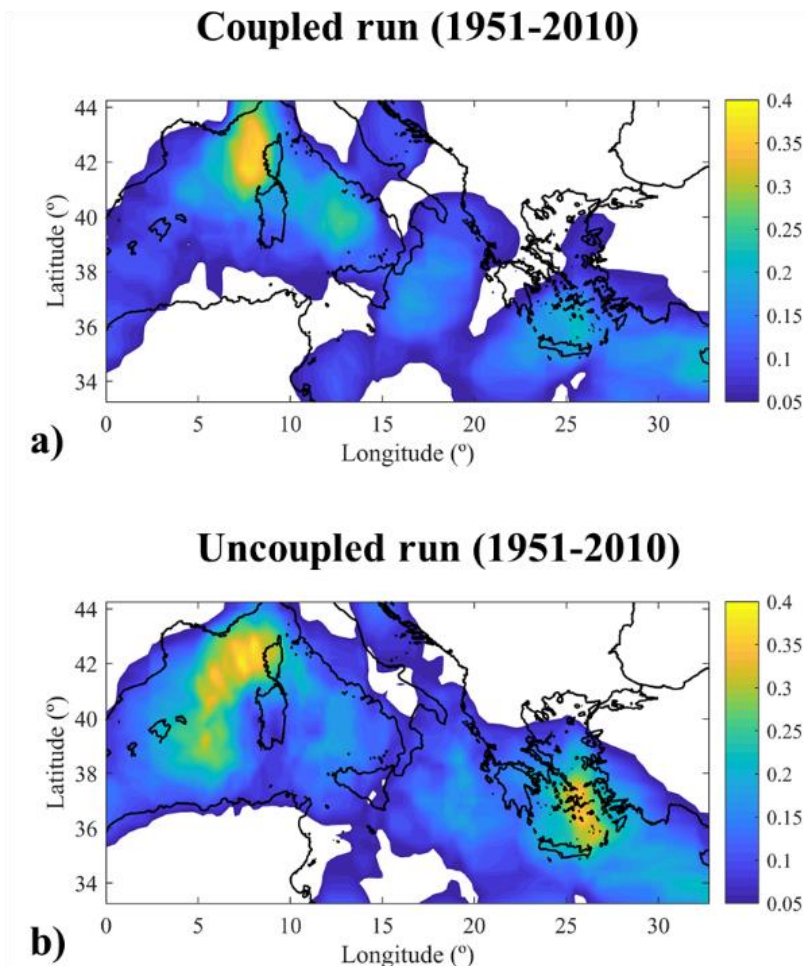


Figure 6. S1. a) Medicanes' track density (number of medicanes per year) from 1950-2010 for the coupled model. b) same (a) but for the uncoupled model.

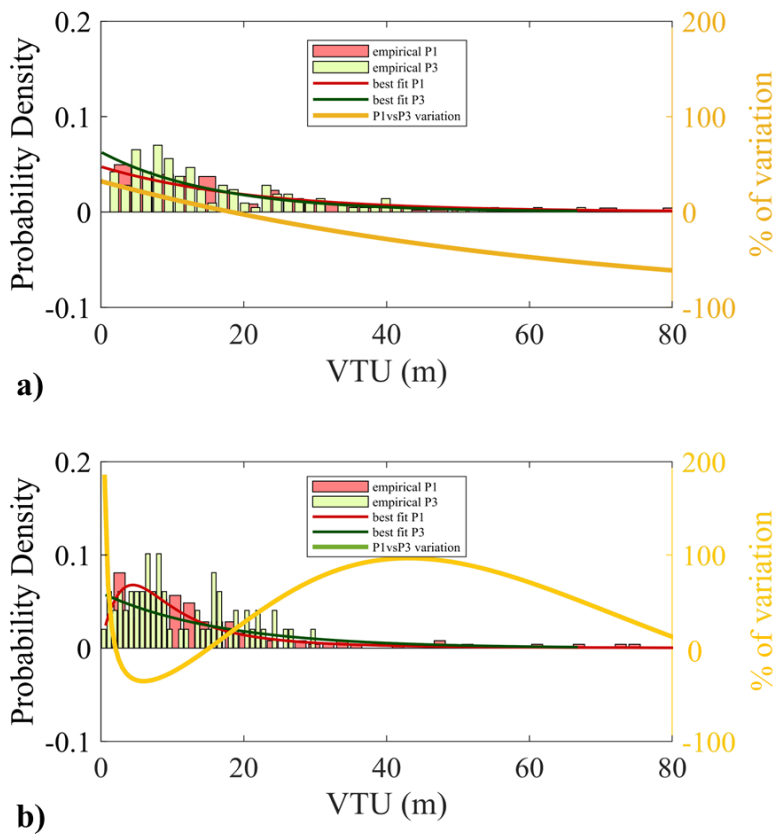


Figure 6.S2. Values of maximum VTU in medicanes for present climate (P1; red bars) and future climate (period 3, P3: 2051–2099; green bars), probability density function (pdf) of VTU for past climate (best fit for P1; solid blue line) and future climate (best fit for P3; dashed green line), for the uncoupled model (REMO). The thick orange curve shows the percentage variation of the pdf for P3 with respect to the pdf for P1. (b) Same as (a) but for the coupled model (ROM)

CHAPTER

7

Characterization of medicanes with a minimal number of geopotential levels

This chapter shows the results of the paper published in International Journal of Climatology:
*Characterization of medicanes with a minimal number of
geopotential levels* <https://doi.org/10.1002/joc.7020>

Abstract

Medicanes are tropical-like cyclones that develop in the Mediterranean Sea. Due to their harmful potential, the study of medicanes has captured great attention from the scientific community. In the context of a changing climate, their future climatological characterization can only be achieved using climate model output. A frequently used method to characterize the thermal structure of medicanes is the cyclone phase space (CPS) described by Hart (2003).

This requires geopotential data from 300 to 900 hPa every 50 hPa. However, in long, high-resolution climate simulations, model output requires very high storage space and only data from a few geopotential levels are saved. To overcome the lack of geopotential data at some levels, available data are vertically interpolated to obtain data for the 13 levels required. In this work, we use high horizontal resolution data from the ERA-5 reanalysis (1979–2018) to analyse the climatology of medicanes simulated using the 13 vertical levels required according to Hart (2003), as well as different combinations of geopotential data from a few selected levels.

Our results allow us to propose, for the first time, a limited set of recommended geopotential levels required for an adequate climatological characterization of medicanes in the perspective of long climate change simulations, taking into account the associated limitations of output data storage.

7.1 Introduction

Medicanes are mesoscale, warm-core cyclones that occasionally develop in the Mediterranean Sea (Ernst & Matson, 1983; Reale & Atlas, 2001). They are associated with strong precipitation events and heavy winds that can eventually approach hurricane intensities (Emanuel, 2005a). Medicanes form from baroclinic cut-off lows, which are very frequent in the Mediterranean Sea since this is one of the three preferred regions in the northern hemisphere for their development (Nieto et al., 2005). These baroclinic cut-off lows evolve into warm-core cyclones through tropical transition (Chaboureau et al., 2012) and are characterized by a convective cloud structure which is symmetric around a cloud-free centre (Fita et al., 2007). This highlights the relevance of air-sea interactions and convection in their development and maintenance (Miglietta & Rotunno, 2019). Also, medicane development necessitates enhanced vorticity advection, which forces uplifts and induces further low-level cyclogenesis (e.g., Carrió et al., 2017).

In spite of their small size (with a typical diameter smaller than 300 km), medicanes can drive important socio-economic losses in coastal areas as a result of heavy precipitation and the strength of the associated winds. In the last decades, medicanes have captured the attention from the scientific community as they constitute a serious risk for infrastructures, and, ultimately, can pose a threat to human lives. In Bakkensen (2017), the authors analyse 62 years of historical medicane re-analysed tracks and find that Italy suffers the highest expected damages from medicanes, with an average of \$33 million dollars annually. They also show that Mediterranean islands constitute a particularly vulnerable area.

Although medicanes are relatively infrequent, with an annual mean of about 1.6 events per year over the whole Mediterranean basin (Cavicchia et al., 2014a), their harmful potential makes it essential to improve the state-of-the-art knowledge regarding their formation and evolution. Because of their small size and the limited data available over the sea, satellite data has been widely used to study medicanes (Tous & Romero, 2013). In the last decades, the increase in computational power has made it possible to enhance the horizontal resolution of climate models so that model output can be used to characterize medicanes (Akhtar et al., 2014; Gaertner et al., 2018). A potential advantage of the model approach is that it offers the possibility to study medicanes from a climatological point of view (e.g., Cavicchia et al., 2014a), not only for present-day climate, but also in different future climate scenarios. In this context, previous works find small changes (or even a subtle decrease) in medicane frequency, together with an increase in their intensity by the end of the 21st century (Romero & Emanuel, 2013; Cavicchia et al., 2014b; Tous et al., 2016; Romera et al., 2017). This may increase medicane-related hazards for example, strong winds and precipitation that will potentially enhance socioeconomical losses and even human casualties by the end of the century.

To detect medicanes in climate models, the thermal structure of Mediterranean cyclones (medicanes are a subset of them), must be analysed. The characterization of the thermal structure of cyclones making use of model and/or reanalysis data is frequently

performed following Hart (2003). The CPS described in Hart (2003) summarizes the various types of mesoscale to synoptic-scale cyclones into a multidimensional continuum. This method requires the use of geopotential data ranging from 300 to 900 hPa levels every 50 hPa (i.e., 13 levels). However, in long, high horizontal resolution climate simulations model output requires very high storage space and only geopotential data from a few vertical levels is stored. The number of geopotential levels to save is not standardized, neither the specific geopotential levels to store, but it is frequent to save geopotential model output on a few vertical levels like 850, 500 and 300 hPa. To overcome the absence of geopotential data at some levels, available geopotential data can be vertically interpolated in order to get data for the 13 levels mandatory for the CPS calculation. In previous studies, an attempt has been done to simplify the CPS method proposed by Hart (2003) for example, Baatsen et al. (2015); Liu et al. (2017). For instance, in Liu et al. (2017) the upper and lower tropospheric layer definitions of Hart (2003) have been modified in order to adapt to the available levels of the model output: instead of a 900–600 hPa lower layer and a 600–300 hPa upper layer, they use a 850–500 hPa lower layer and a 500–300 hPa upper layer.

In this work we use high horizontal resolution reanalysis data from ERA-5 (Hersbach, 2018) including the entire Mediterranean Sea to examine the climatology of medicanes reproduced by the CPS using geopotential data from (i) the 13 vertical levels required in the original method of Hart (2003), (ii) as well as just using different combinations of data from a few selected geopotential levels and the mean-sea level pressure (MSLP). The frequently available geopotential levels of 850, 500 and 300 hPa are the basis for the different limited groups of levels tested. The MSLP is used, along with the geopotential at 850 hPa, to compute the geopotential at 900 hPa. Specifically, we analyse the capability of the different combinations of geopotential levels to reproduce the medicane climatology of the past years (i.e., 1979–2018). Based on the obtained results we propose, for the first time to our knowledge, a series of recommended, reduced number of geopotential levels that would allow for a proper climatological characterization of medicanes. Though the calculations are done using reanalysis data, this is only a practical way in order to assess the effects of using a small number of geopotential levels (which is the typical situation in long climate change simulations) instead of all 13 geopotential levels indicated in the original CPS method. These 13 levels are available in the reanalysis, not in usual climate change simulations. The final aim is to determine a minimum set of levels that can be recommended for the output in long climate change simulations, where output storage space is limited. This work is structured as follows. In Section 7.2, the methodology is described. In Section 7.3, results are presented and discussed. A summary and the conclusions are given in Section 7.4

7.2 Methodology

7.2.1 Data

To characterize cyclones, we use reanalysis data from ERA-5, also recently used in Zhang et al. (2021) to examine precipitation associated with medicanes. In our study we make use of ERA-5 variables with a frequency of 6 hr. One of the major advantages of the new ERA-5 reanalysis is that it offers data with a horizontal resolution of 30 km (i.e., 0.25°) and offers improved tropospheric data and a better representation of tropical cyclones, which is key for this study. In this work we use ERA-5 reanalysis data for several reasons. First, all the geopotential levels required for the original CPS method are available. Second, reanalysis data with enhanced horizontal resolution as ERA-5 provides us good conditions to perform our study, as medicanes are small-size cyclones. The use of reanalysis data is only a functional means for providing practical information, that is, which are the basic geopotential levels to save in order to perform the subsequent CPS calculation and get results comparable to those that would be obtained if all the geopotential levels were available. We consider the period that goes from 1979 until 2018. Variables required for the cyclone tracking are (i) the mean sea level pressure (Pa), (ii) the u and v-components of the wind at 700 hPa (m/s) and (iii) the u and v-components of the 10-m wind (m/s). For the CPS we need geopotential data from the levels specified in Section 7.2.3.

7.2.1 Cyclone tracking

In this work, cyclones are detected and tracked following the methodology presented in Picornell et al. (2001), which has been found to be suitable to detect mesoscale cyclones, such as medicanes (Gaertner et al., 2018). The method can be divided into two steps. First, all pressure minima (i.e., potential cyclones) are computed from 6-hr mean-sea level pressure data. Second, weak cyclones are excluded. To detect weak cyclones, the pressure field along the eight typical directions around the minimum is studied. Only cyclones for which the pressure gradient exceeds 0.005 hPa/km, in at least six of the eight directions, are considered. Another condition intrinsic to the cyclone identification and tracking algorithm is that if two cyclones are not separated by at least four grid points, only the one with the most intense circulation is chosen. More details about the cyclone tracking method can be found in Picornell et al. (2001).

7.2.1 Cyclone phase space

After the tracking, the CPS described in Hart (2003) is applied to characterize the three-dimensional thermal structure of the cyclones during its life cycle. The CPS considers three parameters, which have been proved to successfully distinguish and describe the structure of tropical and extratropical cyclones. These are:

- **The *B* parameter**, which represents the lower tropospheric horizontal thermal asymmetry and provides information regarding the frontal (or non-frontal) nature of the storm on the basis of changes in the thickness between 900 and 600 hPa

across the cyclone within a radius of 150 km. The 150-km radius we consider, which has also been used in previous works (e.g., Gaertner et al., 2018), is smaller than the 500-km radius proposed in Hart (2003). The reason for this is that whilst in Hart (2003) larger-scale cyclones are studied, in this work we focus on medicanes, with a typical diameter not larger than 300 km, as shown by Miglietta et al. (2013). As in Hart (2003), we assume that values of B greater than 10 m correspond to frontal systems and values lower than that to non-frontal systems.

- **-VTL and -VTU are the lower- (i.e., 600–900 hPa) and the upper-troposphere (i.e., 300–600 hPa) thermal winds, respectively**, which provide a measure of the vertical thermal structure. These parameters allow us to determine whether the cyclone has a warm or a cold core. Negative values of thermal wind parameters are indicative of a cold-core cyclone, whilst positive values indicate the opposite.

In this study, we classify as a medicane those cyclones with maximum wind speeds greater than 17.5 m/s within a radius of 400 km from the cyclone centre, values of -VTL and -VTU greater than 0 and B smaller than 10 at least for one time step during the cyclone lifetime. In some previous studies, the vertical limits and extension of the two layers used in the CPS method has been changed for application to medicanes. (Picornell et al., 2014) lowered the CPS layer limits (925, 700 and 400 hPa) for detecting medicanes, taking into account the lower tropopause height associated to cut-off lows over the Mediterranean Sea. In contrast to this, Ragone et al. (2018) used higher CPS layer limits (850, 500 and 200 hPa) due to data availability reasons. We have maintained the original limits and extension of the CPS layers, as they were obtained originally without geographical restrictions and for all types of cyclones, and the use of the original layer values favours the comparability with other regions of the world. In the case of medicanes, the original setup of the CPS layers has been also frequently used (among others, in Gaertner et al. (2007); Chaboureau et al. (2012); Cavicchia et al. (2014a); Miglietta et al., (2015); Pytharoulis, (2018)) and Patlakas et al., (2021). To compute the CPS parameters described in Hart (2003) we use two different methods:

- **Original method (NO-INT):** following Hart (2003), we take geopotential data from 300 to 900 hPa with a vertical spacing of 50 hPa to characterize the thermal characteristics of the cyclone. This allows us to have a reference to compare the results obtained to the different simplified methods explained below.
- **Simplified method (INT):** in this case we use the geopotential of a few selected levels, as well as the MSLP, to compute the CPS. Selected geopotential levels are INT-3 (300, 500 and 850 hPa), INT-4-400 (300, 400, 500 and 850 hPa), INT-4-600 (300, 500, 600 and 850 hPa) and INT-5 (300, 400, 500, 600 and 850 hPa). The geopotential levels taken in the different INT configurations are summarized in Table 7.1. The geopotential of the missing levels required according to Hart (2003) are computed with a linear vertical interpolation between the available levels. The reason why we use a linear interpolation instead of a more

sophisticated one is that we aim to determine whether the most simplistic method can be suitable for medicane characterization. With this simplified method, the MSLP is used to calculate the geopotential at 900 hPa as explained below.

Table 7.1. Geopotential levels used for the cyclone phase space (CPS) for the different simplified methods here assumed.

Simplified method	Geopotential levels used for the analysis (hPa)				
	300	400	500	600	850
INT-3	X		X		X
INT-4-400	X	X	X		X
INT-4-600	X		X	X	X
INT-5	X	X	X	X	X

We first compute the geopotential height at 850 hPa

$$h_{850} = z_{850}/g \quad (7.1)$$

where h_{850} corresponds to the geopotential height at 850 hPa, z_{850} is the geopotential at 850 hPa and g the gravitational constant, set to 9.8 m/s^2 . Then, the pressure changes between 850 hPa and the mean sea level pressure is calculated (Equation 7.2).

$$DP_{mslp} - 850 = MSLP - 850 \quad (7.2)$$

where $DP_{mslp}-850$ corresponds to the pressure change from 850 hPa to the sea level and, as stated above, MSLP is the mean-sea level pressure. Finally, the geopotential at 900 hPa is computed assuming a linear interpolation as follows (Equation 7.3):

$$z_{900} = \left(h_{850} - \left(\frac{50h_{850}}{DP_{mslp}-850} \right) \right) g \quad (7.3)$$

where z_{900} is the geopotential at 900 hPa, h_{850} the geopotential height at 850 hPa, $DP_{mslp}-850$ corresponds to the pressure change from 850 hPa to the sea level and g the gravitational constant, set to 9.8 m/s^2 .

7.3 Results and discussion

In this section we compare results obtained when the CPS is performed following the original methodology proposed in Hart (2003), that is, NO-INT, to those we get with the different simplified interpolated configurations, that is, INT. We start with the climatological study of the annual, seasonal and monthly frequency of reproduced medicanes. Then, we examine the performance of the INT configurations to simulate other relevant aspects such as medicane intensity, regions of medicane formation and the development of spurious medicanes that is, cyclones that actually did not develop the needed tropical characteristics, but which appear as such when the simplified methods are applied to obtain the CPS parameters. Additionally, we also investigate the

performance of the INT configurations to reproduce three intense and longlasting observed medicanes: Rolf, Celeno and Zorbas.

7.3.1 Frequency of detected medicanes

Figure 7.1 shows the annual number of medicanes detected from 1979 to 2018 for the case in which the CPS is computed making use of 13 geopotential levels (NO-INT). The corresponding trend (which is not statistically significant in any case, as can be observed in Table 7.2) is also depicted in the figure.

Table 7.2 Statistical analysis for the different configurations here tested computed for the 1979–2018 time period: Average number of medicanes per year for the considered time period, standard deviation, the corresponding trend and the correlation between a given configuration and NO-INT

		NO-INT	INT-3	INT-4-400	INT-4-600	INT-5
Medicane per year		1.17	1.27	1.25	1.37	1.35
Standard deviation		1.10	1.08	1.06	1.10	1.12
Trend	Value	0.028	0.014	0.021	0.027	0.028
	Significance	0.067	0.360	0.160	0.074	0.072
Correlation	Value	--	0.640	0.729	0.786	0.858
	Significance	--	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05

Note: We consider that there is statistical significance when the p-value is smaller than the threshold of 0.05.

NO-INT reproduces between 0 and 3 medicanes per year, which is in line with former climatological studies (e.g., Cavicchia et al., 2014a; Gaertner et al., 2018; Zhang et al., 2021). For the considered time period, we compute an annual mean of 1.17 cyclones and an increasing trend of 0.028 medicanes per year (see Table 7.2 for details). The NO-INT configuration provides an annual-mean number of medicanes somewhat smaller than ~1.5, the frequency reported in Zhang et al., (2021) using data from ERA-5 for the same time span here examined. In the climatology from Cavicchia et al., (2014a), the time period between 1950 and 2011 is considered. For the time interval common to our work (i.e., 1979–2010), data from Cavicchia et al., (2014a) indicate the occurrence of 1.56 medicanes per year. For that time span we find an average of 1.12 medicanes per year. Also, according to Cavicchia et al., (2014a), an increasing trend of 0.069 medicanes per year from 1979 until 2010 would occur. For that time period we find an increasing trend of 0.046 medicanes per year. It is remarkable that our results are able to capture the increasing trend found in Cavicchia et al., (2014a), which is not reproduced in the climatology from Zhang et al., (2021). With our methodology we are able to capture well-known and intense medicanes such as Rolf (2011), Celeno (1995), Zorbas (2018) or Qendresa (2014), whilst in Zhang et al. (2021) medicanes such as Celeno (1995) are not reproduced.

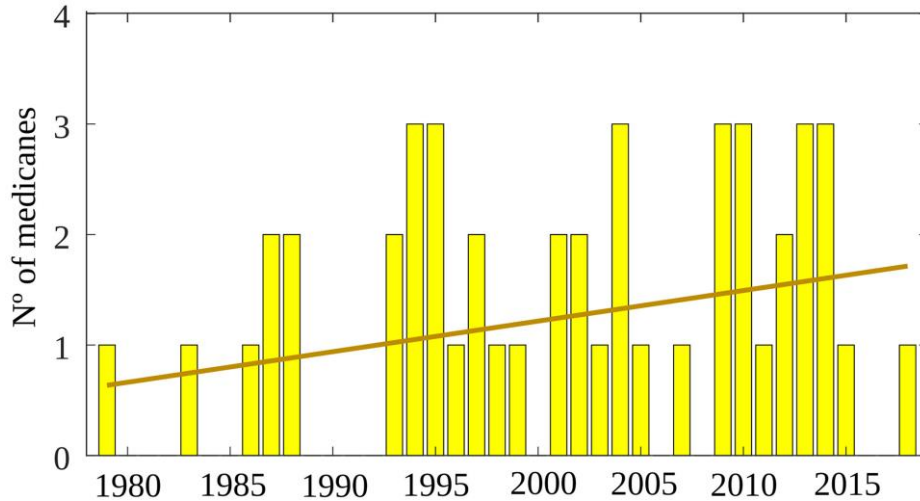


Figure 7.1. Annual frequency (bars) and trend (line) of medicanes reproduced with NO-INT from 1979 to 2018

The differences between the three climatologies, as well as the somewhat smaller frequency we find with respect to Zhang et al., (2021) and Cavicchia et al., (2014a) may be related to several factors. First, the tracking method we use, based on Picornell et al., (2001) is different from that employed in Zhang et al., (2021) and Cavicchia et al., (2014a). In the sensitivity study from Flaounas et al., (2018) six different cyclone tracking methods were applied to regional climate model and reanalysis data and the resulting climatology of Mediterranean cyclones is shown to be highly dependent on the tracking method used. Thus, differences between our climatology and those from Zhang et al., (2021) and Cavicchia et al., (2014a) should be expected. Importantly, the wind criteria we use to define a medicane are different and stricter than that used in those works. In our study, wind speed should attain at least 17.5 m/s within a radius of 400 km by the time the cyclone has a full tropospheric warm core. Therefore, less medicanes can be expected to develop in our study relative to Zhang et al., (2021) and Cavicchia et al., (2014a). Also, in Zhang et al., (2021) and Cavicchia et al., (2014a) tropical cyclones over land and over the Black Sea are, to our knowledge, considered as medicanes, whilst in our work such cyclones are excluded. Furthermore, in NO-INT, we use the original method of Hart (2003), in which a total of 13 geopotential levels are used (from 300 to 900 hPa every 50 hPa) to characterize the thermal structure of medicanes. As we will see in the next paragraph, the medicane number is highly dependent on the number of geopotential levels used and in the aforementioned works the number of geopotential levels used to perform the CPS is not specified. Furthermore, when the Hart (2003) method is applied, we assume a radius of 150 km, which is different from that in those studies.

7. CHARACTERIZATION OF MEDICANES WITH A MINIMAL NUMBER OF GEOPOTENTIAL LEVELS

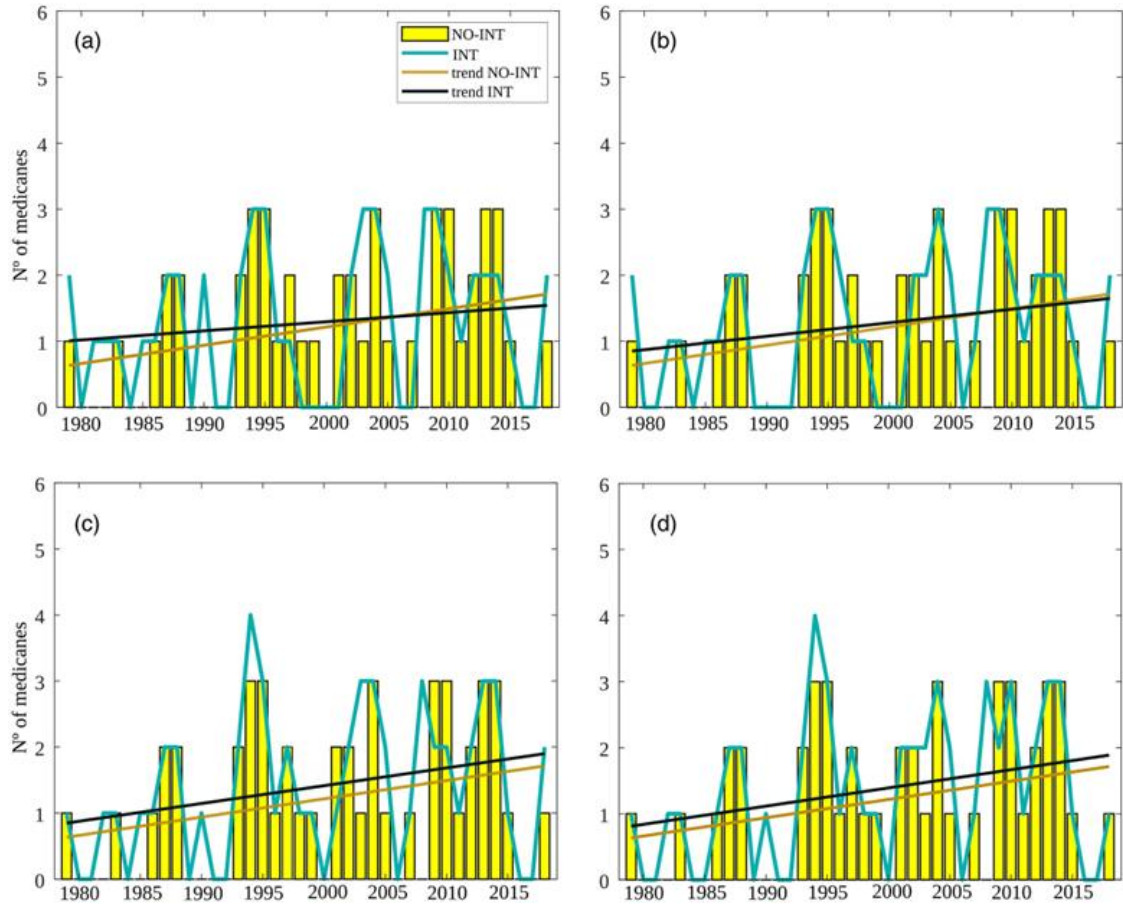


Figure 7.2. Annual frequency of medicanes reproduced with NO-INT (yellow bars; a–d) and with the corresponding INT configuration (green lines; a–d; a: INT-3, b: INT-4-400, c: INT-4-600, d: INT-5) from 1979 to 2018. The trends for NO-INT and the different INT configurations are shown with a brown and a black lines, respectively.

Focusing on the other four configurations tested (INT), we note that all of them detect a maximum of 3–4 medicanes per year (Figures 7.2a–d). All the INT configurations reproduce a similar, but slightly higher, annual mean number of medicanes than NO-INT (Table 7.2). Notwithstanding, differences in the annual-mean number of medicanes reproduced by the configuration that estimates more medicanes (i.e., INT-4-600) and NO-INT is 0.2. All INT configurations show a significant statistical correlation with NO-INT (p -value $< .05$; Table 7.2). The lowest and highest correlations are found for INT-3 and INT-5, respectively, with values greater than 0.7 in all cases with the exception of INT-3. In Table 7.2 we observe that the addition of more geopotential levels does not have the same impact on the different statistics computed (i.e., mean, trend, standard deviation or correlation with NO-INT). It is remarkable the good performance of INT-4-600 and INT-5, which provide an annual-mean number of 1.37 and 1.35 medicanes, respectively, with correlations close to 0.8 relative to NO-INT. Although INT-5 provides the best results in comparison to NO-INT, for many parameters that is, standard deviation, trend, correlation, INT-4-600 gives a good performance (much better than for INT-3 and INT-4-400). The relevant implication of this is that INT-4-600 is able to provide good results with less geopotential levels than INT-5, which is beneficial to reduce the model

output storage (especially important for long climatic model simulations), as well as the computation time of the CPS.

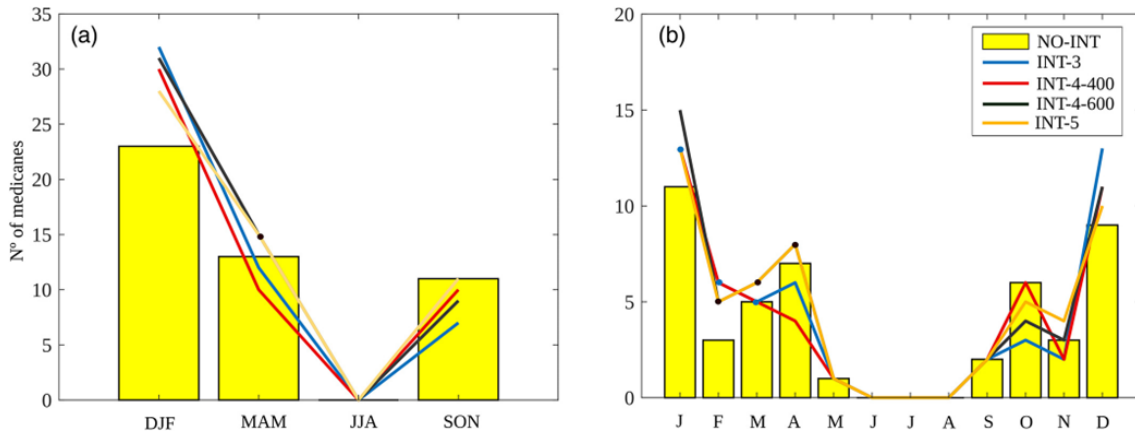


Figure 7.3. Seasonal (a) and monthly (b) frequency of medicanes reproduced with NO-INT and with the corresponding INT configuration (blue: INT-3; red: INT-4-400; black: INT-4-600; orange: INT-5) computed for the 1979–2018 time period. In this figure: Winter (December, January, February), spring (March, April, May), summer (June, July, August), fall (September, October, November). Dots of the colour of the curve which is hidden have been added

In Figure 7.3a, the total seasonal number of medicanes simulated for the whole time period of analysis is shown. In all cases, in line with Cavicchia et al., (2014a), the greatest number of medicanes is reproduced in winter, whilst no medicanes develop in summer. The absence of medicanes in the summer matches well with previous studies, since medicane formation requires intrusions of cold air which promote instability which are not active in summer. NO-INT reproduces 23 medicanes in winter, 13 in spring, none in summer and 11 in fall. The fact that 2 more medicanes are found in spring than in fall is caused by a large number of events in April. A relative maximum in the number of medicanes in April is also found in Cavicchia et al., (2014a) when only the events formed in the main medicane genesis area (the Western Mediterranean; see fig. 6 of Cavicchia et al., 2014a) are considered.

All the INT configurations overestimate the amount of medicanes in winter and tend to underestimate it (although to a lesser extent), in fall. This is shown in more detail in Figure 7.3b, which is equivalent to Figure 7.3a, but for the monthly distribution. Figure 7.3b shows good qualitative agreement with results from Cavicchia et al., (2014a). In view of our results, we can thus state that the overestimation in the annual-mean number of medicanes observed in Table 7.2 is the result of the development of spurious medicanes with the INT configurations in winter. In winter and fall, INT-3 is the configuration for which results are more biased and INT-5 the one for which results are closer to those obtained with NO-INT. Results reproduced with INT-4-400 and INT-4-600 are quite similar. In summer, all INT configurations are capable to successfully simulate the absence of medicanes from NO-INT.

7.3.2 Mediane structure and intensity

At this point, it is interesting to analyse the ability of the different configurations to reproduce the wind speed and the warm core distribution of NO-INT. Figure 7.4 shows the probability density function of the wind speed for NO-INT and the corresponding INT cases. In general, results show that the wind speed distribution of each of the configurations resembles that of NO-INT. Specifically, the differences between the best fit wind distribution of each configuration and NO-INT are not statistically significant according to a Wilcoxon test (supplementary information; Table 7.S1). As wind speed increases, the INT configurations tend to provide slightly higher frequencies than NO-INT. All INT configurations are thus able to capture well the wind speed distribution from NO-INT.

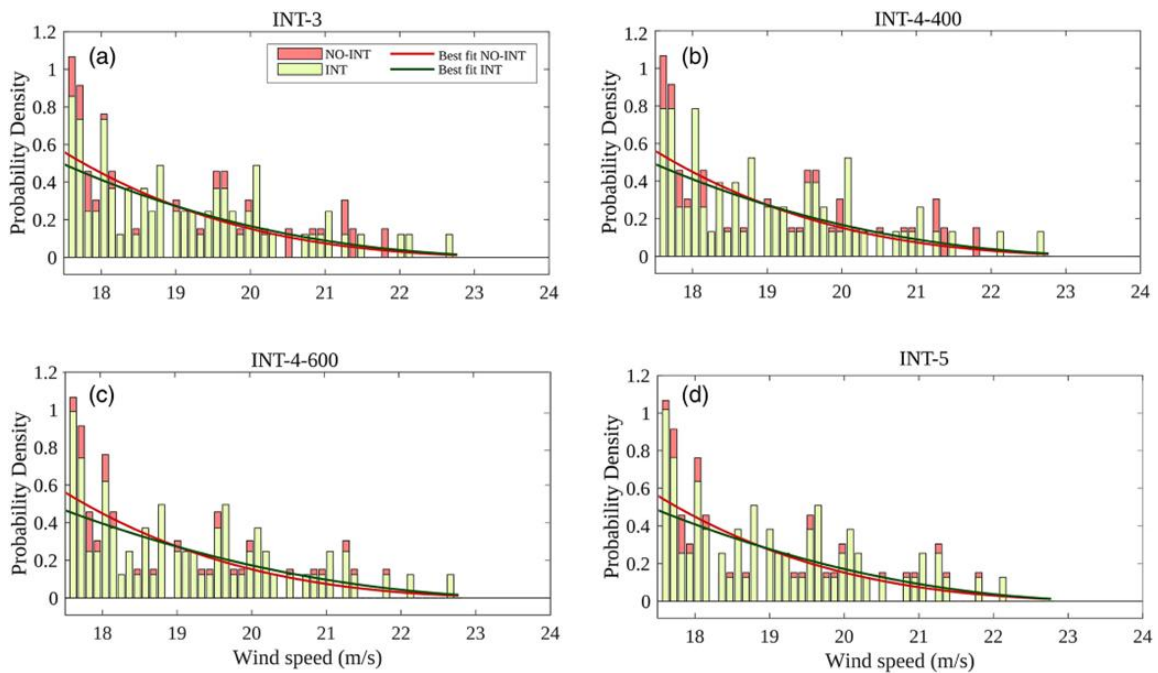


Figure 7.4. Probability density function of the wind speed (m/s) for NO-INT (red bars) and the corresponding interpolated case (green bars; a: INT; b: INT-4-400; c: INT-4-600; d: INT-5). The best fit of the probability density functions for NO-INT (red line) and the different interpolated cases (blue line) are also shown

Regarding the capability of the different configurations to reproduce the warm core characteristics from NO-INT, Figure 7.5 shows the probability density function of -VTU (i.e., intensity of the warm core) for each of the configurations tested, respectively, together with that from NO-INT. In this respect, high values of -VTU correspond to intense, tropical cyclones with a well-developed upper level warm core. In turn, the intensification of the cyclone entails high wind speeds, intense precipitation etc. Different from results from Figure 7.4, results now show that the specific distribution obtained is very dependent on the configuration selected, although the differences between the NO-INT and corresponding INT configurations are not statistically significant (p -value $>.05$). We note that configurations with an additional upper level (i.e., 400 or 600 hPa), represent

better the warm core of medicanes than INT-3. Also, INT-5 gives the best performance regarding -VTU.

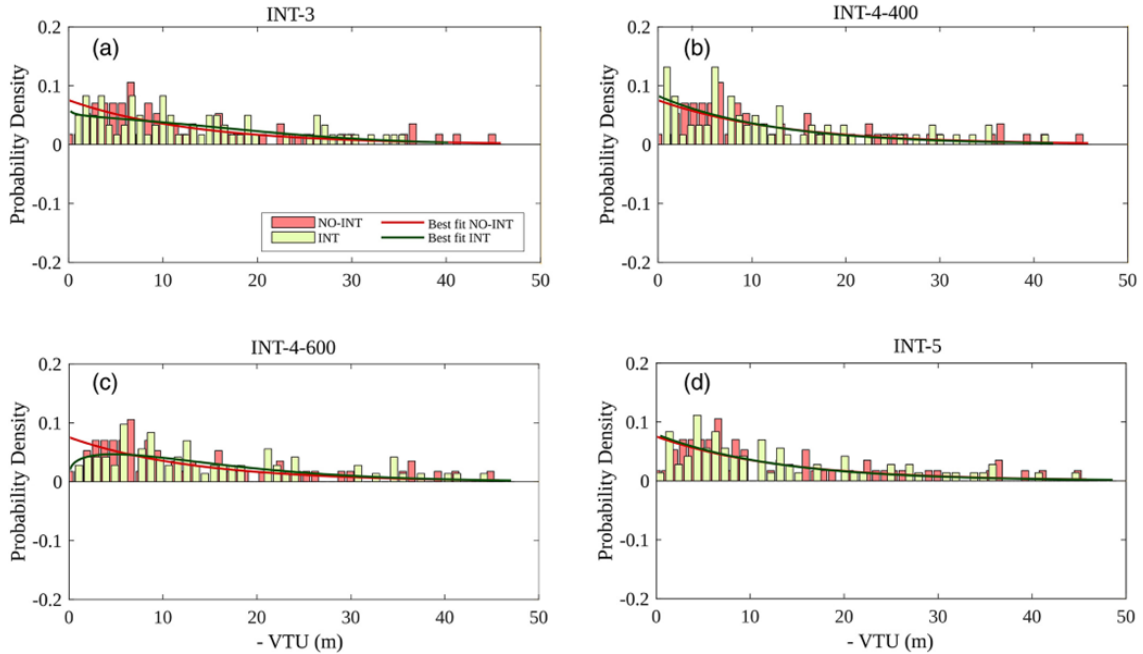


Figure 7.5. As for Figure 7.4, but taking into account -VTU (m)

Figure 7.6 shows annual time series of the total number of hours during which the medicanes have tropical characteristics (symmetric, warm-core cyclones), as well as the corresponding trend. A very interesting result from NO-INT is the observed increasing trend of the duration of tropical characteristics during the last decades.

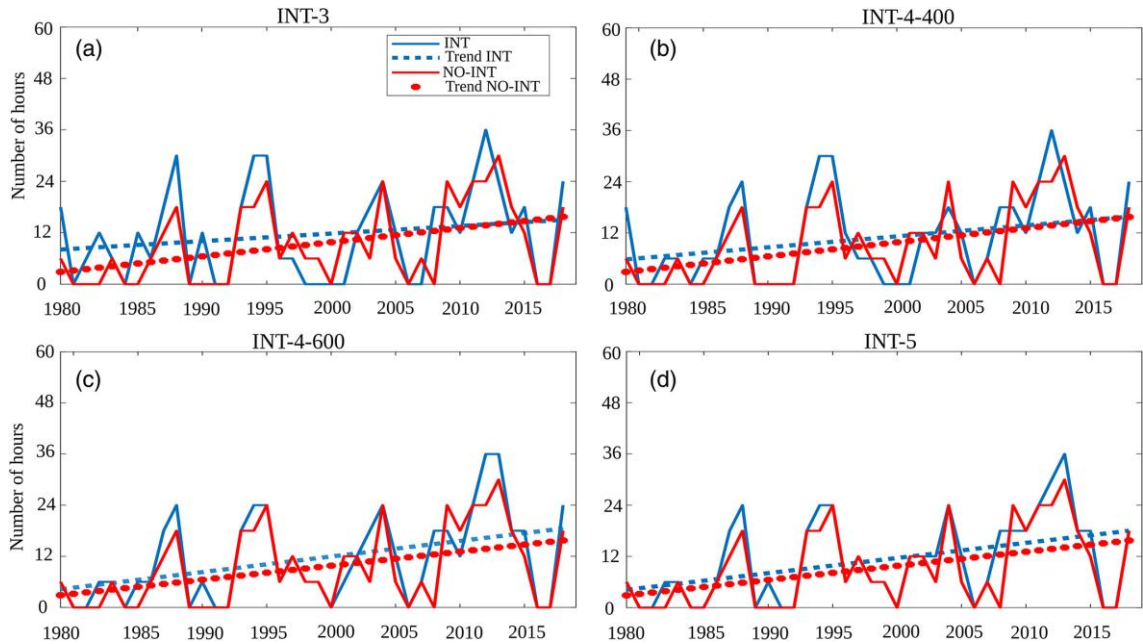


Figure 7.6. Annual time series of the total number of hours during which the cyclones have tropical characteristics, as well as the corresponding trend, for NO-INT (red) and the corresponding INT configuration (blue; a: INT-3; b: INT-4-400; c: INT-4-600; d: INT-5)

This may be related to an increase of the Mediterranean sea surface temperature (Gaertner et al., 2018), which favours the maintenance of the tropical structure (Miglietta et al., 2011), and is fully consistent with the results obtained by the chapter 5 of this thesis for a future climate scenario. All INT configurations coincide in an increase of the number of hours with tropical characteristics over time. This progressive tropicalization of medicanes is better captured with INT-4-600 and INT-5. The INT-4-600 configuration, once more, appears to be a suitable candidate since it provides a similar representation as INT-5 but with less geopotential data. It is interesting to note that all configurations (i.e., NO-INT and INT) also show an increase in medicane lifetime. This trend, which is statistically significant in all cases (not shown), indicates a progressive increase in the period during which medicanes have a fully tropical structure.

7.3.3 Areas of preferential formation of medicanes

Different studies conclude that medicane genesis is more common at several locations of the Western and Eastern Mediterranean Sea (e.g., Tous et al., 2013; Cavicchia et al., 2014a). The preferred areas for cyclone formation are roughly coincident with regions of enhanced vorticity advection (de La Torre et al., 2008). Medicanes form more frequently in the Western Mediterranean Sea, in particular, within the area located between the Balearic Islands and the coast of Spain, the south of France and the western coast of Corsica and Sardinia. A secondary area of medicane formation is between Sicily and Greece, covering the Ionian Sea until the Lybian coast. In Figure 7.7 we observe the track density for the tropical phase for the studied time period for the different configurations. We note that with NO-INT (Figure 7.7a), in agreement with literature, medicanes are primarily formed in the mentioned regions. First, near the western coast of Corsica and the north of Sardinia (Figure 7.7a). Second, between the south of Italy and Greece.

The two areas of enhanced medicane formation we find are qualitatively similar to those found in Cavicchia et al. (2014a) and are in line with the regions proposed in Zhang et al. (2021) using ERA-5 data as well. Only the configurations INT-4-600 and INT-5 capture a similar density of medicanes formed in those two areas. With INT-3 and INT-4-400 the frequency of medicanes is underestimated in both the Eastern and Western Mediterranean basin, especially with INT-4-400. This highlights that the incorporation of the 600 hPa geopotential level is key to reproduce observed genesis areas. These results underline, once more, that INT-4-600 is able to provide a good performance and thus may constitute, in many cases, a good alternative for INT-5.

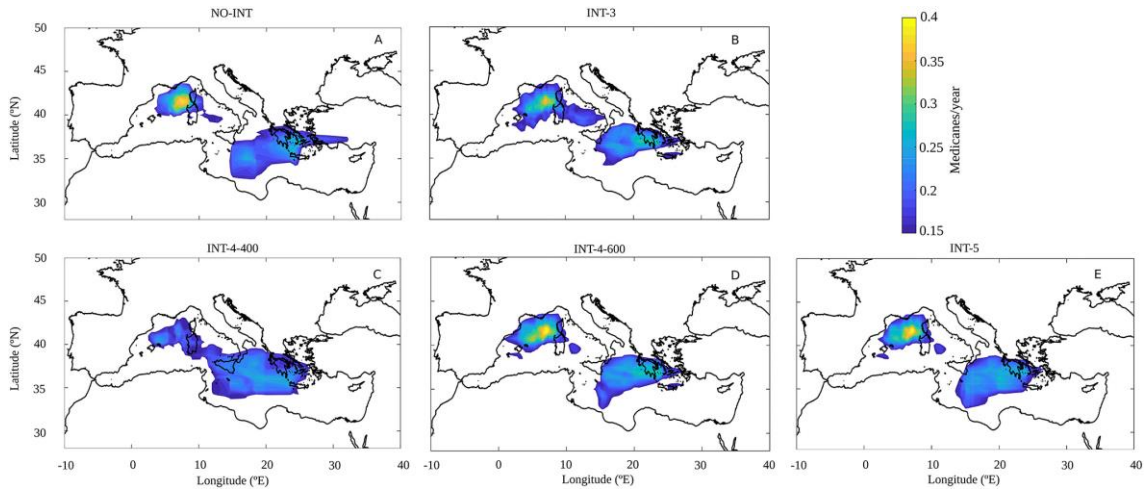


Figure 7.7. Track density (medicanes/year) for the 1979–2018 time period and the different configurations studied (a: NO-INT; b: INT-3; c: INT-4-400; d: INT-4-600; e: INT-5). Note that panels have been created with data with a horizontal resolution of 0.25° subsequently smoothed.

7.3.4 Concurrence

The duration of the fully tropical phase of medicanes obtained with NO-INT and INT configurations, respectively, is presented in Figure 7.8. In agreement with what found so far, the INT configurations reproduce more medicanes than NO-INT. This therefore implies that also, a variable number of spurious medicanes is reproduced with the interpolated configurations.

It is also important to realize that, in general, the fully tropical phase of medicanes lasts more in the INT cases. In more detail, with INT-5 and INT-4-600, differences in the duration of each of the individual medicanes relative to NO-INT are smaller than with INT-3 or INT-4-400. Also, spurious medicanes have a shorter duration with INT-4-600 and INT-5. Therefore, INT-5 and INT-4-600 are clearly the best options once more. Although with INT-5 differences with respect to NO-INT are slightly smaller than with INT-4-600, results are quite similar and the choice of INT-4-600 could be a good one since it involves less data to compute the CPS. The lack of concurrence between NOINT and INT-3 is quite remarkable, making this configuration the least recommended one.

7. CHARACTERIZATION OF MEDICANES WITH A MINIMAL NUMBER OF GEOPOTENTIAL LEVELS

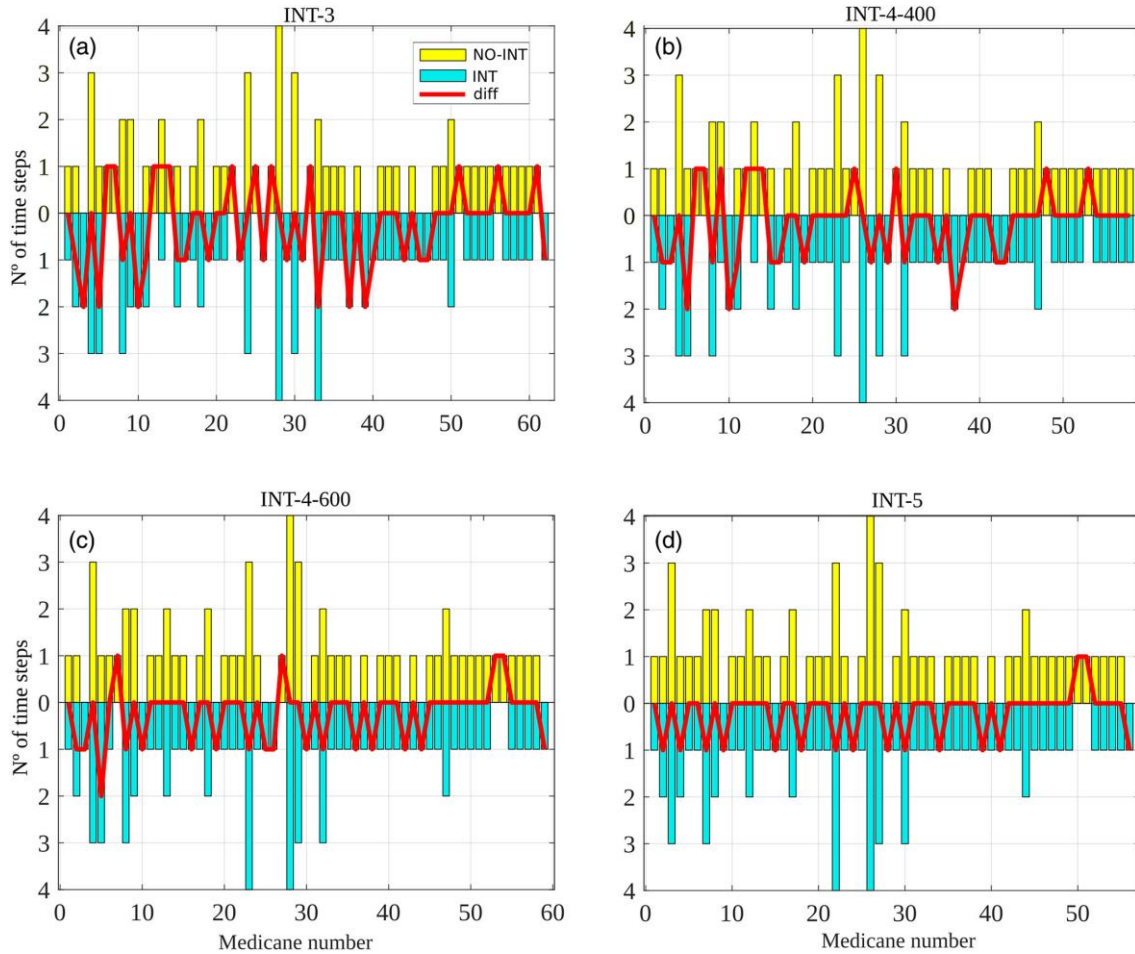


Figure 7.8. Duration (in time steps that is, 1 time step = 6 hr) of the fully tropical phase of each of the individual medicanes (indicated by a cyclone index) reproduced with NO-INT (yellow bars) and the corresponding INT configuration (blue bars) within the 1979–2018 time period. Those cyclones which are found for NO-INT and INT, correspond to the same medicane. Individual medicanes which only appear with INT should be regarded as spurious medicanes. Medicanes which are only found with NO-INT correspond to medicanes that are not captured by INT. Red lines correspond to the difference in duration between a given medicane in NO-INT and INT.

In this context, it is of interest to examine the seasonal pattern of the concurrence, specifically, for winter and fall, in which medicanes are prone to develop. In winter, in line with what has been stated in the previous paragraph, all INT configurations reproduce more medicanes than NO-INT (Figure 7.9). We note that medicanes common to NO-INT and INT tend to last more in the INT cases. In more detail, 11 spurious medicanes develop with INT-3. Also, 2 of the medicanes from NO-INT are not captured by INT-3. With INT-4-400, 1 of the medicanes found with NO-INT is not detected, and 8 spurious medicanes are found.

With both configurations, INT-3 and INT-4-400, differences between NO-INT and the corresponding INT configuration can reach up to two time steps (12 hr). With INT-4-600, 9 spurious medicanes are found but these have a maximum duration of a single time step. With this configuration, one observed medicane is not captured. Differences in the amount of time steps between INT-4-600 and NOINT only attain a value of 2 time steps once. With INT-5 only 6 spurious medicanes have been simulated.

The differences in the duration of medicanes from NO-INT and INT-5 never exceed 1 time step.

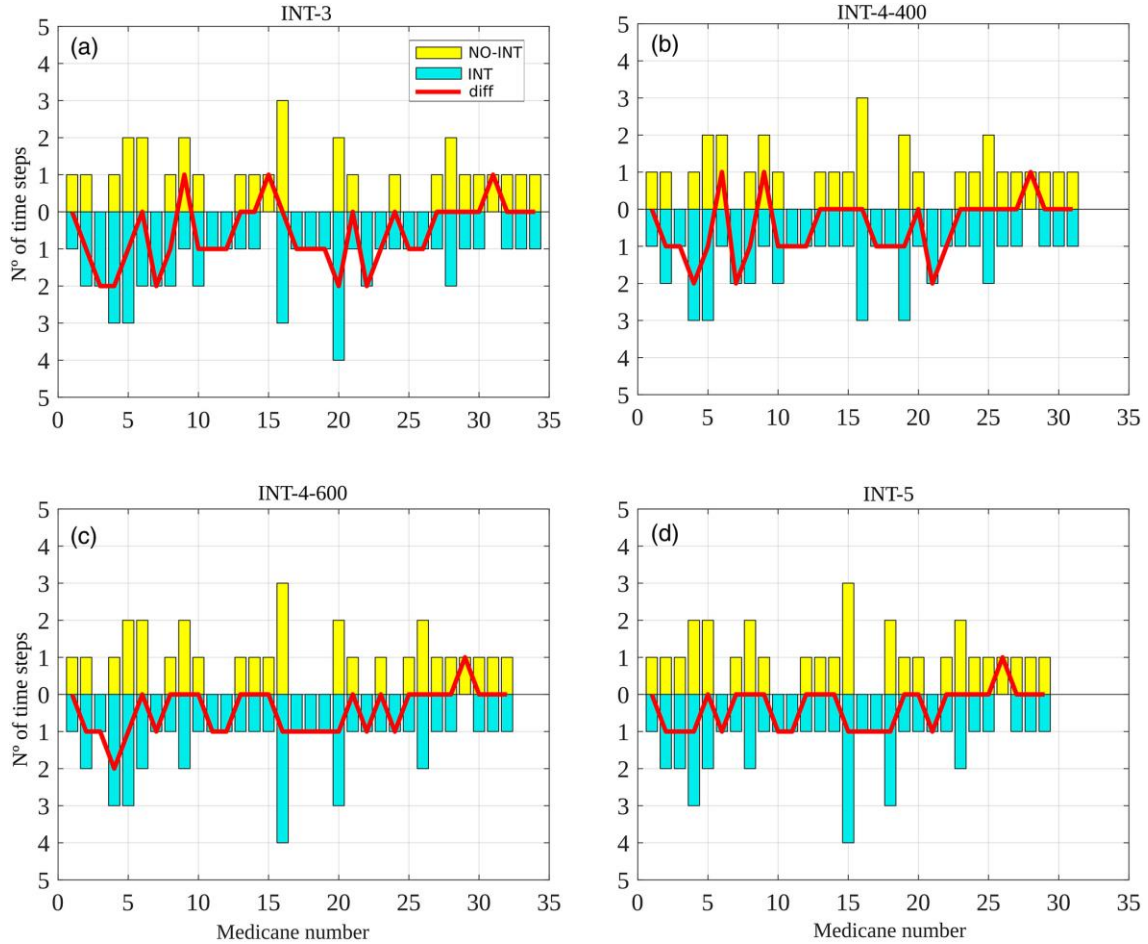


Figure 7.9. As in Figure 7.8, but only for winter.

In fall, less medicanes are reproduced in all INT configurations with respect to NO-INT (Figure 7.10). Interestingly, all medicanes common to NO-INT and the corresponding INT configuration have the same duration. In this season, INT-4-600 and INT-5 provide a representation which is better than that from INT-3 to INT-4-400. With INT-4-600, 3 observed medicanes are not represented and 1 spurious medicane arises. With INT-5, only 1 observed medicane is missing and one false medicane develops. It is important to spell out that none of the spurious medicanes or the reported medicanes that are not captured by the INT configurations have a fully tropical phase longer than one time step.

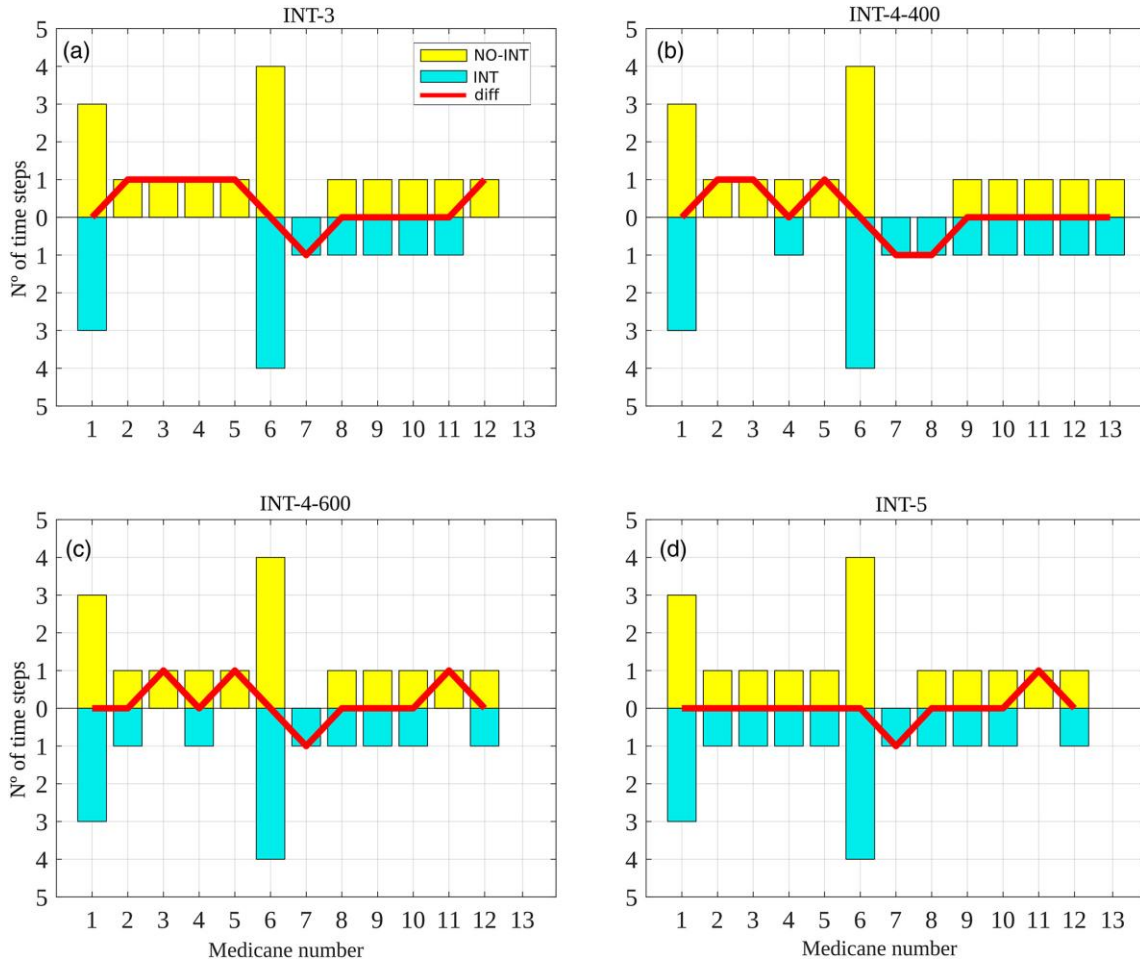


Figure 7.10. As in Figure 7.9, but only for fall

7.3.5 Study cases

Here we show the differences in the results obtained with the NO-INT and the INT configurations for three study cases. We concentrate on results for the calculated CPS, in which -VTL, -VTU and B (i.e., lower- and upper-tropospheric thermal wind parameter and symmetry parameter) are represented. This analysis allows us to gain additional insight into the performance of the different INT configurations with respect to NO-INT. To this end, we select three intense and longlasting medicanes that have been reported in previous studies. We choose medicanes ‘Rolf’ (6–9th November, 2011; Ricchi et al., 2017; Dafis et al., 2018), ‘Celeno’ (14–17th January, 1995; Pytharoulis et al., 1999) and ‘Zorbas’ (27 September–1st October 2018; Stathopoulos et al., 2020). These medicanes present, according to previous data and also in our analysis, a deep warm core over more than 24 hr (as seen in Figure 7.11). The tracking of the medicanes is shown in Figure 7.1S.

7.3.5.1 Medicane Rolf

This medicane occurred from 6th to 9th November, 2011 and affected the Balearic Islands and the south of France. On 6th November, 2011, at the surface, a low pressure system evolved in a baroclinic environment near the Balearic Islands, where the formation of a

convective structure close to the centre of the cyclone occurred. On seventh of November the system acquired tropical characteristics with a symmetric warm core structure and convective bands, which were especially developed on 8th November. On November 9th, Rolf made landfall in the southeast of France. Its weakening was rapid and it quickly lost its structure (see Dafis et al. 2018 for details). In line with this, we observe that NO-INT starts with an asymmetric, deep cold core which evolves into a symmetric, deep warm core cyclone the 7th and 8th of November after briefly going through a shallow warm core phase (Figure 7.11a,b). Focusing on the other configurations we note that, qualitatively, all configurations capture the phases reproduced with NO-INT. In more detail, it can be appreciated that the CPS from INT-3 and INT-4-400 are almost identical (Figure 7.11a,b). In both cases the intensity of the warm core is slightly lower in INT-3 and INT-4-400 than in NO-INT, and the deep cold core phase for these two INT configurations shows also some differences to NO-INT. The other two configurations, INT-4-600 and INT-5 provide a very similar CPS evolution, which is almost identical to that from NO-INT.

7.3.5.2 Medicane Celeno

According to literature, after its formation during the late hours of the 14th January 1995, the low intensifies. During the 15th of January a symmetric, intense cyclone with a warm core is clearly developed to the east of Sicily. The lifetime of this long-lasting medicane was 78 hr according to satellite archives (see more details for example, Tous et al., 2013). We observe that with NO-INT, there is a transition from a deep cold core towards a shallow warm core, and, afterwards, towards a deep warm core (Figure 7.11c,d). The development of a deep warm core on the 15th of January finally evolves into a shallow warm core cyclone. As for Rolf, all the INT configurations capture the same phases as NOINT. Also, in line with that, INT-4-600 and INT-5 are the ones that capture best the intensity and timing of the different phases, while INT-4-400 and INT-3 deviate more from NO-INT.

7.3.5.3 Medicane Zorbas

This storm developed over warm waters in the Eastern Mediterranean Sea during the 27th of September 2018 (Portmann et al., 2020; Stathopoulos et al., 2020). The day after, it gradually intensified and acquired tropical-like characteristics on its way to the NE. The cyclone reached its maximum intensity as it approached, and hit, the SW of Greece on September 29th. Then, it continued to the NE, towards the Aegean, and dissipated over Turkey the day after. We observe that with NO-INT, there is a transition from a deep, cold core towards a shallow warm core (Figure 7.11e,f). This is followed by the development of a deep, symmetric warm core on the 28th of September 2018. As for the previously studied medicanes, all INT configurations are able to reproduce the same phases as NO-INT and INT-4-600 and INT-5 are the configurations in which intensity and timing of the phases are better reproduced. Results from INT-4-400 and INT-3 deviate more from NO-INT.

Results found for the studied medicanes support the selection of INT-4-600 and INT-5 as the configurations providing an adequate representation of the medicanes, which is much better than that from INT-3 and INT-4-400. We can conclude that, as stated in above sections, INT-4-600 allows us for a proper characterization of medicanes with less data than INT-5 (i.e., one geopotential level less).

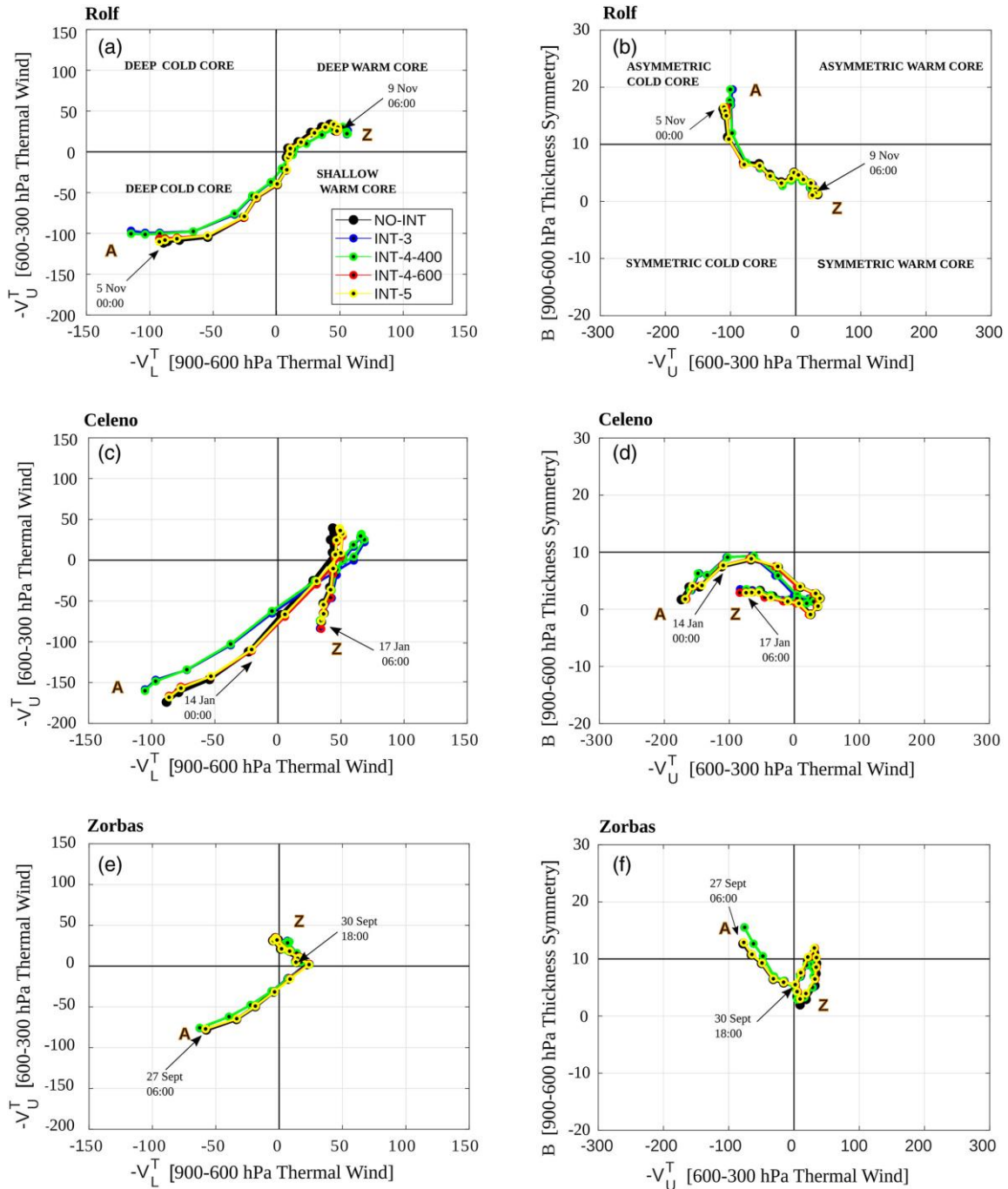


Figure 7.11. First column: CPS parameter diagrams that show $-V_{TL}$ (m) and $-V_{TU}$ (m). Second column: CPS diagrams in which $-V_{TU}$ (m) and B (m) are represented. Medicane Rolf (2011) is shown in a and b, Celeno (1995) in c and d and Zorbas (2018) in e and f. In each panel, a represents the situation at the beginning of the medicane and Z corresponds to the state at its end. The initial and final dates are shown

7.4 Summary and Conclusions

In this work we use data from the high horizontal resolution ERA-5 reanalysis to investigate the effect of reducing the amount of geopotential levels on the characterization of the medicane climatology from 1979 to 2018. Information provided here sheds light on the minimum number of geopotential levels that should be used for the CPS calculation (i.e., stored from climate simulations) in order to attain an adequate representation of the medicane thermal structure. The main findings from this analysis can be summarized as follows:

- A very interesting result that emerges from the climatology is the observed increasing trend of the duration of tropical characteristics during the last decades, which is consistent with the results for future climate projections obtained by the chapter 5 of this thesis.
- All INT configurations reproduce quite well the wind speed distribution from NO-INT. As wind speed increases, the INT configurations tend to provide higher frequencies than NO-INT.
- All INT configurations reproduce well, qualitatively, the seasonal and monthly cycles of the total number of medicanes in the studied time period. They capture a maximum in winter and do not reproduce medicanes in summer. In all INT cases, however, the total number of medicanes is overestimated (underestimated) in winter (fall). INT-3 is the configuration in which winter and fall biases attain a greater magnitude, whilst INT-5 is the one in which biases are smaller. INT-4-400 and INT-4-600 show a similar performance.
- Warm core intensity, determined by the -VTU parameter, is better captured by INT-5. INT-4-400 and INT-4-600 provide better results than INT-3. This highlights that the addition of an additional geopotential level is important to get a good representation of the medicane warm core.
- Regarding the areas of preferential medicane formation, NO-INT captures well the main genesis areas of the Eastern and Western Mediterranean Sea. These are only captured, with a similar medicane formation rate, by INT-5 and INT-4-600. Although the performance of INT-5 is slightly better, these results underline that INT-4-600 is able to provide good results and thus constitutes a good alternative for INT-5.
- With INT-5 and INT-4-600, differences in the duration of the fully tropical phase of each of the individual medicanes relative to NO-INT are smaller than with INT-3 or INT-4-400. Also, spurious medicanes have a shorter duration with INT-4-600 and INT-5. Whilst INT-5 and INT-4-600 are the best options, the lack of concurrence between NO-INT and INT-3 is quite large.

- Regarding the study cases (Rolf, Celeno and Zorbas), all configurations reproduce the main phases described in literature. INT-4-600 and INT-5 provide a very similar CPS evolution, which is almost identical to that depicted from NO-INT. The other two configurations deviate more from the NO-INT results.

We can thus conclude that from all INT configurations tested, INT-5 and INT-4-600 are the ones that provide results closer to those from the full original method (NO-INT). In many cases, however, the performance of INT-5 and INT-4-600 is so similar that we highly recommend the use of INT-4-600 (that is, saving geopotential at 850, 600, 500 and 300 hPa), since this can alleviate the data storage required for the analysis, particularly for long climate simulations where the constraints on model output are larger. In addition to that, INT-3 (using geopotential data only at 850, 500 and 300 hPa) constitutes the configuration which provides more deficient results, and its usage is therefore not recommended.

7.5 Supplementary information

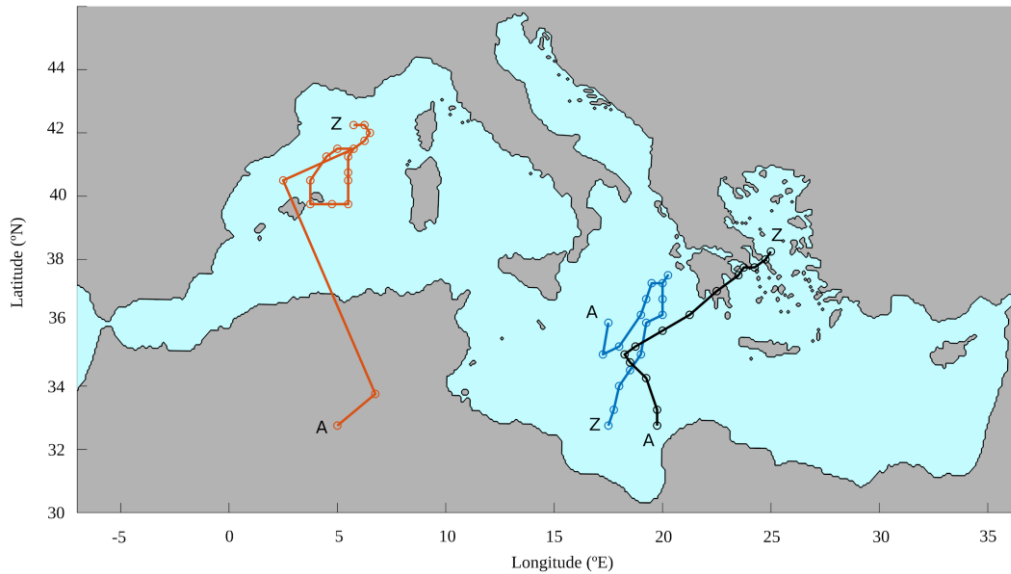


Figure 7.1S. Trajectories of medicanes Rolf (red), Zorbas (black) and Celeno (blue). The initial location of the medicane is indicated with an “A” and its final position with a “Z”.

Table 7.1S. Table of the significance values of the Wilcoxon test for the values of wind and warm core (VTU) between the different interpolated configurations with respect to the non-interpolated configuration.

		INT-3	INT-4-400	INT-4-600	INT-5
P values	Wind	0.546	0.502	0.472	0.586
	Warm core	0.550	0.729	0.220	0.815

Note: We consider that there is statistical significance when the p-value is smaller than the threshold of 0.05.

PARTE IV

DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

8

Discusión, conclusiones y trabajo futuro

Este trabajo partía de una incertidumbre, no resuelta previamente, en cuanto a las proyecciones futuras de ciclones con características tropicales en el Mediterráneo (medicanes). Estas proyecciones, que indicaban una disminución de su frecuencia y un aumento de su intensidad debido al cambio climático, habían sido obtenidas con modelos climáticos sin acoplamiento atmósfera-océano y principalmente regionales. En particular, existía la posibilidad de que el aumento previsto de intensidad estuviera afectado por el hecho de que dichos modelos no pueden reproducir una retroalimentación negativa que limita la intensificación de ciclones: los vientos fuertes provocan una reducción de temperatura superficial del mar por ascenso de agua profunda más fría, y la menor temperatura del mar reduce los flujos de calor desde el mar a la atmósfera que son la principal fuente de energía de estos ciclones, restringiendo su intensidad. Los modelos con acoplamiento atmósfera-océano sí pueden reproducir esta retroalimentación. Por ello, la motivación principal de esta tesis ha sido abordar esta incertidumbre utilizando simulaciones de modelos climáticos acoplados.

Sin embargo, la simulación de ciclones de pequeño tamaño como los medicanes requiere una elevada resolución horizontal. El coste computacional mucho más elevado derivado de incluir el acoplamiento atmósfera-océano en simulaciones de alta resolución espacial ha motivado el desarrollo de técnicas novedosas de acoplamiento. En esta tesis se han utilizado en concreto resultados de modelos con dos aproximaciones distintas de acoplamiento: las simulaciones de un modelo climático global de alta resolución espacial (HiFLOR), que emplea un acoplamiento parcial, y las simulaciones de un modelo climático regional (ROM) con un acoplamiento total, pero espacialmente limitado entre atmósfera y océano.

Por otro lado, se ha abordado otro problema asociado a la gran cantidad de datos que requiere el método del espacio de fases de ciclones, cuya aplicación es necesaria para determinar si un ciclón tiene características tropicales. Los modelos climáticos van incrementando progresivamente su resolución espacial y con ello las necesidades de almacenamiento de datos, por lo que sería muy ventajoso optimizar los requisitos de datos del método CPS de cara a análisis futuros.

Los principales resultados de este trabajo han revelado que el uso de modelos con acoplamiento atmósfera-océano no modifica las características básicas de las proyecciones futuras de medicanes. En particular, sigue obteniéndose un aumento de intensidad futura de estos ciclones. Los datos obtenidos apuntan además a que la inclusión del acoplamiento evita la representación incorrecta de medicanes intensos en los meses de verano. Igualmente, en esta tesis, se ha comprobado que reducir el número de niveles de geopotencial a la hora de optimizar en lo posible un análisis como el del CPS, genera resultados muy parecidos a los del método original, pero con un importante ahorro en la cantidad de datos necesarios.

A lo largo de los tres capítulos de resultados (capítulos 5, 6 y 7) incluidos en esta tesis se investiga la respuesta a preguntas específicas que emergen del problema científico principal. Cada capítulo aborda una cuestión distinta: (1) si el aumento proyectado de la intensidad de medicanes en clima futuro se sigue obteniendo al usar un modelo global de alta resolución con acoplamiento atmósfera-océano parcial, (2) qué impacto tiene el uso de un modelo con acoplamiento atmósfera-océano pleno en las proyecciones de medicanes en clima futuro y (3) cómo se pueden caracterizar de forma fiable los medicanes con el menor número posible de niveles de geopotencial.

Aunque es evidente el marco común para las tres cuestiones enunciadas anteriormente, cada una de ellas es desglosada de manera individual, por lo que las principales conclusiones derivadas de los tres estudios se resumen a continuación de la siguiente manera:

Evaluación del cambio de intensidad de medicanes en clima futuro mediante el uso de un modelo global de alta resolución con acoplamiento atmósfera-océano parcial (HiFLOR):

En el capítulo 5, se utiliza un modelo global parcialmente acoplado de alta resolución espacial bajo el escenario intermedio de emisiones (RCP4.5) del siglo XXI, con el fin de analizar la evolución de los medicanes en clima futuro y ver sus posibles cambios en frecuencia e intensidad. Aunque nuestros resultados se basan en un solo modelo, este es el primer modelo global acoplado con una resolución horizontal de 25 km de malla, que permite reproducir circulaciones en la mesoescala como las de los medicanes. Las cuestiones científicas que se investigan se pueden resumir en las siguientes tres preguntas.

- ¿Es posible encontrar cambios de frecuencia tanto temporal como espacial en clima futuro usando un modelo acoplado?
- ¿Qué cambios en la intensidad de medicanes son esperables en clima futuro si analizamos parámetros como son el viento máximo, la precipitación y la intensidad del núcleo cálido?
- ¿De qué forma podemos cuantificar un posible aumento de la peligrosidad asociada a medicanes en clima futuro?

En líneas generales, los resultados muestran que es esperable una menor frecuencia de medicanes a finales de este siglo, pero no una disminución de los posibles

impactos y peligros asociados. Si bien se espera una disminución notable del número de medicanes, sobre todo a finales de siglo, es probable que este descenso no sea igual en todas las regiones del Mediterráneo. A nivel espacial, se observa que, a finales de siglo, en la zona oeste del Mediterráneo podría producirse una disminución importante del número total de medicanes, mientras que en zonas cercanas al mar Jónico se podría esperar un posible aumento. Esto podría provocar que zonas densamente pobladas cercanas a esta última región se viesen afectadas de una manera más frecuente por medicanes dando lugar a un incremento de los daños asociados al paso de este tipo de ciclones.

En anteriores trabajos de proyecciones de medicanes en clima futuro con modelos desacoplados, se encuentra un aumento futuro de la intensidad máxima de viento. Este resultado también se observa aquí mediante el uso del modelo acoplado HiFLOR, donde no solo se ve un aumento de la intensidad máxima del viento, sino también un incremento de los valores de núcleo cálido y una intensificación de las precipitaciones asociadas a medicanes. El estudio de la precipitación en medicanes es una de las principales novedades de esta tesis, y tiene gran importancia práctica debido a que un incremento de este fenómeno puede acarrear un aumento del riesgo de inundaciones y deslizamientos de tierra asociados al paso de estos ciclones.

Un incremento en los valores de núcleo cálido en altura para clima futuro es un buen indicador de que los medicanes pueden tener características tropicales más robustas a finales de siglo. Una forma de cuantificar el carácter tropical y la posible peligrosidad asociada a estos ciclones es mediante el uso de diagnósticos como son el índice de disipación de potencia o el índice de tropicalidad. El análisis de estos índices muestra un robustecimiento futuro de las características tropicales en medicanes, así como un aumento de su duración y peligrosidad, sobre todo durante los meses de otoño.

Los resultados obtenidos en este estudio han sido realizados con un escenario de emisiones intermedio. Si se realizase este estudio con un escenario de emisiones mayor como es el escenario RCP8.5, quizás se obtendrían cambios mucho más amplificados de las características de los medicanes en el futuro.

Impacto del uso de modelos con acoplamiento atmósfera-océano pleno en proyecciones de clima futuro de medicanes:

Los análisis del capítulo 6 buscan examinar la influencia de un acoplamiento atmósfera-océano pleno en proyecciones de medicanes con respecto a simulaciones realizadas con modelos no acoplados. Para ello, se han comparado los resultados de un modelo regional con acoplamiento atmósfera-océano pleno (ROM), con los de su componente atmosférica forzada por condiciones oceánicas prescritas (REMO). De manera concreta, en este capítulo buscamos responder a las siguientes cuatro preguntas:

- ¿Hay diferencias significativas entre los dos tipos de simulaciones en clima presente (1950-2000)?

- ¿Qué cambios son esperables en cuanto a la frecuencia de medicanes en condiciones de cambio climático para las simulaciones tanto acopladas como no acopladas?
- ¿Son esperables distintos cambios futuros de intensidad al emplear un modelo acoplado en comparación con otro que no lo es?
- ¿Depende la estacionalidad de los medicanes de los efectos del acoplamiento?
¿Los modelos acoplados simulan también ciclones intensos irreales en verano?

En general, el modelo acoplado ROM es capaz de captar bien la frecuencia de medicanes si se comparan con climatologías realizadas anteriormente (p. ej., Miglietta et al., 2013; Cavicchia et al., 2014a;). Por otro lado, si se comparan los valores de frecuencia e intensidad de medicanes en clima presente entre las dos simulaciones (acoplada vs no acoplada), no se encuentran diferencias significativas ni en frecuencia ni en intensidad, aunque el modelo no acoplado simula mayor frecuencia e intensidad de medicanes durante ese periodo de tiempo.

A la hora de analizar medicanes en clima futuro, se puede apreciar que la frecuencia de estos ciclones experimentará un descenso significativo, tanto en la simulación acoplada como en la no acoplada. Las causas de esta disminución pueden ser, por un lado, una reducción del número de ciclones totales en la zona del Mediterráneo, al tiempo que, por otro lado, se producirá un aumento de la estabilidad atmosférica.

Las diferencias más importantes en proyecciones climáticas de medicanes, con respecto al uso de modelos acoplados y no acoplados, se encuentran en el estudio de su intensidad. La simulación acoplada de alta resolución muestra un aumento de la intensidad de viento relativa en clima futuro, que ésta correlacionado con un aumento de las características tropicales de estos ciclones, mientras que la simulación no acoplada no muestra una tendencia clara de cambios en intensidad.

Se observa un descenso del número de medicanes en la mayoría de las estaciones, y este descenso es más pronunciado en el caso de la simulación acoplada sobre todo en los meses de invierno y otoño. El uso de modelos acoplados influye a la hora de evitar que se produzca una simulación no realista de medicanes intensos en los meses de verano. En este capítulo, se observa que el modelo no acoplado simula medicanes bastante intensos en dicha estación, a diferencia del modelo acoplado que no lo hace. Una causa plausible de esta diferencia puede ser que el modelo acoplado sea capaz de simular la retroalimentación negativa que ocurre entre episodios de viento intenso y la capa de mezcla del mar, muy poco profunda durante los meses de verano. En el hipotético caso de que se produjera un evento de fuertes vientos, como puede ocurrir por el desarrollo de un ciclón intenso, esto daría lugar a un afloramiento de agua fría desde las profundidades del mar, provocando un enfriamiento de la superficie. En este caso este descenso de temperatura superficial del mar podría desencadenar condiciones menos favorables para el desarrollo de convección y posterior evolución de características tropicales en ciclones. Aunque esto constituye una explicación razonable de la ausencia de medicanes intensos en verano en la simulación acoplada, no se pueden excluir de momento otras

explicaciones como que estas diferencias entre la simulación acoplada y la no acoplada sean debidas a la variabilidad interna de los modelos, que puede provocar diferencias apreciables entre simulaciones no asociadas a ninguna diferencia de configuración física del modelo.

Por tanto, el uso de este modelos climático con acoplamiento atmósfera-océano pleno refuerza los resultados obtenidos anteriormente con simulaciones no acopladas en cuanto a proyecciones futuras de medicanes. El resultado de este capítulo se encuentra muy conectado con las conclusiones obtenidas en el capítulo 5, donde también se observa una disminución del número de medicanes, pero un aumento de su intensidad en clima futuro.

Caracterización de medicanes con el menor número posible de niveles de geopotencial

Un problema del método original del CPS, que se aplica para determinar si un ciclón se puede clasificar como medicane, es que requiere datos de geopotencial en muchos niveles verticales de los modelos. Si se une esto al incremento progresivo de la resolución horizontal de los modelos, se produciría un aumento muy grande de la cantidad de datos requeridos para analizar la estructura de los ciclones.

En base a lo mencionado anteriormente, en el capítulo 7 se realiza una investigación sobre el efecto de reducir la cantidad de niveles de geopotencial en la caracterización de ciclones mediante el uso del método de espacio de fases de ciclones, con el fin de intentar reducir la cantidad de datos necesarios. Aparte de esta novedad, este trabajo es uno de los primeros en usar los datos de reanálisis de alta resolución de ERA5 para analizar medicanes. Este reanálisis permite la identificación de medicanes debido a que tiene una resolución horizontal elevada de 0.25°.

Con el fin de reducir los niveles de geopotencial, se usa un método de interpolación lineal entre niveles disponibles. Las configuraciones de estudio que se utilizan en este trabajo son: configuración original o no interpolada del método CPS (13 niveles de geopotencial cada 50 hPa desde 300 a 900 hPa), configuración interpolada de tres niveles (INT3; 300-500-850 hPa), configuración interpolada de cuatro niveles añadiendo a los tres anteriores el nivel de 400 hPa (INT4-400; 300-400-500-850 hPa), o añadiendo el nivel de 600 hPa (INT4-600; 300-500-600-850 hPa) y configuración interpolada de cinco niveles (INT5; 300-400-500-600-850 hPa). Las principales cuestiones de este análisis pueden resumirse de la siguiente manera:

- ¿es capaz el reanálisis de ERA5 de simular de manera correcta la frecuencia y carácter tropical de los medicanes en clima actual comparándolo con otros estudios climatológicos?
- ¿existen diferencias significativas entre las distintas configuraciones de niveles del método CPS con respecto a la frecuencia e intensidad de medicanes? ¿Son capaces de simular bien casos concretos de medicanes?
- ¿cuál de las configuraciones interpoladas es más adecuada para la simulación de medicanes?

Como se ha comentado anteriormente, el reanálisis ERA5 puede permitir captar medicanes debido a su alta resolución horizontal. La frecuencia de medicanes obtenida con estos datos muestran valores cercanos a los obtenidos en otras climatologías (p. ej. Cavicchia et al., 2014; Miglietta et al., 2013; Zhang et al., 2021). Además de reproducir bien su frecuencia media, este estudio ha permitido encontrar un aumento de las características tropicales en este tipo de ciclones en los últimos años. Este resultado se encuentra en concordancia con los resultados obtenidos en los trabajos 5 y 6 de esta tesis, cuyas proyecciones en clima futuro muestran medicanes más intensos y duraderos.

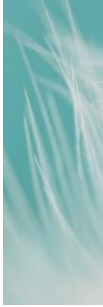
En cuanto al estudio de validación de configuraciones interpoladas con respecto a la configuración original del método del CPS, se obtiene que no hay diferencias significativas en la representación de la frecuencia anual y mensual entre las distintas configuraciones. Aun así, se observa que las configuraciones interpoladas presentan una sobreestimación del número de medicanes durante los meses de invierno y una subestimación en otoño. No obstante, este sesgo es mucho menor al usar la configuración de cinco niveles de geopotencial (INT-5), que al solo usar tres niveles (INT-3). Por otro lado, cabe destacar que las dos configuraciones de cuatro niveles (INT-4-400 e INT-4-600), muestran valores cercanos a los obtenidos en INT-5.

La intensidad de medicanes para este trabajo ha sido estudiada a partir de la velocidad máxima del viento y la intensidad del núcleo cálido en altura (-VTU) en cada ciclón. Para ambas variables, los resultados muestran que usar la configuración de tres niveles de geopotencial (INT-3) proporciona resultados más alejados respecto a la configuración no interpolada. Sin embargo, usar un nivel adicional de geopotencial (INT-4), mejora bastante los resultados obtenidos y además no hay diferencias significativas en comparación con usar otro nivel más (INT-5). Resultados parecidos se obtienen al estudiar las áreas preferentes de formación de medicanes, donde se observa que las configuraciones de cinco niveles (INT-5) y cuatro niveles incluyendo el nivel de 600 hPa (INT-4-600) simulan la frecuencia espacial de manera más cercana a la configuración no interpolada (NO-INT). Por último, al analizar valores del método CPS para casos de medicanes concretos como son Rolf, Celeno y Zorbas, se observa que las configuraciones interpoladas no presentan diferencias significativas con respecto al método original, aunque los mejores resultados se alcanzan con las configuraciones de INT-5 e INT-4-600.

A la luz de los resultados obtenidos en el capítulo 7, se puede afirmar que las dos configuraciones que mejor resultado han obtenido con respecto a la configuración original del método del CPS (NO-INT), son las configuraciones INT-5 e INT-4-600. En muchos casos, sin embargo, el rendimiento de INT-5 e INT-4-600 es tan similar que se puede recomendar usar INT-4-600, es decir, utilizar solo los datos de geopotencial en los niveles de 850, 600, 500 y 300 hPa. Con esta reducción, se puede reducir el almacenamiento de datos requeridos para el análisis, particularmente para simulaciones climáticas largas de alta resolución espacial.

Esta tesis comprende un conjunto de estudios que tratan problemas relacionados con la simulación de medicanes en clima futuro mediante el uso de modelos acoplados atmósfera-océano, así como la implementación de optimizaciones en el método de

análisis que ayuden a reducir costes computacionales. El acercamiento a estos problemas en cada uno de los capítulos sienta las bases para la elaboración de estudios futuros. Una cuestión abierta es el análisis del posible impacto de la variabilidad interna de los modelos climáticos en la simulación de medicanes. Este análisis permitiría comprobar si las mejoras en la reproducción de medicanes en verano halladas aquí para los modelos acoplados están asociadas efectivamente al acoplamiento atmósfera-océano, y no a dicha variabilidad interna. Por otro lado, aunque aquí se han utilizado resultados de dos modelos climáticos, queda por abordar de forma más completa la incertidumbre asociada a la formulación de los modelos, mediante el análisis de resultados de conjuntos grandes de modelos acoplados atmósfera-océano. La optimización de niveles de geopotencial para el método CPS, podría facilitar claramente el análisis de medicanes para abordar dichas cuestiones. Este método optimizado facilitaría además el uso de modelos acoplados tanto regionales como globales con una mayor resolución horizontal (<25 km), incluyendo aquellos modelos que permiten resolver explícitamente los procesos de convección con una resolución de pocos kilómetros, cuyos resultados serían especialmente interesantes para analizar ciclones con características tropicales como los medicanes.



Discussions, conclusions and future work

This doctoral thesis was based on a previously unresolved uncertainty concerning future projections of cyclones with tropical characteristics in the Mediterranean (medicane). These projections indicated a decrease in the medicane frequency and an increase in their intensity due to climate change. They had been obtained with climate models without atmosphere-ocean coupling and mainly with a regional, limited area domain. In particular, there was the possibility that the predicted increase in intensity was affected by the fact that uncoupled models cannot reproduce the negative feedback that limits cyclone intensification. This feedback is related to the fact that strong winds cause a reduction in the sea surface temperature due to the upward flux of colder deep water. As the sea surface temperature drops, the heat fluxes from the sea to the atmosphere, which are the main source of energy for this kind of cyclones, are reduced, restricting the wind intensity. Models with atmosphere-ocean coupling can indeed reproduce this feedback. Therefore, the main motivation of this work has been to study this uncertainty using simulations of coupled and global climate models.

Nonetheless, the simulation of small cyclones such as medicanes requires a high horizontal resolution. The high computational cost derived from including the atmosphere-ocean coupling in high spatial resolution simulations has motivated the development of novel coupling techniques. In this thesis, on the one hand, results from models with two different coupling approaches have been specifically used: simulations of a global climate model with high spatial resolution (HiFLOR), which employs a partial coupling, and simulations of a regional climate model with a full coupling (ROM), but spatially limited between the grids of atmosphere and ocean.

On the other hand, this thesis has addressed another problem associated with the large amount of data required by the cyclone phase space method, whose application is necessary to determine if cyclones have tropical characteristics. In recent years, climate models have progressively increased their spatial resolution and, thus, their data storage needs, so it would be very advantageous to optimize the data requirements of the CPS method for future analyses.

The main results of this work have revealed that the use of models with atmosphere-ocean coupling does not modify the basic characteristics of the future projections of medicanes; the coupled models used also obtained an increase in the future intensity of these cyclones. The data obtained also indicate that the inclusion of the coupling in climate models avoids the incorrect representation of intense medicanes in summer months.

Likewise, in this thesis, it has been verified that reducing the number of geopotential levels effectively optimizes the analysis of the CPS method. The results obtained with the interpolated method generate results very similar to the original method, but with a significant saving in the amount of data required.

Throughout the three chapters of results (chapters 5, 6 and 7) included in this thesis, the answers to specific questions that emerge from the main scientific problem are investigated. Each chapter addresses a different issue: (1) whether the projected increase in medicane intensity in future climate is still obtained using a high-resolution global model with partial atmosphere-ocean coupling, (2) what is the impact of using a full ocean-atmosphere coupling model in future climate medicane projections? and (3) how to reliably characterize medicanes with the fewest possible number of geopotential levels.

Although the common framework for the three issues stated above is evident, each of them is broken down individually, so the main conclusions derived from the three studies are summarized below as follows:

Evaluation of the intensity change of medicanes in future climate using a global high-resolution model with partial atmosphere-ocean coupling (HiFLOR):

In chapter 5, a partially coupled global model with high spatial resolution is used under an intermediate emission scenario (RCP4.5) for rest of the 21st century, in order to analyse the evolution of medicanes in future climate and see their possible changes in frequency and intensity. Although our results are based on a single model, this is the first global coupled model with a horizontal resolution of 25 km grid, which could potentially reproduce mesoscale circulation that occurs in medicanes. The scientific questions investigated can be summarized in the following three questions.

- Is it possible to find changes for both temporal and spatial frequency in future climate using a coupled model?
- What changes in the intensity of medicanes are expected in the future climate if we analyse parameters such as the maximum wind, precipitation, or the intensity of the warm core?
- How can we quantify a possible increase in the risk associated with medicanes in future climate?

In general terms, the results show that a lower frequency of medicanes is expected by the end of this century, but not a decrease in the possible impacts and associated risks. Although a notable decline in the number of medicanes is expected, especially by the end of the century, it is likely that this decrease will not be the same in all Mediterranean regions. Spatially, it is observed that, by the end of the century, a significant reduction in the total number of medicanes could occur in the western Mediterranean, while in areas near the Ionian Sea a possible increase could be expected. This rise could mean that densely populated areas near the Ionian Sea could be affected more frequently by medicanes. Therefore, an increment in the damage associated with the passage of this type of cyclone is expected.

In previous works of medicane projections in future climate with uncoupled models, an increase in the maximum intensity of wind is found. This result is also observed using the HiFLOR coupled model, where not only an increase in the maximum wind intensity is seen, but also an increase in the values of the CPS (VTU) which are related to the robustness of the warm core and an intensification of precipitation associated with medicanes. The study of precipitation in medicanes is one of the main novelties of this thesis. This result is very important because an increment in medicane precipitation may have an increased risk of flooding and landslides associated with the passage of these cyclones.

An increment in the intensity of the warm core at upper levels (VTU) for future climate is a good indicator that medicanes could have more robust tropical characteristics by the end of the century. One way to quantify the tropical character and the possible danger associated with these cyclones is using diagnostic techniques such as the power dissipation index or the tropicality index. The analysis of these indices shows a future strengthening of the tropical characteristics of the medicanes, as well as an increase in their duration and destructiveness, especially during the autumn months.

The results obtained in this study have been performed with an intermediate emissions scenario. If a higher emission scenario had been used, such as the RCP8.5 scenario, perhaps the results obtained would have been more amplified, obtaining medicanes with an increase in their worrying characteristics in the future.

Impact of the use of models with full atmosphere-ocean coupling in future climate projections of medicanes:

The results of chapter 6 try to examine the influence of a full atmosphere-ocean coupling in the projections of medicanes with respect to simulations performed with uncoupled models. To do this, a comparison has been made between the results obtained from a regional model with full atmosphere-ocean coupling (ROM), with respect to its atmospheric component forced by prescribed ocean conditions (REMO). Specifically, in this chapter we seek to answer the following four questions:

- Are there significant differences between the two types of simulations in present climate (1950-2000)?
- What changes are expected in terms of medicane frequency under anthropogenic climate change conditions for both coupled and uncoupled runs?
- Are different future changes in intensity to be expected when using a coupled model compared to an uncoupled model?
- Does the seasonality of the medicanes depend on the effects of coupling? Do coupled models also simulate unreal intense cyclones in summer?

In general, the ROM coupled model is able to represent well the observed medicane frequency when compared to previous climatologies (e. g., Miglietta et al., 2013; Cavicchia et al., 2014a). Secondly, if the values of frequency and intensity medicanes in present climate are compared between the two simulations (coupled vs.

uncoupled), no significant differences are found in either frequency or intensity, although the uncoupled model simulates higher frequency and intensity in medicanes.

When analysing medicanes in future climate, it can be observed that the frequency of these cyclones will have a significant decrease, both in the coupled and in the uncoupled run. The causes for this reduction may be, on the one hand, a decrease in the number of total cyclones in the Mediterranean zone, and on the other hand, an expected increase in atmospheric stability.

The most important differences in climate projections of medicanes, with respect to the use of coupled and uncoupled models, are found in the study of their intensity. The high-resolution coupled run shows an increase in wind intensity in future climate, which is correlated with an increase in the tropical characteristics of medicanes, while the uncoupled run does not show a clear trend of changes in intensity.

A decrease in the number of medicanes is observed in most of the seasons, and this decline is more pronounced in the case of the coupled simulation, especially in the winter and autumn months. The use of coupled models favourably avoids unrealistic simulation of intense medicanes in summer months. In this chapter, it is observed that the uncoupled model simulates quite intense medicanes in that season, unlike the coupled model. A plausible reason for this difference may be in the fact that the coupled model is able to simulate the negative feedback that occurs for episodes of intense wind due to a very shallow mixed layer of the sea during the summer months. In the hypothetical case of an event of strong winds, for example during the development of an intense cyclone, this would lead to an upwelling of cold water from the depths of the sea, causing a cooling of the surface. In this case, this decrease in sea surface temperatures could trigger less favourable conditions for the development of convection and the subsequent evolution of tropical characteristics in cyclones. Although this may be a reasonable explanation for the absence of intense summer medicanes in the coupled simulation, other explanations cannot be excluded. Another possible explanation could be that the differences between the coupled and the uncoupled simulation are due to the internal variability of the models, which can cause appreciable differences between simulations, not associated with any difference in the physical configuration of the model.

Consequently, the use of ROM model with full atmosphere-ocean coupling reinforces the results obtained previously with uncoupled simulations in terms of future projections of medicanes. The result of this chapter is closely connected with the conclusions obtained in chapter 5, where a decrease in the number of medicanes is also observed, but an increase in their intensity in future climate.

Characterization of medicanes with the lowest possible number of geopotential levels

A problem with the original cyclone phase space (CPS) method, which is applied to help to determine whether a cyclone can be classified as a medicane or not, is that it requires geopotential data at many vertical levels in the models. This problem becomes more important considering the progressive increase in the horizontal resolution of the models,

as there would be a very large increase in the amount of data required to analyse the structure of the cyclones.

Based on the aforementioned, in chapter 7, an investigation is performed on the effect of reducing the number of geopotential levels in the characterization of cyclones through the use of the CPS method, in order to try to reduce the amount of data needed. Apart from this novelty, this work is one of the first to use ERA5 high-resolution reanalysis data to analyse medicanes. This reanalysis allows the identification of most of the medicanes because it has a (high) horizontal resolution of 0.25° .

A linear interpolation method between available levels is used. The configurations used to explore in this work are: original or non-interpolated configuration of the CPS method (13 geopotential levels every 50 hPa from 300 to 900 hPa), interpolated configuration of three levels (INT3; 300-500-850 hPa), four-level interpolated configuration adding the 400 hPa level (INT4-400; 300-400-500-850 hPa) to the previous three, or adding the 600 hPa level (INT4-600; 300-500-600-850 hPa) and five-level interpolated settings (INT5; 300-400-500-600-850 hPa). The main issues of this analysis can be summarized as follows:

- Does ERA5 reanalysis have the capacity to correctly simulate the frequency and tropical nature of medicanes in the current climate compared to other climatological studies?
- Are there significant differences between the different configurations of the CPS method with respect to the frequency and intensity of medicanes? Are they capable of correctly simulating specific cases of medicanes?
- Which interpolated configuration is more suitable for the simulation of medicanes?

As discussed above, the ERA5 reanalysis can simulate medicanes due to its high horizontal resolution. The frequency of medicanes obtained with this reanalysis show values close to data obtained in other climatologies (e.g. Miglietta et al., 2013; Cavicchia et al., 2014a; Zhang et al., 2021). In addition to reproducing their average frequency well, this study has revealed an increase in tropical characteristics in this type of cyclone in recent years. This result is in agreement with the results obtained in works 5 and 6 of this thesis, whose projections in future climate show more intense and long-lasting medicanes.

Regarding the validation study of interpolated configurations with respect to the original configuration of the CPS method it is obtained that there are no significant differences in the annual and monthly frequency between the different configurations. Nonetheless, it is observed that the interpolated configurations show an overestimation of the number of medicanes during the winter months and an underestimation in autumn. However, on the one hand, this bias is much smaller when using the five geopotential levels setting (INT-5), than just using three levels (INT-3). On the other hand, it should be noted that the two four-level configurations (INT-4-400 and INT-4-600) show values close to those obtained in INT-5.

The medicane intensity for this work has been studied from the maximum wind speed and the intensity of the warm core in height (-VTU) in each cyclone. For both variables, the results show that the configuration of three geopotential levels (INT-3) deviates the most from the non-interpolated configuration. However, when using an additional level of geopotential (INT-4), an improvement in the results obtained is observed and moreover, there are no significant differences compared to using another level (INT-5). Similar results are obtained when studying the preferred areas of medicane formation, where it is observed that the configurations of five levels (INT-5) and four levels including the level of 600 hPa (INT-4-600) similarly simulate the spatial frequency with respect to the non-interpolated configuration (NO-INT). Finally, when analysing values of the CPS method for specific cases of medicanes such as Rolf, Celeno and Zorbas, it is observed that the interpolated configurations do not have significant differences with respect to the original method, although the best results are achieved with the INT- 5 and INT-4-600.

Based on the results obtained in chapter 7, it can be concluded that the two configurations that have obtained the best result with respect to the original configuration of the CPS method (NO-INT) are the INT-5 and INT-4-600 configurations. In many cases, however, the performance of INT-5 and INT-4-600 is so similar that it can be recommended to use INT-4-600, that is, to use only the geopotential data at the 850, 600, 500 and 300hPa. With this reduction, the data storage required for analysis can be smaller, particularly for high spatial resolution climate simulations.

This thesis includes a set of works that study problems related to the simulation of medicanes in future climate through the use of coupled atmosphere-ocean models, as well as the reduction of computational costs through the implementation of optimizations in the CPS method. The approach to these problems in each one of the chapters can be a motivation for the elaboration of future studies. An open question is the analysis of the possible impact of the internal variability of climate models on the simulation of medicanes. This analysis would allow us to verify if the improvements in the reproduction of medicanes in summer found in this work for the coupled models are effectively associated with the atmosphere-ocean coupling, and not with internal variability. Furthermore, although the results of the two climate models have been used, it would be important to focus the work more on the uncertainty associated with the formulation of the models. For this, it would be important to perform a climate model ensemble analysis with as many coupled models as possible. Optimizing geopotential levels for the CPS method could clearly facilitate medicane analysis to address the above-mentioned issues. This optimized method would also facilitate the use of both regional and global coupled models with a higher horizontal resolution (<25 km), including those models that allow the explicit resolution of convection processes which need a resolution of a few kilometres. These advances in these very high-resolution models would be especially interesting for analysing cyclones with tropical characteristics such as medicanes.



Bibliografía

- Akhtar, N., Brauch, J., Dobler, A., Béranger, K., & Ahrens, B. (2014). Medicanes in an ocean-atmosphere coupled regional climate model. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(8), 2189–2201. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-2189-2014>
- Allan, R. P., Hawkins, E., Bellouin, N., & Collins, B. (2021). *IPCC, 2021: Summary for Policymakers*.
- Alpert, P., & Neeman, B. U. (2016). *Tellus A : Dynamic Meteorology and Oceanography Climatological analysis of Mediterranean cyclones using ECMWF data. 0870*. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v42i1.11860>
- Alpert, P., Neeman, B. U., & Shay-El, Y. (1990). Climatological analysis of Mediterranean cyclones using ECMWF data. *Tellus, Series A*, 42 A(1), 65–77. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v42i1.11860>
- Alpert, P., & Ziv, B. (1989). The Sharav Cyclone: observations and some theoretical considerations. *Journal of Geophysical Research*, 94(D15). <https://doi.org/10.1029/jd094id15p18495>
- Anagnostopoulou, C., Tolika, K., Flocas, H., & Maheras, P. (2006). Cyclones in the Mediterranean region: present and future climate scenarios derived from a general circulation model (HadAM3P). In *Advances in Geosciences* (Vol. 7).
- Arakawa, A., & Lamb, V. R. (1977). Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. *General Circulation Models of the Atmosphere*, 17(Supplement C), 173–265.
- Baatsen, M., Haarsma, R. J., van Delden, A. J., & de Vries, H. (2015). Severe autumn storms in future western Europe with a warmer Atlantic Ocean. *Climate Dynamics*, 45(3), 949–964.
- Bakkensen, L. A. (2017). Mediterranean Hurricanes and Associated Damage Estimates. *Journal of Extreme Events*, 04(02), 1750008. <https://doi.org/10.1142/s2345737617500087>
- Bartholy, J., Pongrácz, R., & Pattantyús-Ábrahám, M. (2009). Analyzing the genesis, intensity, and tracks of western Mediterranean cyclones. *Theoretical and Applied Climatology*, 96(1–2), 133–144. <https://doi.org/10.1007/s00704-008-0082-9>

- Bengtsson, L., Arkin, P., Berrisford, P., Bougeault, P., Folland, C. K., Gordon, C., Haines, K., Hodges, K. I., Jones, P., Kallberg, P., Rayner, N., Simmons, A. J., Stammer, D., Thorne, P. W., Uppala, S., & Vose, R. (2007). The need for a dynamical climate reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(4), 495–501. <https://doi.org/10.1175/BAMS-88-4-495>
- Berthou, S., Mailler, S., Drobinski, P., Arsouze, T., Bastin, S., Béranger, K., Lebeau-pin-brossier, C., Berthou, S., Mailler, S., Drobinski, P., & Arsouze, T. (2016). *Tellus A : Dynamic Meteorology and Oceanography Prior history of Mistral and Tramontane winds modulates heavy precipitation events in southern France Prior history of Mistral and Tramontane winds modulates heavy precipitation events in southern France*. 0870.
- Beven, J. L. (1997). *A study of three “hybrid” storms*.
- Bhatia, K., Vecchi, G., Murakami, H., Underwood, S., & Kossin, J. (2018). Projected response of tropical cyclone intensity and intensification in a global climate model. *Journal of Climate*, 31(20), 8281–8303. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0898.1>
- Binder, H., Boettcher, M., Joos, H., & Wernli, H. (2016). The role of warm conveyor belts for the intensification of extratropical cyclones in Northern Hemisphere winter. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 73(10), 3997–4020. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-15-0302.1>
- Bjerknes, J. (1951). Extratropical cyclones. In *Compendium of Meteorology* (pp. 577–598). Springer.
- Bjerknes, J., & Solberg, H. (1922). *Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation*. (Vol. 3, pp. 1–18).
- Bristol, H., Paul, J., Marcus, P. S., Catherine, D., Jonathan, J., Peter, O., Alan, T., Natalie, S., Dan, J., Louise, M., William, H. G., Emma, J., & Gregory, J. L. (2017). *The BRIDGE HadCM3 family of climate models* : <https://doi.org/10.5194/gmd-10-3715-2017>
- Buzzi, A., & Tibaldi, S. (1978). Cyclogenesis in the lee of the Alps: A case study. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 104(440), 271–287. <https://doi.org/10.1002/qj.49710444004>
- Cabos, W., Sein, D. v., Pinto, J. G., Fink, A. H., Koldunov, N. v., Alvarez, F., Izquierdo, A., Keenlyside, N., & Jacob, D. (2017). The South Atlantic Anticyclone as a key player for the representation of the tropical Atlantic climate in coupled climate models. *Climate Dynamics*, 48(11–12), 4051–4069. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3319-9>
- Campins, J., Genovés, A., Picornell, M. A., & Jansà, A. (2011). Climatology of Mediterranean cyclones using the ERA-40 dataset. *International Journal of Climatology*, 31(11), 1596–1614. <https://doi.org/10.1002/joc.2183>
- Carlson, T. N. (1980). Airflow through midlatitude cyclones and the comma cloud pattern. *Monthly Weather Review*, 108(10), 1498–1509.

- Carrió, D. S., Homar, V., Jansa, A., Romero, R., & Picornell, M. A. (2017). Tropicalization process of the 7 November 2014 Mediterranean cyclone: Numerical sensitivity study. *Atmospheric Research*, *197*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.07.018>
- Cavaleri, L., Bajo, M., Barbariol, F., Bastianini, M., Benetazzo, A., Bertotti, L., Chiggiato, J., Ferrarin, C., Trincardi, F., & Umgiesser, G. (2020). The 2019 Flooding of Venice. *Oceanography*, *33*(1), 42–49.
- Cavicchia, L., & von Storch, H. (2012). The simulation of medicanes in a high-resolution regional climate model. *Climate Dynamics*, *39*(9–10), 2273–2290. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1220-0>
- Cavicchia, L., von Storch, H., & Gualdi, S. (2014a). A long-term climatology of medicanes. *Climate Dynamics*, *43*(5–6), 1183–1195. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1893-7>
- Cavicchia, L., von Storch, H., & Gualdi, S. (2014b). Mediterranean tropical-like cyclones in present and future climate. *Journal of Climate*, *27*(19), 7493–7501. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00339.1>
- Chaboureaud, J., Pantillon, F., Lambert, D., & Claud, C. (2012). Tropical transition of a Mediterranean storm by jet crossing. *April*, 596–611. <https://doi.org/10.1002/qj.960>
- Charney, J. G., & Eliassen, A. (1964). On the growth of the hurricane depression. *Journal of Atmospheric Sciences*, *21*(1), 68–75.
- Claud, C., Alammoud, B., Funatsu, B. M., & Chaboureaud, J. P. (2010). Mediterranean hurricanes: Large-scale environment and convective and precipitating areas from satellite microwave observations. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *10*(10), 2199–2213. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-2199-2010>
- Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, W. J., Johns, T., & Krinner, G. (2013). Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility. In *Climate change 2013-The physical science basis: Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (pp. 1029–1136). Cambridge University Press.
- Cramer, W., Guiot, J., Marini, K., Secretariat, M., & Bleu, P. (2020). Climate and environmental change in the Mediterranean Basin—current situation and risks for the future. *First Mediterranean Assessment Report. Union for the Mediterranean, Plan Bleu, UNEP/MAP*.
- Dacre, H. F., & Gray, S. L. (2009). The spatial distribution and evolution characteristics of North Atlantic cyclones. *Monthly Weather Review*, *137*(1), 99–115. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2491.1>
- Dafis, S., Rysman, J., & Flaounas, E. (2018). Remote sensing of deep convection within a tropical-like cyclone over the Mediterranean Sea. *January*, 1–7. <https://doi.org/10.1002/asl.823>

- Davis, C. A., & Bosart, L. F. (2004). The TT problem: Forecasting the tropical transition of cyclones. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(11), 1657–1662.
- Davolio, S., Miglietta, M. M., Moscatello, A., Pacifico, F., Buzzi, A., & Rotunno, R. (2009). Natural Hazards and Earth System Sciences Numerical forecast and analysis of a tropical-like cyclone in the Ionian Sea. In *Hazards Earth Syst. Sci* (Vol. 9). www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/551/2009/
- de La Torre, L., Nieto, R., Noguerol, M., Añel, J. A., & Gimeno, L. (2008). A climatology based on reanalysis of baroclinic developmental regions in the extratropical Northern Hemisphere. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1146(1), 235–255.
- de Zolt, S., Lionello, P., Nuhu, A., & Tomasin, A. (2006). Natural Hazards and Earth System Sciences The disastrous storm of 4 November 1966 on Italy. In *Hazards Earth Syst. Sci* (Vol. 6). www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/6/861/2006/
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., ... Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
- Delworth, T. L., Broccoli, A. J., Rosati, A., Stouffer, R. J., Balaji, V., Beesley, J. A., Cooke, W. F., Dixon, K. W., Dunne, J., & Dunne, K. A. (2006). GFDL's CM2 global coupled climate models. Part I: Formulation and simulation characteristics. *Journal of Climate*, 19(5), 643–674.
- Delworth, T. L., Rosati, A., Anderson, W., Adcroft, A. J., Balaji, V., Benson, R., Dixon, K., Griffies, S. M., Lee, H.-C., & Pacanowski, R. C. (2012). Simulated climate and climate change in the GFDL CM2. 5 high-resolution coupled climate model. *Journal of Climate*, 25(8), 2755–2781.
- Delworth, T. L., & Zeng, F. (2014). Regional rainfall decline in Australia attributed to anthropogenic greenhouse gases and ozone levels. *Nature Geoscience*, 7(8), 583–587.
- Delworth, T. L., Zeng, F., Vecchi, G. A., Yang, X., Zhang, L., & Zhang, R. (2016). The North Atlantic Oscillation as a driver of rapid climate change in the Northern Hemisphere. *Nature Geoscience*, 9(7), 509–512.
- Demaria, M., Knaff, J. A., & Connell, B. H. (2001). *A Tropical Cyclone Genesis Parameter for the Tropical Atlantic*.
- Domingues, R., Kuwano-Yoshida, A., Chardon-Maldonado, P., Todd, R. E., Halliwell, G. R., Kim, H. S., Lin, I. I., Sato, K., Narasaki, T., Shay, L. K., Miles, T., Glenn, S., Zhang, J. A., Jayne, S. R., Centurioni, L. R., le Hénaff, M., Foltz, G., Bringas, F., Ali, M. M., ... Goni, G. J. (2019). Ocean observations in support of studies and forecasts of tropical and extratropical cyclones. In *Frontiers in Marine Science* (Vol. 6, Issue JUL). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00446>

- Domínguez, C., & Magaña, V. (2018). The role of tropical cyclones in precipitation over the tropical and subtropical North America. *Frontiers in Earth Science*, 19.
- Dong, B., Sutton, R. T., Woollings, T., & Hodges, K. (2013). Variability of the North Atlantic summer storm track: Mechanisms and impacts on European climate. *Environmental Research Letters*, 8(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/034037>
- D'Ortenzio, F., Iudicone, D., de Boyer Montegut, C., Testor, P., Antoine, D., Marullo, S., Santoleri, R., & Madec, G. (2005). Seasonal variability of the mixed layer depth in the Mediterranean Sea as derived from in situ profiles. *Geophysical Research Letters*, 32(12), 1–4. <https://doi.org/10.1029/2005GL022463>
- Efron, B. (1969). Student's t-Test under Symmetry Conditions. *Journal of the American Statistical Association*, 64(328), 1278–1302. <https://doi.org/10.1080/01621459.1969.10501056>
- Emanuel, K. (2005a). Genesis and maintenance of “Mediterranean hurricanes.” *Advances in Geosciences*, 2. <https://doi.org/10.5194/adgeo-2-217-2005>
- Emanuel, K. (2005b). Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 436(7051), 686–688.
- Emanuel, K. A. (1986). An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: Steady-state maintenance. *Journal of Atmospheric Sciences*, 43(6), 585–605.
- Ernst, J. A., & Matson, M. (1983). A Mediterranean tropical storm? *Weather*, 38(11), 332–337.
- Feldstein, S. B. (2000). The timescale, power spectra, and climate noise properties of teleconnection patterns. *Journal of Climate*, 13(24), 4430–4440.
- Feng, X., Liu, C., Fan, G., Liu, X., & Feng, C. (2016). Climatology and structures of southwest vortices in the NCEP climate forecast system reanalysis. *Journal of Climate*, 29(21), 7675–7701.
- Fink, A. H., Pohle, S., Pinto, J. G., & Knippertz, P. (2012). Diagnosing the influence of diabatic processes on the explosive deepening of extratropical cyclones. *Geophysical Research Letters*, 39(7). <https://doi.org/10.1029/2012GL051025>
- Fita, L., Romero, R., Luque, A., Emanuel, K., & Ramis, C. (2007). Analysis of the environments of seven Mediterranean tropical-like storms using an axisymmetric, nonhydrostatic, cloud resolving model. *Natural Hazards and Earth System Science*, 7(1), 41–56. <https://doi.org/10.5194/nhess-7-41-2007>
- Fita, L., Romero, R., Luque, A., & Ramis, C. (2009). *Effects of assimilating precipitation zones derived from satellite and lightning data on numerical simulations of tropical-like Mediterranean storms* (Vol. 27). www.ann-geophys.net/27/3297/2009/
- Flaounas, E., Davolio, S., Raveh-Rubin, S., Pantillon, F., Miglietta, M. M., Gaertner, M. A., Hatzaki, M., Homar, V., Khodayar, S., Korres, G., Kotroni, V., Kushta, J., Reale, M., &

- Ricard, D. (2022). Mediterranean cyclones: current knowledge and open questions on dynamics, prediction, climatology and impacts. *Weather and Climate Dynamics*, 3(1), 173–208. <https://doi.org/10.5194/wcd-3-173-2022>
- Flaounas, E., Gray, S. L., & Teubler, F. (2021). A process-based anatomy of Mediterranean cyclones: from baroclinic lows to tropical-like systems. *Weather and Climate Dynamics*, 2(1), 255–279. <https://doi.org/10.5194/wcd-2-255-2021>
- Flaounas, E., Kotroni, V., Lagouvardos, K., Gray, S. L., Rysman, J. F., & Claud, C. (2018). Heavy rainfall in Mediterranean cyclones. Part I: contribution of deep convection and warm conveyor belt. *Climate Dynamics*, 50(7–8), 2935–2949. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3783-x>
- Flaounas, E., Raveh-Rubin, S., Wernli, H., Drobinski, P., & Bastin, S. (2015). The dynamical structure of intense Mediterranean cyclones. *Climate Dynamics*, 44(9–10), 2411–2427. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2330-2>
- Frankignoul, C. (1985). *Sea Surface Temperature Anomalies, Planetary Waves*,. 23(4), 357–390.
- Gaertner, M. Á., González-Alemán, J. J., Romera, R., Domínguez, M., Gil, V., Sánchez, E., Gallardo, C., Miglietta, M. M., Walsh, K. J. E., Sein, D. v., Somot, S., Dell’Aquila, A., Teichmann, C., Ahrens, B., Buonomo, E., Colette, A., Bastin, S., van Meijgaard, E., & Nikulin, G. (2018). Simulation of medicanes over the Mediterranean Sea in a regional climate model ensemble: impact of ocean–atmosphere coupling and increased resolution. *Climate Dynamics*, 51(3), 1041–1057. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3456-1>
- Gaertner, M. a., Jacob, D., Gil, V., Domínguez, M., Padorno, E., Sánchez, E., & Castro, M. (2007). Tropical cyclones over the Mediterranean Sea in climate change simulations. *Geophysical Research Letters*, 34, L14711. <https://doi.org/10.1029/2007GL029977>
- Galanaki, E., Flaounas, E., Kotroni, V., Lagouvardos, K., & Argiriou, A. (2016). Lightning activity in the Mediterranean: quantification of cyclones contribution and relation to their intensity. *Atmospheric Science Letters*, 17(9), 510–516. <https://doi.org/10.1002/asl.685>
- Gill, A. E., & Adrian, E. (1982). *Atmosphere-ocean dynamics* (Vol. 30). Academic press.
- Giorgetta, M. A., Jungclaus, J., Reick, C. H., Legutke, S., Bader, J., Böttinger, M., Brovkin, V., Crueger, T., Esch, M., Fieg, K., Glushak, K., Gayler, V., Haak, H., Hollweg, H.-D., Ilyina, T., Kinne, S., Kornbluh, L., Matei, D., Mauritsen, T., ... Stevens, B. (2013). Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(3), 572–597. <https://doi.org/10.1002/jame.20038>
- Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33(8). <https://doi.org/10.1029/2006GL025734>

- Giorgi, F., & Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63(2–3), 90–104. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.005>
- Givon, Y., Keller Jr., D., Silverman, V., Pennel, R., Drobinski, P., & Raveh-Rubin, S. (2021). Large-scale drivers of the mistral wind: link to Rossby wave life cycles and seasonal variability. *Weather and Climate Dynamics*, 2(3), 609–630. <https://doi.org/10.5194/wcd-2-609-2021>
- González-Alemán, J. J., Valero, F., Martín-León, F., & Evans, J. L. (2015). Classification and synoptic analysis of subtropical cyclones within the northeastern Atlantic Ocean. *Journal of Climate*, 28(8), 3331–3352.
- Griffies, S. M., Winton, M., Anderson, W. G., Benson, R., Delworth, T. L., Dufour, C. O., Dunne, J. P., Goddard, P., Morrison, A. K., Rosati, A., Wittenberg, A. T., Yin, J., & Zhang, R. (2015). Impacts on ocean heat from transient mesoscale eddies in a hierarchy of climate models. *Journal of Climate*, 28(3), 952–977. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00353.1>
- Guishard, M. P., Evans, J. L., & Hart, R. E. (2009). Atlantic subtropical storms. Part II: climatology. *Journal of Climate*, 22(13), 3574–3594.
- Gutowski Jr, W. J. (2009). Coordinated Regional Downscaling Experiment (CORDEX). *AGU Fall Meeting Abstracts, 2009*, A24A-01.
- Haarsma, R. J., Roberts, M. J., Vidale, P. L., Catherine, A., Bellucci, A., Bao, Q., Chang, P., Corti, S., Fučkar, N. S., Guemas, V., von Hardenberg, J., Hazeleger, W., Kodama, C., Koenigk, T., Leung, L. R., Lu, J., Luo, J. J., Mao, J., Mizielinski, M. S., ... von Storch, J. S. (2016). High Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP v1.0) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(11), 4185–4208. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-4185-2016>
- Hafez, Y., & Labban, A. (2018). The Role Played by Blocking System over North America on the Development of Hurricane Ophelia over North Atlantic Ocean. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 06(12), 1–20. <https://doi.org/10.4236/gep.2018.612001>
- Hagemann, S., & Dümenil, L. (1998). *Documentation for the hydrological discharge model*.
- Hagemann, S., & Gates, L. D. (2001). Validation of the hydrological cycle of ECMWF and NCEP reanalyses using the MPI hydrological discharge model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D2), 1503–1510.
- Hart, R. E. (2003). A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry. *Monthly Weather Review*, 131(4), 585–616.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., & Schepers, D. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049.

- Hewitt, H. T., Bell, M. J., Chassignet, E. P., Czaja, A., Ferreira, D., Griffies, S. M., Hyder, P., McClean, J. L., New, A. L., & Roberts, M. J. (2017). Will high-resolution global ocean models benefit coupled predictions on short-range to climate timescales? *Ocean Modelling*, 120, 120–136. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2017.11.002>
- Hochman, A., Harpaz, T., Saaroni, H., & Alpert, P. (2018). Synoptic classification in 21st century CMIP5 predictions over the eastern Mediterranean with focus on cyclones. *International Journal of Climatology*, 38(3), 1476–1483. <https://doi.org/10.1002/joc.5260>
- Hofstätter, M., & Blöschl, G. (2019). Vb Cyclones Synchronized With the Arctic-/North Atlantic Oscillation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(6), 3259–3278. <https://doi.org/10.1029/2018JD029420>
- Hoinka, K. P., & de Castro, M. (2003). The Iberian Peninsula thermal low. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 129(590 PART A), 1491–1511. <https://doi.org/10.1256/qj.01.189>
- Homar, V., Jansà, A., Campins, J., & Ramis, C. (2006). Towards a climatology of sensitivities of Mediterranean high impact weather-first approach. In *Advances in Geosciences* (Vol. 7). <http://medex.inm>.
- Ionita, M. (2014). The impact of the East Atlantic/Western Russia pattern on the hydroclimatology of Europe from mid-winter to late spring. *Climate*, 2(4), 296–309. <https://doi.org/10.3390/cli2040296>
- Jacob, D., van den Hurk, B., Andrae, U., Elgered, G., Fortelius, C., Graham, L. P., Jackson, S. D., Karstens, U., Köpken, C., & Lindau, R. (2001). A comprehensive model inter-comparison study investigating the water budget during the BALTEX-PIDCAP period. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 77(1), 19–43.
- Jansa, A., Alpert, P., Arbogast, P., Buzzi, A., Ivancan-Picek, B., Kotroni, V., Llasat, M. C., Ramis, C., Richard, E., Romero, R., & Speranza, A. (2014). MEDEX: A general overview. In *Natural Hazards and Earth System Sciences* (Vol. 14, Issue 8, pp. 1965–1984). Copernicus GmbH. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1965-2014>
- Jansa, A., Genoves, A., Picornell, M. A., Campins, J., Riosalido, R., & Carretero, O. (2001). Western Mediterranean cyclones and heavy rain. Part 2: Statistical approach. *Meteorological Applications*, 8(1), 43–56. <https://doi.org/10.1017/S1350482701001049>
- Jiang, H. (2012). The relationship between tropical cyclone intensity change and the strength of inner-core convection. *Monthly Weather Review*, 140(4), 1164–1176. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-00134.1>
- Jonard, F., Lambotte, M., Ramos, F., Terres, J.-M., & Bamps, C. (2009). Delimitations of rural areas in Europe using criteria of population density, remoteness and land cover. *JRC Scientific Report, EUR*, 23757.

- Jungclaus, J. H., Fischer, N., Haak, H., Lohmann, K., Marotzke, J., Matei, D., Mikolajewicz, U., Notz, D., & von Storch, J. S. (2013). Characteristics of the ocean simulations in the Max Planck Institute Ocean Model (MPIOM) the ocean component of the MPI-Earth system model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(2), 422–446.
- Jungclaus, J. H., Keenlyside, N., Botzet, M., Haak, H., Luo, J.-J., Latif, M., Marotzke, J., Mikolajewicz, U., & Roeckner, E. (2006). Ocean circulation and tropical variability in the coupled model ECHAM5/MPI-OM. *Journal of Climate*, 19(16), 3952–3972.
- Kalkstein, A. J., Rudich, Y., Raveh-Rubin, S., Kloog, I., & Novack, V. (2020). A closer look at the role of the Cyprus low on dust events in the negev desert. *Atmosphere*, 11(10), 1–15. <https://doi.org/10.3390/atmos11101020>
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., & Woollen, J. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3), 437–472.
- Kapnick, S. B., Delworth, T. L., Ashfaq, M., Malyshev, S., & Milly, P. C. D. (2014). Snowfall less sensitive to warming in Karakoram than in Himalayas due to a unique seasonal cycle. *Nature Geoscience*, 7(11), 834–840.
- Karagiannidis, A., Dafis, S., Kalimeris, A., & Kotroni, V. (2021). Ianos-A hurricane in the Mediterranean. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1–31.
- Karam, D. B., Flamant, C., Cuesta, J., Pelon, J., & Williams, E. (2010). Dust emission and transport associated with a Saharan depression: February 2007 case. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 115(13). <https://doi.org/10.1029/2009JD012390>
- Knelman, J. E., Schmidt, S. K., Garayburu-Caruso, V., Kumar, S., & Graham, E. B. (2019). Multiple, compounding disturbances in a forest ecosystem: Fire increases susceptibility of soil edaphic properties, bacterial community structure, and function to change with extreme precipitation event. *Soil Systems*, 3(2), 1–16. <https://doi.org/10.3390/soilsystems3020040>
- Knutson, T. R., Sirutis, J. J., Vecchi, G. A., Garner, S., Zhao, M., Kim, H. S., Bender, M., Tuleya, R. E., Held, I. M., & Villarini, G. (2013). Dynamical downscaling projections of twenty-first-century atlantic hurricane activity: CMIP3 and CMIP5 model-based scenarios. *Journal of Climate*, 26(17), 6591–6617. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00539.1>
- Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebata, A., Moriya, M., Onoda, H., Onogi, K., Kamahori, H., Kobayashi, C., & Endo, H. (2015). The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 93(1), 5–48.
- Køltzow, M. A. Ø., Iversen, T., & Haugen, J. E. (2011). The importance of lateral boundaries, surface forcing and choice of domain size for dynamical downscaling of global climate simulations. *Atmosphere*, 2(2), 67–95. <https://doi.org/10.3390/atmos2020067>

- Kotz, S., & Nadarajah, S. (2000). *Extreme value distributions: theory and applications*. world scientific.
- Kouroutzoglou, J., Flocas, H. A., Keay, K., Simmonds, I., & Hatzaki, M. (2011). Climatological aspects of explosive cyclones in the Mediterranean. *International Journal of Climatology*, 31(12), 1785–1802. <https://doi.org/10.1002/joc.2203>
- Kouroutzoglou, J., Samos, I., Flocas, H. A., Hatzaki, M., Lamaris, C., Mamara, A., & Emmannouil, A. (2021). Analysis of the transition of an explosive cyclone to a mediterranean tropical-like cyclone. *Atmosphere*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/atmos12111438>
- Lavín-Gullón, Á. (2021). *Quantification of different sources of uncertainty in a Regional Climate Model*.
- Li, G., & Xie, S. P. (2012). Origins of tropical-wide SST biases in CMIP multi-model ensembles. *Geophysical Research Letters*, 39(22), 1–5. <https://doi.org/10.1029/2012GL053777>
- Liberato, M. L. R. (2014). The 19 January 2013 windstorm over the North Atlantic: Large-scale dynamics and impacts on Iberia. *Weather and Climate Extremes*, 5(1), 16–28. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2014.06.002>
- Liberato, M. L. R., Pinto, J. G., Trigo, I. F., & Trigo, R. M. (2011). *Klaus-an exceptional winter storm over northern Iberia and southern France* (Vol. 66, Issue 12). <http://france.meteofrance>.
- Lionello, P., Abrantes, F., Gacic, M., Planton, S., Trigo, R., & Ulbrich, U. (2014). The climate of the Mediterranean region: research progress and climate change impacts. In *Regional Environmental Change* (Vol. 14, Issue 5, pp. 1679–1684). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0666-0>
- Lionello, P., Dalan, F., & Elvini, E. (2002). Cyclones in the Mediterranean region: The present and the doubled CO2 climate scenarios. *Climate Research*, 22(2), 147–159. <https://doi.org/10.3354/cr022147>
- Lionello, P., Trigo, I. F., Gil, V., Liberato, M. L. R., Nissen, K. M., Pinto, J. G., Raible, C. C., Reale, M., Tanzarella, A., Trigo, R. M., Ulbrich, S., & Ulbrich, U. (2016). Objective climatology of cyclones in the Mediterranean region: A consensus view among methods with different system identification and tracking criteria. *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 68(1). <https://doi.org/10.3402/tellusa.v68.29391>
- Liu, M., Vecchi, G. A., Smith, J. A., & Murakami, H. (2017). The present-day simulation and twenty-first-century projection of the climatology of extratropical transition in the North Atlantic. *Journal of Climate*, 30(8), 2739–2756.
- Liu, M., Vecchi, G. A., Smith, J. A., & Murakami, H. (2018). Projection of landfalling-tropical cyclone rainfall in the eastern United States under anthropogenic warming. *Journal of Climate*, 31(18), 7269–7286. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0747.1>

- López Ortiz, M. I., Melgarejo Moreno, J., & Fernández Aracil, P. (2020). *Riesgo de inundación en España : análisis y soluciones para la generación de territorios resilientes*. Universidad de Alicante.
- Lorenz, P., & Jacob, D. (2005). Influence of regional scale information on the global circulation: A two-way nesting climate simulation. *Geophysical Research Letters*, 32(18), 1–4. <https://doi.org/10.1029/2005GL023351>
- Maheras, P., Flocas, H. A., Patrikas, I., & Anagnostopoulou, C. (2001). A 40 year objective climatology of surface cyclones in the mediterranean region: spatial and temporal distribution. In *international journal of climatology Int. J. Climatol* (Vol. 21).
- Maier-Reimer, E. (1993). Geochemical cycles in an ocean general circulation model. Preindustrial tracer distributions. *Global Biogeochemical Cycles*, 7(3), 645–677.
- Majewski, D. (1991). The Europa-Modell of the Deutscher Wetterdienst. In *ECMWF Seminar on numerical methods in atmospheric models* (Vol. 2, pp. 147–191).
- Malguzzi, P., Chessa, P. & Buzzi, A. (1998). The role of surface heat fluxes in the development of a Mediterranean ‘Hurricane’.
- In *Annales Geophysicae*. Part II: Hydrology, Oceans & Atmosphere (Supplement II to Volume 16), EGS, C632.
- Marra, A. C., Federico, S., Montopoli, M., Avolio, E., Baldini, L., Casella, D., D’Adderio, L. P., Dietrich, S., Sanò, P., Torcasio, R. C., & Panegrossi, G. (2019). The precipitation structure of the Mediterranean tropical-like cyclone numa: Analysis of GPM observations and numerical weather prediction model simulations. *Remote Sensing*, 11(14). <https://doi.org/10.3390/rs11141690>
- Marsland, S. J., Haak, H., Jungclaus, J. H., Latif, M., & Röske, F. (2003). The Max-Planck-Institute global ocean/sea ice model with orthogonal curvilinear coordinates. *Ocean Modelling*, 5(2), 91–127.
- Mayengon, R. (1984). Warm core cyclones in the Mediterranean. *Mariners Weather Log*, 28(6), 9.
- Mazza, E., Ulbrich, U., & Klein, R. (2017). The Tropical Transition of the October 1996 Mediane in the Western Mediterranean Sea: A Warm Seclusion Event. *Monthly Weather Review*, 145(7), 2575–2595. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0474.1>
- McGinley, J. (1982). A diagnosis of Alpine lee cyclogenesis. *Monthly Weather Review*, 110(9), 1271–1287.
- Messmer, M., Gómez-Navarro, J. J., & Raible, C. C. (2015). Climatology of Vb cyclones, physical mechanisms and their impact on extreme precipitation over Central Europe. *Earth System Dynamics*, 6(2), 541–553. <https://doi.org/10.5194/esd-6-541-2015>

- Michaelides, S. C., Prezerakos, N. G., & Flocas, H. A. (1999). Quasi-Lagrangian energetics of an intense Mediterranean cyclone. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *125*(553), 139–168.
- Miglietta, M. M., Laviola, S., Malvaldi, A., Conte, D., Levizzani, V., & Price, C. (2013). Analysis of tropical-like cyclones over the Mediterranean Sea through a combined modeling and satellite approach. *Geophysical Research Letters*, *40*(10), 2400–2405. <https://doi.org/10.1002/grl.50432>
- Miglietta, M. M., Mastrangelo, D., & Conte, D. (2015). Influence of physics parameterization schemes on the simulation of a tropical-like cyclone in the Mediterranean Sea. *Atmospheric Research*, *153*, 360–375. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.09.008>
- Miglietta, M. M., Moscatello, A., Conte, D., Mannarini, G., Lacorata, G., & Rotunno, R. (2011). Numerical analysis of a Mediterranean “hurricane” over south-eastern Italy: Sensitivity experiments to sea surface temperature. *Atmospheric Research*, *101*(1–2), 412–426. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.04.006>
- Miglietta, M. M., & Rotunno, R. (2019). Development mechanisms for Mediterranean tropical-like cyclones (medicanes). *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *145*(721), 1444–1460.
- Moscatello, A., Miglietta, M. M., & Rotunno, R. (2008). Numerical analysis of a mediterranean “Hurricane” over Southeastern Italy. *Monthly Weather Review*, *136*(11), 4373–4397. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2512.1>
- Mudelsee, M., Börngen, M., Tetzlaff, G., & Grünewald, U. (2004). Extreme floods in central Europe over the past 500 years: Role of cyclone pathway “Zugstrasse Vb.” In *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres* (Vol. 109, Issue 23, pp. 1–21). <https://doi.org/10.1029/2004JD005034>
- Murakami, H., Levin, E., Delworth, T. L., Gudgel, R., & Hsu, P.-C. (2018). Dominant effect of relative tropical Atlantic warming on major hurricane occurrence. *Science*, *362*(6416), 794–799.
- Murakami, H., Vecchi, G. A., & Underwood, S. (2017). Increasing frequency of extremely severe cyclonic storms over the Arabian Sea. *Nature Climate Change*, *7*(12), 885–889.
- Murakami, H., Vecchi, G. A., Underwood, S., Delworth, T. L., Wittenberg, A. T., Anderson, W. G., Chen, J. H., Gudgel, R. G., Harris, L. M., Lin, S. J., & Zeng, F. (2015). Simulation and prediction of category 4 and 5 hurricanes in the high-resolution GFDL HiFLOR coupled climate model. *Journal of Climate*, *28*(23), 9058–9079. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0216.1>
- Murakami, H., Vecchi, G. A., Villarini, G., Delworth, T. L., Gudgel, R., Underwood, S., Yang, X., Zhang, W., & Lin, S. J. (2016). Seasonal forecasts of major hurricanes and landfalling tropical cyclones using a high-resolution GFDL coupled climate model. *Journal of Climate*, *29*(22), 7977–7989. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0233.1>

- Nastos, P. T., Karavana Papadimou, K., & Matsangouras, I. T. (2018). Mediterranean tropical-like cyclones: Impacts and composite daily means and anomalies of synoptic patterns. *Atmospheric Research*, *208*, 156–166.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.10.023>
- Neumann, C. J., 1993: Global climatology. Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting, WMO/TD No. 560, Rep. TCP-31, World Meteorological Organization, 1.1–1.43
- Nicolaidis, K. A., Michalelides, S. C., & Karacostas, T. (2006). Synoptic and dynamic characteristics of selected deep depressions over Cyprus. In *Advances in Geosciences* (Vol. 7).
- Nieto, R., Gimeno, L., de La Torre, L., Ribera, P., Gallego, D., García-Herrera, R., García, J. A., Nuñez, M., Redaño, A., & Lorente, J. (2005). Climatological features of cutoff low systems in the Northern Hemisphere. *Journal of Climate*, *18*(16), 3085–3103.
- Nigam, S., & Baxter, S. (2015). General Circulation of the Atmosphere: Teleconnections. In *Encyclopedia of Atmospheric Sciences: Second Edition* (pp. 90–109). Elsevier Inc.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382225-3.00400-X>
- Nissen, K. M., Leckebusch, G. C., Pinto, J. G., Renggli, D., Ulbrich, S., & Ulbrich, U. (2010). Cyclones causing wind storms in the Mediterranean: Characteristics, trends and links to large-scale patterns. *Natural Hazards and Earth System Science*, *10*(7), 1379–1391. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1379-2010>
- Nissen, K. M., Leckebusch, G. C., Pinto, J. G., & Ulbrich, U. (2014). Mediterranean cyclones and windstorms in a changing climate. *Regional Environmental Change*, *14*(5), 1873–1890. <https://doi.org/10.1007/s10113-012-0400-8>
- Palmén, E. (1948). On the formation and structure of tropical hurricanes. *Geophysica*, *3*(1), 26–38.
- Parras-Berrocal, I. M., Vazquez, R., Cabos, W., Sein, D., Mañanes, R., Perez-Sanz, J., & Izquierdo, A. (2020). The climate change signal in the Mediterranean Sea in a regionally coupled atmosphere–ocean model. *Ocean Science*, *16*(3), 743–765.
<https://doi.org/10.5194/os-16-743-2020>
- Pascale, S., Boos, W. R., Bordoni, S., Delworth, T. L., Kapnick, S. B., Murakami, H., Vecchi, G. A., & Zhang, W. (2017). Weakening of the North American monsoon with global warming. *Nature Climate Change*, *7*(11), 806–812.
- Patlakas, P., Stathopoulos, C., Tsalis, C., & Kallos, G. (2021). Wind and wave extremes associated with tropical-like cyclones in the Mediterranean basin. *International Journal of Climatology*, *41*, E1623–E1644.
- Picornell, M. A., Campins, J., & Jansà, A. (2014). Detection and thermal description of medicanes from numerical simulation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *14*(5), 1059–1070.

- Picornell, M. A., Jansà, A., Genovés, A., & Campins, J. (2001). Automated database of mesocyclones from the hirlam (INM) -0.5° analyses in the western Mediterranean. *International Journal of Climatology*, 21(3), 335–354. <https://doi.org/10.1002/joc.621>
- Pielke, R. A. (1991). A recommended specific definition of “resolution.” *Agric. For. Meteorol*, 55, 345–349.
- Pierce, C. H. (1939). *The meteorological history of the New England hurricane of Sept. 21, 1938*. (Vol. 67, pp. 237–285).
- Pinto, J. G., Ulbrich, S., Parodi, A., Rudari, R., Boni, G., & Ulbrich, U. (2013). Identification and ranking of extraordinary rainfall events over Northwest Italy: The role of Atlantic moisture. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 118(5), 2085–2097. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50179>
- Pinto, J. G., Zacharias, S., Fink, A. H., Leckebusch, G. C., & Ulbrich, U. (2009). Factors contributing to the development of extreme North Atlantic cyclones and their relationship with the NAO. *Climate Dynamics*, 32(5), 711–737. <https://doi.org/10.1007/s00382-008-0396-4>
- Portmann, R., González-Alemán, J. J., Sprenger, M., & Wernli, H. (2020). How an uncertain short-wave perturbation on the North Atlantic wave guide affects the forecast of an intense Mediterranean cyclone (Medicane Zorbas). *Weather and Climate Dynamics*, 1(2), 597–615.
- Prezerakos, N. G., Flocas, H. A., & Brikas, D. (2006). The role of the interaction between polar and subtropical jet in a case of depression rejuvenation over the Eastern Mediterranean. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 92(1–2), 139–151. <https://doi.org/10.1007/s00703-005-0142-y>
- Price, C., Asfur, M., & Yair, Y. (2009). Maximum hurricane intensity preceded by increase in lightning frequency. *Nature Geoscience*, 2(5), 329–332. <https://doi.org/10.1038/ngeo477>
- Pytharoulis, I. (2018). Analysis of a Mediterranean tropical-like cyclone and its sensitivity to the sea surface temperatures. *Atmospheric Research*, 208, 167–179. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.08.009>
- Pytharoulis, I., Craig, G. C., & Ballard, S. P. (1999). Study of the Hurricane-Like Mediterranean Cyclone of January 1995. In *Phys. Chem. Earth (B)* (Vol. 24, Issue 6).
- Pytharoulis, I., Matsangouras, I. T., Tegoulis, I., Kotsopoulos, S., Karacostas, T. S., & Nastos, P. T. (2017). Numerical study of the medicane of November 2014. In *Perspectives on Atmospheric Sciences* (pp. 115–121). Springer.
- Ragone, F., Mariotti, M., Parodi, A., Hardenberg, J. von, & Pasquero, C. (2018). A climatological study of Western Mediterranean Medicanes in numerical simulations with explicit and parameterized convection. *Atmosphere*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/atmos9100397>

- Raible, C. C., Ziv, B., Saaroni, H., & Wild, M. (2010). Winter synoptic-scale variability over the Mediterranean Basin under future climate conditions as simulated by the ECHAM5. *Climate Dynamics*, 35(2), 473–488. <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0678-5>
- Rasmussen, E., & Zick, C. (1987). A subsynoptic vortex over the Mediterranean with some resemblance to polar lows. *Tellus A*, 39(4), 408–425.
- Raveh-Rubin, S., & Wernli, H. (2016). Large-scale wind and precipitation extremes in the Mediterranean: dynamical aspects of five selected cyclone events. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(701), 3097–3114. <https://doi.org/10.1002/qj.2891>
- Reale, M., Cabos Narvaez, W. D., Cavicchia, L., Conte, D., Coppola, E., Flaounas, E., Giorgi, F., Gualdi, S., Hochman, A., Li, L., Lionello, P., Podrascanin, Z., Salon, S., Sanchez-Gomez, E., Scoccimarro, E., Sein, D. v., & Somot, S. (2021). Future projections of Mediterranean cyclone characteristics using the Med-CORDEX ensemble of coupled regional climate system models. *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-06018-x>
- Reale, M., Liberato, M. L. R., Lionello, P., Pinto, J. G., Salon, S., & Ulbrich, S. (2019). A Global Climatology of Explosive Cyclones using a Multi-Tracking Approach. *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 71(1), 1–19. <https://doi.org/10.1080/16000870.2019.1611340>
- Reale, M., & Lionello, P. (2013). Synoptic climatology of winter intense precipitation events along the Mediterranean coasts. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(7), 1707–1722. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-1707-2013>
- Reale, O., & Atlas, R. (1998). A tropical-like cyclone in the extratropics. *International Centre for Theoretical Physics Preprint, Trieste, Italy*.
- Reale, O., & Atlas, R. (2001). *Tropical cyclone-like vortices in the extratropics: Observational evidence and synoptic analysis*. (Vol. 16, pp. 7–34).
- Reed, R. J., Kuoo, Y.-H., Albright, M. D., Gao, K., Guo, Y.-R., & Huang, W. (2001). Analysis and modeling of a tropical-like cyclone in the Mediterranean Sea. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 76, 183–202. <https://doi.org/10.1007/s007030170029>
- Ricchi, A., Miglietta, M. M., Barbariol, F., Benetazzo, A., Bergamasco, A., Bonaldo, D., Cassardo, C., Falcieri, F. M., Modugno, G., Russo, A., Sclavo, M., & Carniel, S. (2017). Sensitivity of a Mediterranean tropical-like Cyclone to different model configurations and coupling strategies. *Atmosphere*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/atmos8050092>
- Rienecker, M. M., Suarez, M. J., Gelaro, R., Todling, R., Bacmeister, J., Liu, E., Bosilovich, M. G., Schubert, S. D., Takacs, L., & Kim, G.-K. (2011). MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. *Journal of Climate*, 24(14), 3624–3648.

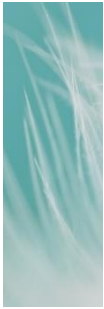
- Roberts, M. J., Hewitt, H. T., Hyder, P., Ferreira, D., Josey, S. A., Mizielinski, M., & Shelly, A. (2016). Impact of ocean resolution on coupled air-sea fluxes and large-scale climate. *Geophysical Research Letters*, *43*(19), 10,430-10,438. <https://doi.org/10.1002/2016GL070559>
- Roeckner, E., Arpe, K., Bengtsson, L., Christoph, M., Claussen, M., Dümenil, L., Esch, M., Giorgetta, M. A., Schlese, U., & Schulzweida, U. (1996). *The atmospheric general circulation model ECHAM-4: Model description and simulation of present-day climate*.
- Roeckner, E., Bäuml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kirchner, I., Kornbluh, L., & Manzini, E. (2003). *The atmospheric general circulation model ECHAM 5. PART I: Model description*.
- Romera, R., Gaertner, M. Á., Sánchez, E., Domínguez, M., González-Alemán, J. J., & Miglietta, M. M. (2017). Climate change projections of medicanes with a large multi-model ensemble of regional climate models. *Global and Planetary Change*, *151*, 134–143. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.10.008>
- Romero, R., & Emanuel, K. (2013). Medicanes risk in a changing climate. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, *118*(12), 5992–6001. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50475>
- Romero, R., & Emanuel, K. (2017). Climate change and hurricane-like extratropical cyclones: Projections for North Atlantic polar lows and medicanes based on CMIP5 models. *Journal of Climate*, *30*(1), 279–299. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0255.1>
- Rotunno, R., & Emanuel, K. A. (1987). An air–sea interaction theory for tropical cyclones. Part II: Evolutionary study using a nonhydrostatic axisymmetric numerical model. *Journal of Atmospheric Sciences*, *44*(3), 542–561.
- Ruti, P. M., Somot, S., Giorgi, F., Dubois, C., Flaounas, E., Obermann, A., Dell’Aquila, A., Pisacane, G., Harzallah, A., Lombardi, E., Ahrens, B., Akhtar, N., Alias, A., Arsouze, T., Aznar, R., Bastin, S., Bartholy, J., Béranger, K., Beuvier, J., ... Vervatis, V. (2016). Med-CORDEX initiative for Mediterranean climate studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *97*(7), 1187–1208. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00176.1>
- Saha, S. K., Pokhrel, S., Chaudhari, H. S., Dhakate, A., Shewale, S., Sabeerali, C. T., Salunke, K., Hazra, A., Mahapatra, S., & Rao, A. S. (2014). Improved simulation of Indian summer monsoon in latest NCEP climate forecast system free run. *International Journal of Climatology*, *34*(5), 1628–1641.
- Schade, L. R., & Emanuel, K. A. (1999). The ocean’s effect on the intensity of tropical cyclones: Results from a simple coupled atmosphere–ocean model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *56*(4), 642–651.
- Schultz, D. M., & Vaughan, G. (2011). Occluded fronts and the occlusion process: A fresh look at conventional wisdom. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *92*(4), 443–466. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3057.1>

- Schwarz, G. (1978). Estimating the dimension of a model. *The Annals of Statistics*, 461–464.
- Scicchitano, G., Scardino, G., Monaco, C., Piscitelli, A., Milella, M., de Giosa, F., & Mastronuzzi, G. (2021). Comparing impact effects of common storms and Medicanes along the coast of south-eastern Sicily. *Marine Geology*, 439. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2021.106556>
- Scicchitano, G., Scardino, G., Tarascio, S., Monaco, C., Barracane, G., Locuratolo, G., Milella, M., Piscitelli, A., Mazza, G., & Mastronuzzi, G. (2020). The first video witness of coastal boulder displacements recorded during the impact of medicane “Zorbas” on Southeastern Sicily. *Water (Switzerland)*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/w12051497>
- Sein, D. v, Mikolajewicz, U., Gröger, M., Fast, I., Cabos, W., Pinto, J. G., Hagemann, S., Semmler, T., Izquierdo, A., & Jacob, D. (2015). Regionally coupled atmosphere-ocean-sea ice-marine biogeochemistry model ROM: 1. Description and validation. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 7(1), 268–304.
- Sinclair MR. 1997. Objective identification of cyclones and their circulation intensity, and climatology. *Weather Forecast*. 12:595–612. [https://doi.org/10.1175/15200434\(1997\)012<0595:OIOCAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200434(1997)012<0595:OIOCAT>2.0.CO;2).
- Small, R. J., deSzoeki, S. P., Xie, S. P., O’Neill, L., Seo, H., Song, Q., Cornillon, P., Spall, M., & Minobe, S. (2008). Air-sea interaction over ocean fronts and eddies. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 45(3–4), 274–319. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2008.01.001>
- Stathopoulos, C., Patlakas, P., Tsalis, C., & Kallos, G. (2020). The role of sea surface temperature forcing in the life-cycle of Mediterranean cyclones. *Remote Sensing*, 12(5), 825.
- Strong, C., & Davis, R. E. (2007). Winter jet stream trends over the Northern Hemisphere. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 133(629 B), 2109–2115. <https://doi.org/10.1002/qj.171>
- Tapiador, F. J., Gaertner, M. A., Romera, R., & Castro, M. (2007). A multisource analysis of Hurricane Vince. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(7), 1027–1032.
- Thorncroft, C. D., & Flocas, H. A. (1997). A case study of Saharan cyclogenesis. *Monthly Weather Review*, 125(6), 1147–1165. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1997\)125<1147:ACSOSC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1997)125<1147:ACSOSC>2.0.CO;2)
- Toomey, T., Amores, A., Marcos, M., & Orfila, A. (2022). Coastal Hazards of Tropical-Like Cyclones Over the Mediterranean Sea *Journal of Geophysical Research : Oceans*. <https://doi.org/10.1029/2021JC017964>
- Tous, M., & Romero, R. (2013). Meteorological environments associated with medicane development. *International Journal of Climatology*, 33(1), 1–14. <https://doi.org/10.1002/joc.3428>

- Tous, M., Zappa, G., Romero, R., Shaffrey, L., & Vidale, P. L. (2016). Projected changes in medicanes in the HadGEM3 N512 high-resolution global climate model. *Climate Dynamics*, 47(5–6), 1913–1924. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2941-2>
- Trenberth, K. (2005). Uncertainty in hurricanes and global warming. *Science*, 308(5729), 1753–1754.
- Trenberth, K. E., Stepaniak, D. P., Hurrell, J. W., & Fiorino, M. (2001). Quality of reanalyses in the tropics. *Journal of Climate*, 14(7), 1499–1510.
- Trigo, I. F., Bigg, G. R., & Davies, T. D. (2002). *Climatology of Cyclogenesis Mechanisms in the Mediterranean*.
- Trigo, I. F., Davies, T. D., & Bigg, G. R. (1999). Objective climatology of cyclones in the Mediterranean region. *Journal of Climate*, 12(6), 1685–1696. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1685:OCOCIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1685:OCOCIT>2.0.CO;2)
- Tsimplis, M. N., Marcos, M., & Somot, S. (2008). 21st century Mediterranean sea level rise: steric and atmospheric pressure contributions from a regional model. *Global and Planetary Change*, 63(2–3), 105–111.
- Ulbrich, U., Leckebusch, G. C., & Pinto, J. G. (2009). Extra-tropical cyclones in the present and future climate: A review. *Theoretical and Applied Climatology*, 96(1–2), 117–131. <https://doi.org/10.1007/s00704-008-0083-8>
- Ulbrich, U., Lionello, P., Belušić, D., Jacobeit, J., Knippertz, P., Kuglitsch, F. G., Leckebusch, G. C., Luterbacher, J., Maugeri, M., Maheras, P., Nissen, K. M., Pavan, V., Pinto, J. G., Saaroni, H., Seubert, S., Toreti, A., Xoplaki, E., & Ziv, B. (2012). Climate of the mediterranean: Synoptic patterns, temperature, precipitation, winds, and their extremes. In *The Climate of the Mediterranean Region* (pp. 301–346). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416042-2.00005-7>
- Uppala, S. M., Kållberg, P. W., Simmons, A. J., Andrae, U., Bechtold, V. D. C., Fiorino, M., Gibson, J. K., Haseler, J., Hernandez, A., & Kelly, G. A. (2005). The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A Journal of the Atmospheric Sciences, Applied Meteorology and Physical Oceanography*, 131(612), 2961–3012.
- Valcke, S., Caubel, A., Declat, D., & Terray, L. (2003). OASIS3 ocean atmosphere sea ice soil user's guide. *Prisim Project Report*, 2.
- van Bebber, W. J. (1891). *Die Wettersvorhersage: eine praktische Anleitung zur Wettersvorhersage auf Grundlage der Zeitungswetterkarten und Zeitungswetterberichte: für alle Berufsarten*. Enke.
- van der Wiel, K., Kapnick, S. B., & Vecchi, G. A. (2017). Shifting patterns of mild weather in response to projected radiative forcing. *Climatic Change*, 140(3), 649–658.

- van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., & Lamarque, J.-F. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, *109*(1), 5–31.
- Vecchi, G. A., Delworth, T., Gudgel, R., Kapnick, S., Rosati, A., Wittenberg, A. T., Zeng, F., Anderson, W., Balaji, V., Dixon, K., Jia, L., Kim, H. S., Krishnamurthy, L., Msadek, R., Stern, W. F., Underwood, S. D., Villarini, G., Yang, X., & Zhang, S. (2014). On the seasonal forecasting of regional tropical cyclone activity. *Journal of Climate*, *27*(21), 7994–8016. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00158.1>
- Vongvisessomjai, S. (2009). Tropical cyclone disasters in the Gulf of Thailand. *Songklanakarinn Journal of Science & Technology*, *31*(2).
- Walsh, K., Giorgi, F., & Coppola, E. (2014). Mediterranean warm-core cyclones in a warmer world. *Climate Dynamics*, *42*(3–4), 1053–1066. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1723-y>
- Walsh, K. J. E., Fiorino, M., Landsea, C. W., & McInnes, K. L. (2007). Objectively determined resolution-dependent threshold criteria for the detection of tropical cyclones in climate models and reanalyses. *Journal of Climate*, *20*(10), 2307–2314.
- Wang, C., Graham, R. M., Wang, K., Gerland, S., & Granskog, M. A. (2019). Comparison of ERA5 and ERA-Interim near-surface air temperature, snowfall and precipitation over Arctic sea ice: effects on sea ice thermodynamics and evolution. *The Cryosphere*, *13*(6), 1661–1679.
- Wilks, D. S. (2006). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (p. 627). Burlington, MA: Academic Press.
- Winstanley, D. (1970). The north african flood disaster, september 1969. *Weather*, *25*(9), 390–403. <https://doi.org/10.1002/j.1477-8696.1970.tb04128.x>
- Woollings, T., & Blackburn, M. (2012). The north Atlantic jet stream under climate change and its relation to the NAO and EA patterns. *Journal of Climate*, *25*(3), 886–902. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00087.1>
- Xie, S. P., & Carton, J. A. (2004). Tropical atlantic variability: Patterns, mechanisms, and impacts. In *Geophysical Monograph Series* (Vol. 147, pp. 121–142). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1029/147GM07>
- Xie, S. P., Deser, C., Vecchi, G. A., Collins, M., Delworth, T. L., Hall, A., Hawkins, E., Johnson, N. C., Cassou, C., Giannini, A., & Watanabe, M. (2015). Towards predictive understanding of regional climate change. *Nature Climate Change*, *5*(10), 921–930. <https://doi.org/10.1038/nclimate2689>
- Zappa, G., Hawcroft, M. K., Shaffrey, L., Black, E., & Brayshaw, D. J. (2015). Extratropical cyclones and the projected decline of winter Mediterranean precipitation in the CMIP5 models. *Climate Dynamics*, *45*(7–8), 1727–1738. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2426-8>

- Zappa, G., Shaffrey, L. C., Hodges, K. I., Sansom, P. G., & Stephenson, D. B. (2013). A multimodel assessment of future projections of north atlantic and european extratropical cyclones in the CMIP5 climate models. *Journal of Climate*, 26(16), 5846–5862. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00573.1>
- Zeder, M. A. (2008). Domestication and early agriculture in the Mediterranean Basin: Origins, diffusion, and impact. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(33), 11597–11604.
- Zhang, H., Berz, G., Emanuel, K., et al. (1998) Tropical cyclones and global climate change: a post-IPCC assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 19–38.
- Zhang, W., Vecchi, G. A., Murakami, H., Delworth, T., Wittenberg, A. T., Rosati, A., Underwood, S., Anderson, W., Harris, L., Gudgel, R., Lin, S. J., Villarini, G., & Chen, J. H. (2016). Improved simulation of tropical cyclone responses to ENSO in the western north pacific in the high-resolution GFDL HiFLOR coupled climate model. *Journal of Climate*, 29(4), 1391–1415. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0475.1>
- Zhang, W., Villarini, G., Scoccimarro, E., & Napolitano, F. (2021). Examining the precipitation associated with medicanes in the high-resolution ERA-5 reanalysis data. *International Journal of Climatology*, 41(S1), E126–E132. <https://doi.org/10.1002/joc.6669>



Índice de figuras

Figura 1.1. Densidad de trayectoria de ciclones en valor medio de ciclones durante la temporada de invierno (1957–2002). En la parte de arriba para todos los ciclones. En la parte de abajo para los ciclones que causan episodios de fuerte viento en el Mediterráneo. Figura extraída del trabajo de Nissen et al. (2010).	6
Figura 1.2. Cambios del patrón de teleconexión de la NAO desde 1988 hasta 2022. Figura extraída de la página web de la NOAA (https://www.noaa.gov/	8
Figura 1.3. Esquema de modelo de cinta transportadora cálida (roja), fría (azul) y seca (amarilla). Figura extraída del trabajo de Schultz & Vaughan (2011).	10
Figura 1.4. Ciclo de vida del ciclón Klaus. En la parte de arriba se representa la trayectoria del ciclón en superficie del ciclón Klaus cada seis horas, mientras que en la parte de abajo se abajo representa la evolución de la presión en superficie a lo largo de su ciclo de vida. El periodo de vida del ciclón se considera desde 21-27 de enero de 2009. Figura extraída del trabajo de Liberato et al. (2011).	14
Figura 2.1. Mediane generado en enero de 1995 en zonas del sur del Mediterráneo (16/01/1995 at 13:00 UTC) observado desde la imagen visible del satélite Meteosat. Figura extraída del trabajo de Fita et al. (2007)	18
Figura 2.2. Representación en tres dimensiones de la distribución de la altura de geopotencial alrededor del mediane Zorbas a 900 hPa (azul), 600 hPa (verde) y 300 hPa para los días (a) 27/18 UTC, (b) 28/06 UTC y (c) 28/18 UTC de septiembre de 2018. Los puntos negros representan los valores mínimos de altura de geopotencial (en metros) en cada nivel isobárico y las líneas negras representan la inclinación vertical con la altura. Figura extraída del trabajo de Kouroutzoglou et al., (2021).....	22
Figura 2.3. Serie temporal de presión a nivel del mar, viento y precipitación del mediane Ianos a su paso por (a) Palliki en Cefalonia y (b) Skinari en Zakyntos (Grecia) entre las 0600 UTC del 17 de septiembre y las 1800 UTC del 18 septiembre de 2020: (i) velocidad del viento máxima de 10 m en 10 minutos (m/s; línea verde), (ii) ráfaga de viento máxima (m/s; línea verde rectangular), (iii) dirección media del viento (vectores verdes), (iv) presión mínima al nivel del mar en 10 minutos (hPa) y (v) lluvia acumulada en 10 minutos (mm; barras azules). Figura extraída del trabajo de Karagiannidis et al., 2021.	25
Figura 2.4. Climatología de la altura de la capa de mezcla en la región mediterránea. Figura extraída del trabajo de D’Ortenzio et al. (2005)	27

Figura 3.1. Intervalo en días en el que las correlaciones de anomalías medias de 365 días de los pronósticos de altura de 500 hPa desde las 00 y las 12 UTC alcanzan el 95 % (verde), el 80 % (naranja) y el 60 % (azul). Las líneas más gruesas indican ERA5 y las líneas finas ERA-Interim. El sombreado indica la diferencia entre ERA5 y ERA-Interim. Figura extraída de Hersbach et al. 2020	39
Figura 3.2. Esquema conceptual utilizado en los modelos climáticos globales, así como un esquema de los procesos físicos que ocurren en un modelo climático. Figura extraída de la página de la NOAA (https://www.noaa.gov/).	40
Figura 3.3. Representación de la malla horizontal de atmósfera y océano para el modelo ROM y REMO. Elaboración propia	43
Figura 4.1. Esquema de diagnóstico e identificación de ciclones con características tropicales en el Mediterráneo. elaboración propia.....	46
Figura 4.2. Ejemplo del método de mejor ajuste de funciones para dos distribuciones de velocidad máxima de viento en medicanes (líneas roja y verde oscura) con su tasa de variación entre ambas (línea verde clara).	50
Figure 5.1. (a) Medicanes' track density (number per year; section 5.2) in CLIM, (b) monthly distribution, and (c) lifetime maximum intensity distribution of the medicanes in CLIM (National Centers for Environmental Prediction). HiFLOR = High-Resolution Forecast-Oriented Low Ocean Resolution; GCM = global climate model.	61
Figure 5.2. (a) Changes in annual medicane (MED) and extratropical cyclone (EXT) mean frequency. Upper and lower bar indicates percentiles 75 and 25, respectively. (b) Relative number (number of medicanes at duration divided by the total number of medicanes in the period) of medicanes based on their duration in hours. Also plotted (horizontal lines) is the sum of the number of medicanes lasting at least 24 hr. (c) Medicane's track density (number per year) in LATE. CLIM = climatological run; EARLY = early future; LATE = late future.	63
Figure 5.3. (a) Probability distribution for 10-m wind speed associated with the medicane stages. Also plotted are the probability density functions that best fit (section 5.2) each empirical probability distribution. Orange function is the percentage of variation of LATE's function with respect to CLIM's function. (b) Composites of accumulated precipitation (shaded; mm/day) and sea level pressure (black contours) for medicanes in their tropical stages in CLIM. N is the number of the sample, SLP is the minimum sea level pressure, P is the maximum precipitation, and TW is the maximum tangential wind speed. (c) Same as (b) but for LATE. (d) Same as (b) and (c) but for differences between LATE and CLIM. Statistical significant differences (at the 90% confidence level) are highlighted by strong color. (e) Probability density functions that best fit (section 5.2) each empirical probability distribution for tropicality index. Blue function is the percentage of variation with respect to CLIM. CLIM = climatological run; EARLY = early future; LATE = late future.....	64
Figure 5.4. (a) Boxplot for PDI_IS's distribution. (b) Percentage of power dissipation index (PDI) contribution of each season to the annual PDI in each 50-year run. Real	

PDI values ($10 + 04 \text{ m}^3/\text{s}^2$) are indicated within each bar. (c) Sea surface temperatures value and change (LATE vs. CLIM) for each season. CLIM = climatological run; EARLY = early future; LATE = late future; PDI = power dissipation index 66

Figure 5.S1. 300-hPa geopotential height (dam; shaded and black contours) and sea level pressure (hPa; white contours) for a, 12 hours and b, 114 hours after the cyclogenesis. c, Wind at 10 m (ms^{-1} ; shaded) for 114 hours after the cyclogenesis. d, 300-900 hPa thickness (dam, shaded) and sea level pressure (hPa; white contours) for 114 hours after the cyclogenesis. The medicane's track is represented in red in (a). 68

Figure 5.S2. Cyclone phase space in B-VTL (a) and VTL-VTU (b) of the medicane case described in Supplementary Fig. 5.S1. A indicates the initial temporal point (cyclogenesis) and Z indicates the last temporal point, as identified in the tracking. 69

Figure 5.S3. Changes in seasonal medicane (MED) and extratropical cyclone (EXT) mean frequency. Upper and lower bar indicates percentiles 75 and 25. 69

Figure 5.S4. Probability distribution for 10-m wind speed associated with the medicane stages. Also plotted are the probability density functions which best fit (Methods) each empirical probability distribution. Orange function is the % of variation of EARLY's function with respect to CLIM's function. 70

Figure 5.S5. a, Azimuthal mean of tangential wind speed at 10 m. b, Azimuthal mean of precipitation. Squares indicate where differences are statistically significant at the 90% confidence level. 70

Figure 5.S6. Seasonal percentage of variation of LATE's probability density function with respect that of CLIM 71

Figure 6.1. Domain boundaries of the regional atmospheric model REMO (thick red line), land orography (shading, in m) and grid of the global ocean model MPIOM (fine black lines; for clarity, only part of the grid lines are drawn). The uncoupled run only includes the atmospheric component that is delimited by the red line. While the coupled model covers the area of convergence between the atmospheric model (thick red line) and the oceanic model. 77

Figure 6.2. (a) Annual frequency of medicanes from Cavicchia climatology (Cavicchia et al. (2014); yellow bars), the uncoupled simulation (REMO; solid blue line) and coupled model (ROM; dashed red line) with its annual trends from 1951 to 2010. (b) Decadal frequency for the different runs until the end of the XXI century, assuming 6 hr as the minimum duration of the warm core criteria for selecting medicanes. The dashed red line shows the results from the coupled model (ROM) and the solid blue line those from the uncoupled model (REMO). The decadal frequency trend for the uncoupled and coupled runs in the last 150 years of the simulation time period (1950– 2100) are shown with a solid black line and a dashed black line, respectively. (c) Same as (b) but establishing 12 hr as the minimum duration of the warm core criteria. 81

Figure 6.3. (a) Decadal frequency of medicanes (yellow bars) and extratropical cyclones (ECs; blue bars), as well as their trend over the simulation period (1951–2099; red lines)

for the coupled model (ROM). (b) Same as (a), but for the uncoupled model (REMO). (c) Change of the instability index (°C) in the Mediterranean region between past (1951–2000) and future climate (2051–2099) for the coupled model (ROM). (d) Same (c), but for the uncoupled simulation (REMO). 82

Figure 6.4. a) Monthly frequency of medicanes in past climate (P1; 1951–2000) for the coupled run (ROM; dashed red line), the uncoupled run (REMO; solid blue line) and the climatology from Cavicchia et al., 2014b (yellow bars). (b) Variation of total number of medicanes per season between past (P1; 1951–2000) and future (P3; 2051–2099) climates for the coupled run (ROM). (c) Same as (b), but for the uncoupled run (REMO)..... 83

Figure 6.5. (a) Distribution of maximum wind speed per cyclone in past climate (period 1, P1: 1951–2000) for the uncoupled model (REMO; solid blue line) and the coupled model (ROM; dashed red line). (b) Values of maximum wind speed in medicanes for present climate (P1; red bars) and future climate (period 3, P3: 2051–2099; green bars), probability density function (pdf) of maximum wind speed for past climate (best fit for P1; solid blue line) and future climate (best fit for P3; dashed green line), for the coupled model (ROM). The thick red curve shows the percentage variation of the pdf for P3 with respect to the pdf for P1. (c) Same type of graph as b) but comparing the coupled model (ROM) to the uncoupled model (REMO). (d) Same as (b) but for the uncoupled model (REMO) 84

Figure 6.6. (a) Accumulated number of cyclone time steps in winter, considering the entire time period studied (1950–2100). (b), (e) and (f): as (a), but for spring, summer, and autumn, respectively. (c) Boxplots of maximum wind speed for each time step for the whole study period (1951–2099) in winter. (d), (g), (h): as (c) but for spring, summer, and autumn, respectively. 87

Figure 6. S1. a) Medicanes' track density (number of medicanes per year) from 1950-2010 for the coupled model. b) same (a) but for the uncoupled model..... 89

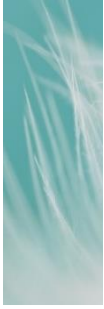
Figure 6.S2. Values of maximum VTU in medicanes for present climate (P1; red bars) and future climate (period 3, P3: 2051–2099; green bars), probability density function (pdf) of VTU for past climate (best fit for P1; solid blue line) and future climate (best fit for P3; dashed green line), for the uncoupled model (REMO). The thick orange curve shows the percentage variation of the pdf for P3 with respect to the pdf for P1. (b) Same as (a) but for the coupled model (ROM) 90

Figure 7.1. Annual frequency (bars) and trend (line) of medicanes reproduced with NO-INT from 1979 to 2018..... 99

Figure 7.2. Annual frequency of medicanes reproduced with NO-INT (yellow bars; a–d) and with the corresponding INT configuration (green lines; a–d; a: INT-3, b: INT-4-400, c: INT-4-600, d: INT-5) from 1979 to 2018. The trends for NO-INT and the different INT configurations are shown with a brown and a black lines, respectively. 100

Figure 7.3. Seasonal (a) and monthly (b) frequency of medicanes reproduced with NO-INT and with the corresponding INT configuration (blue: INT-3; red: INT-4-400; black:

INT-4-600; orange: INT-5) computed for the 1979–2018 time period. In this figure: Winter (December, January, February), spring (March, April, May), summer (June, July, August), fall (September, October, November). Dots of the colour of the curve which is hidden have been added	101
Figure 7.4. Probability density function of the wind speed (m/s) for NO-INT (red bars) and the corresponding interpolated case (green bars; a: INT; b: INT-4-400; c: INT-4-600; d: INT-5). The best fit of the probability density functions for NO-INT (red line) and the different interpolated cases (blue line) are also shown	102
Figure 7.5. As for Figure 7.4, but taking into account -VTU (m)	103
Figure 7.6. Annual time series of the total number of hours during which the cyclones have tropical characteristics, as well as the corresponding trend, for NO-INT (red) and the corresponding INT configuration (blue; a: INT-3; b: INT-4-400; c: INT-4-600; d: INT-5)	103
Figure 7.7. Track density (medicanes/year) for the 1979–2018 time period and the different configurations studied (a: NO-INT; b: INT-3; c: INT-4-400; d: INT-4-600; e: INT-5). Note that panels have been created with data with a horizontal resolution of 0.25° subsequently smoothed.	105
Figure 7.8. Duration (in time steps that is, 1 time step = 6 hr) of the fully tropical phase of each of the individual medicanes (indicated by a cyclone index) reproduced with NO-INT (yellow bars) and the corresponding INT configuration (blue bars) within the 1979–2018 time period. Those cyclones which are found for NO-INT and INT, correspond to the same medicane. Individual medicanes which only appear with INT should be regarded as spurious medicanes. Medicanes which are only found with NO-INT correspond to medicanes that are not captured by INT. Red lines correspond to the difference in duration between a given medicane in NO-INT and INT	106
Figure 7.9. As in Figure 7.8, but only for winter	107
Figure 7.10. As in Figure 7.9, but only for fall	108
Figure 7.11. First column: CPS parameter diagrams that show -VTL (m) and -VTU (m). Second column: CPS diagrams in which -VTU (m) and B (m) are represented. Medicane Rolf (2011) is shown in a and b, Celeno (1995) in c and d and Zorbas (2018) in e and f. In each panel, a represents the situation at the beginning of the medicane and Z corresponds to the state at its end. The initial and final dates are shown	110
Figure 7.1S. Trajectories of medicanes Rolf (red), Zorbas (black) and Celeno (blue). The initial location of the medicane is indicated with an “A” and its final position with a “Z”	112



Índice de Tablas

Table 6.1. Different runs used in this research	78
Table 6.2. Annual frequency of medicane frequency with the corresponding standard deviations for the different runs and the Cavicchia medicane climatology (Cavicchia et al., 2014a)	79
Table 7.1. Geopotential levels used for the cyclone phase space (CPS) for the different simplified methods here assumed.....	97
Table 7.2 Statistical analysis for the different configurations here tested computed for the 1979–2018 time period: Average number of medicanes per year for the considered time period, standard deviation, the corresponding trend and the correlation between a given configuration and NO-INT	98
Table 7.1S. Table of the significance values of the Wilcoxon test for the values of wind and warm core (VTU) between the different interpolated configurations with respect to the non-interpolated configuration.	112



Listado de las publicaciones y contribuciones a congresos relacionadas con esta tesis doctoral

Contribuciones a congresos y jornadas de investigación

VII Jornadas Doctorales de la UCLM (noviembre 2017)

- **Autores:** Jesús Gutiérrez, Miguel Ángel Gaertner, Juan Jesús González-Alemán.
- **Título:** Evolución futura de los ciclones con características tropicales en la Cuenca Mediterránea: efecto del acoplamiento atmósfera-océano y del uso de alta resolución en modelos climáticos regionales.
- **Lugar de celebración:** Albacete (España)
- **Tipo de Participación:** presentación de póster
- **Fecha:** 7 de noviembre
- **Institución Organizadora:** Escuela internacional de Doctorado de la Universidad de Castilla La Mancha.

XXXV Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española (marzo 2018)

- **Autores:** Jesús Gutiérrez, Juan Jesús González-Alemán, Miguel Ángel Gaertner.
- **Título:** Evolución futura de los ciclones con características tropicales en la Cuenca Mediterránea: efecto de utilizar modelos de alta resolución o con acoplamiento atmósfera-océano.
- **Lugar de celebración:** León (España)
- **Tipo de Participación:** presentación oral
- **Fecha:** 5 al 7 de marzo
- **Institución Organizadora:** Asociación Meteorológica Española (AME).

European Geosciences Union General Assembly 2018 (abril 2018)

- **Autores:** Jesús Gutiérrez, Juan Jesús González-Alemán, Miguel Ángel Gaertner.

- **Título:** Future evolution of cyclones with tropical characteristics in the Mediterranean basin: effect of atmosphere-ocean coupling and high resolution.
- **Lugar de participación:** Vienna (Austria)
- **Tipo de participación:** presentación de póster.
- **Fecha:** 8-23 de abril.
- **Institución organizadora:** European Geosciences Union (EGU)

I Jornada científica para estudiantes del Departamento de Ciencias Ambientales.
(abril 2018).

- **Autores:** Jesús Gutiérrez, Juan Jesús González-Alemán, Miguel Ángel Gaertner.
- **Título:** Evolución futura de los ciclones con características tropicales en la Cuenca Mediterránea: efectos de utilizar modelos de alta resolución o con acoplamiento atmósfera-océano.
- **Lugar de participación:** Toledo.
- **Tipo de Presentación:** presentación oral.
- **Fecha:** 26 de abril.
- **Institución organizadora:** Departamento de Ciencias Ambientales (UCLM).

VIII Jornadas Doctorales de la UCLM (octubre 2018)

- **Autores:** Jesús Gutiérrez, Miguel Ángel Gaertner, Juan Jesús González-Alemán.
- **Título:** Evolución futura de los ciclones con características tropicales en la cuenca mediterránea: Efectos de utilizar modelos de alta resolución.
- **Lugar de celebración:** Cuenca (España)
- **Tipo de Participación:** presentación de póster
- **Fecha:** 16 de octubre
- **Institución Organizadora:** Escuela internacional de Doctorado de la Universidad de Castilla La Mancha.

XI Congreso internacional de la Asociación Española de Climatología. (octubre 2018)

- **Autores:** Jesús Gutiérrez, Juan Jesús González-Alemán, Miguel Ángel Gaertner.
- **Título:** Evolución futura de los ciclones con características tropicales en la cuenca mediterránea: efectos de utilizar modelos de alta resolución o con acoplamiento atmósfera-océano.
- **Lugar de celebración:** Cartagena (España)
- **Tipo de Participación:** presentación oral

- **Fecha:** 17 al 19 de octubre
- **Institución Organizadora:** Asociación Española de Climatología (AEC).

IV Jornadas de investigación de la Universidad Rey Juan Carlos (marzo 2019)

- **Autores:** Jesús Gutiérrez, Juan Jesús González-Alemán, Alba de la Vara Fernández, Miguel Ángel Gaertner.
- **Título:** Evolución futura de los ciclones con características tropicales en la cuenca mediterránea (medicanes): efectos de utilizar modelos de alta resolución.
- **Lugar de celebración:** Alcorcón (España)
- **Tipo de Participación:** presentación oral
- **Fecha:** 4 al 5 de marzo
- **Institución Organizadora:** Universidad Rey Juan Carlos (URJC).

European Geosciences Union General Assembly 2019 (abril 2019)

- **Autores:** Jesús Gutiérrez, Juan Jesús González-Alemán, Alba de la Vara Fernández, Miguel Ángel Gaertner.
- **Título:** Impact of ocean-atmosphere coupling in horizontal resolution on future projection of Medicanes in the Mediterranean Sea.
- **Lugar de participación:** Vienna (Austria).
- **Tipo de participación:** presentación de póster.
- **Fecha:** 7-12 de abril.
- **Institución organizadora:** European Geosciences Union (EGU)

European Geosciences Union General Assembly 2019 (abril 2019)

- **Autores:** Juan Jesús González-Alemán, Salvatore Pascale, Jesús Gutiérrez-Fernández, Hiroyuki Murakami, Miguel Ángel Gaertner and Gabriel Vecchi.
- **Title:** Mediterranean hurricane activity potentially become more hazardous with global warming.
- **Lugar de participación:** Vienna (Austria)
- **Tipo de participación:** presentación oral.
- **Fecha:** 7-12 de abril.
- **Institución organizadora:** European Geosciences Union (EGU)

IX Jornadas Doctorales de la UCLM (noviembre 2019)

- **Autores:** Jesús Gutiérrez Fernández, Juan Jesús González-Alemán, Miguel Ángel Gaertner Ruiz Valdepeñas y Alba de la Vara Fernández.
- **Título:** Impact of ocean-atmosphere coupling in horizontal resolution on future projection of Medicanes in the Mediterranean Sea

- **Lugar de participación:** Ciudad Real (España)
- **Tipo de participación:** presentación de póster.
- **Fecha:** 12 de noviembre.
- **Institución organizadora:** Escuela internacional de Doctorado de la Universidad de Castilla La Mancha.

MedCORDEX Flagship Pilot Study workshop (marzo 2021)

- **Autores:** Jesús Gutiérrez Fernández
- **Título:** Use of high resolution coupled models for future climate projections of medicanes.
- **Lugar de la presentación:** Workshop online.
- **Tipo de participación:** presentación oral
- **Fecha:** 30 de marzo
- **Institución organizadora:** MedCORDEX

Publicaciones

Gutierrez-Fernandez, J., González-Alemán, J.J. & Gaertner, M.A., (2018). “Evolución futura de los ciclones con características tropicales en la Cuenca Mediterránea: efectos de utilizar modelos de alta resolución o con acoplamiento atmósfera-océano. Acta de las Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española, nº35, 451-457. DOI: <https://doi.org/10.30859/ameJrCn35p451>.

Gutierrez-Fernandez, J., González-Alemán, J.J., de la Vara, A. & Gaertner, M.A., . "Evolución de los Ciclones con Características Tropicales en la Cuenca Mediterránea: efectos de utilizar modelos de Alta resolución o con acoplamiento atmosfera-océano”. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC), Serie A, nº11, 315-322. ISBN: 978-84-7837-098-6.

Alemán, J. J. G., Pascale, S., & Fernandez, J. G. (2019). Potential Increase in Hazard From Mediterranean Hurricane Activity With Global Warming Geophysical Research Letters. 2, 1–11. <https://doi.org/10.1029/2018GL081253>

Gutiérrez-Fernández, J., González-Alemán, J. J., de la Vara, A., Cabos, W., Sein, D. v., & Gaertner, M. Á. (2021). Impact of ocean–atmosphere coupling on future projection of Medicanes in the Mediterranean sea. International Journal of Climatology, 41(4), 2226–2238. <https://doi.org/10.1002/joc.6955>

de la Vara, A., Gutiérrez-Fernández, J., González-Alemán, J. J., & Gaertner, M. (2021). Characterization of medicanes with a minimal number of geopotential levels. International Journal of Climatology, 41(5), 3300–3316. <https://doi.org/10.1002/joc.7020>