



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA Y LOS OCÉANOS

**Variabilidad espacial y temporal de la ocurrencia de eventos  
extremos de precipitación en la Región Tropical Húmeda del Caribe  
de Costa Rica, Centroamérica**

Tesis presentada para optar por el título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires en el área de  
Ciencias de la Atmósfera y los Océanos

**Lic. Ricardo Alonso Orozco Montoya**

Directora de tesis: Dra. Olga C. Penalba

Consejera de estudios: Dra. María I. Gassmann

Lugar de trabajo: Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias  
Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires

Buenos Aires, 2023

# Variabilidad espacial y temporal de la ocurrencia de eventos extremos de precipitación en la Región Tropical Húmeda del Caribe de Costa Rica, Centroamérica

## Resumen

Este trabajo de tesis propone mejorar el conocimiento de la variabilidad espacio temporal de la precipitación y de sus eventos extremos y los mecanismos físicos responsables de dicha variabilidad en la Región Tropical Húmeda del Caribe (RTHC) de Costa Rica en Centroamérica. Adicionalmente, se analizaron los eventos extremos de precipitación asociados al banano y las proyecciones futuras de la precipitación mensual y de los eventos extremos. Para ello, se utilizaron series de precipitaciones diarias de 28 estaciones meteorológicas en periodos comunes (1985-2009 y 1997-2019) y un análisis de series largas entre 35 y 78 años, sometidas a un control de calidad y de consistencia. Se identificaron las principales características espacio-temporales de la precipitación, observándose en términos generales, los máximos valores sobre la cordillera y los mínimos en la costa. Se analizó la influencia de tres forzantes: el Niño Oscilación del Sur (ENSO), la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) y el Dipolo del Océano Índico (IOD) en los patrones espacio-temporales de la lluvia. ENSO es el que más señal presenta en la RTHC, asociado a mayores (menores) precipitaciones en su fase El Niño (La Niña), brindando condiciones ideales para la producción de banano. Sin embargo, presenta alta probabilidad de déficit en algunos meses como septiembre, o excesos de lluvia en noviembre y diciembre, perjudicial para las plantaciones bananeras. Se analizaron proyecciones futuras de precipitación en dos horizontes de tiempo 2040-2069 (futuro cercano) y 2070-2099 (futuro lejano) utilizando modelos climáticos regionales (RCMs) de CORDEX-CORE para el escenario de emisiones RCP8.5, y para dos meses críticos en el cultivo de banano: septiembre y diciembre, resultando que aunque hay incertidumbre en las proyecciones futuras, septiembre (diciembre) posee en general, señales de aumento (reducción), siendo positivas para las plantaciones de banano.

**Palabras clave:** eventos extremos de precipitación; Caribe; plantaciones bananeras; modelado climático regional; ENSO.

# Spatial and temporal variability of the occurrence of extreme precipitation events in the Moist Tropical Caribbean Region of Costa Rica, Central America

## Abstract

This thesis work aims to improve the knowledge of the spatio-temporal variability of precipitation and its extreme events and the physical mechanisms responsible for such variability in the Moist Tropical Caribbean Region (MTCR) of Costa Rica in Central America. In addition, extreme precipitation events associated with bananas and future projections of monthly precipitation and extreme events were analysed. For this purpose, daily rainfall series from 28 meteorological stations in common periods (1985-2009 and 1997-2019) and an analysis of long series between 35 and 78 years, subjected to a quality and consistency control, were used. The main spatio-temporal characteristics of precipitation were identified, showing in general terms maximum values over the mountain range and minimum values on the coast. The influence of three forcings were analysed: the El Niño Southern Oscillation (ENSO), the North Atlantic Oscillation (NAO) and the Indian Ocean Dipole (IOD) on the spatio-temporal patterns of rainfall. ENSO has the strongest signal in the RTHC, associated with higher (lower) rainfall in its El Niño (La Niña) phase, providing ideal conditions for banana production. However, it presents a high probability of deficit in some months such as September, or excess rainfall in November and December, detrimental to banana plantations. Future rainfall projections for two-time horizons 2040-2069 (near future) and 2070-2099 (far future) were analysed using CORDEX-CORE regional climate models (RCMs) for the RCP8.5 emissions scenario, and for two critical months for banana cultivation: September and December. The result is that although there is uncertainty in future projections, September (December) generally shows signs of increase (reduction), being positive for banana plantations.

**Keywords:** extreme rainfall events; Caribbean; banana plantations; regional climate modelling; ENSO.

*I am a true born Costa Rican!*

*You really want to have to fun*

*just come to Limón.*

*You can play the domino*

*the best we have in the town...*

***"True Born Costa Rican"***

*Geelferd A. Bantan Drowon 'El Charro Limonense'*

***Calypso Caribeño Costarricense***

*A Mami y Papi,  
a mis hermanos María José y Marco...*

*... la paciencia todo lo alcanza...*

*"Nada te turbe"*

*Santa Teresa de Jesús (1515-1582)*

# Agradecimientos

A Dios, porque en sus sendas me regaló esta etapa de vida y un segundo hogar en Argentina.

A mis papás y mis hermanos (María José y Marco). Me han apoyado siempre, son incondicionales y me enseñaron a luchar por mis sueños. Soportaron mi ausencia y me esperaron cada año con los brazos abiertos y mi habitación intacta. A ustedes les debo todo.

A la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA) y a la Escuela de Ciencias Geográficas, por confiar en mí y dejarme tener esta hermosa oportunidad de crecimiento personal y profesional. A la Junta de Becas de la UNA, por financiar el doctorado y apoyarme en los temas logísticos. A mis mentoras académicas Ligia Hernando, Alice Brenes y Lidia Orias.

A la Universidad de Buenos Aires, por acogerme como su estudiante, especialmente a la comunidad del DCAO, por ser mi segunda casa en estos años. Por tantos aprendizajes, no solo académicos, sino también de compañerismo, de apoyo mutuo y de bien común.

A Olga, por aceptar ser mi directora de tesis y aventurarse a investigar conmigo el clima tropical del Caribe de Costa Rica. Por sus múltiples consejos, su guía y acompañamiento. Me brindó su comprensión, empatía y cariño maternal. Por transmitir sus ideas y sugerencias desde el amor. Por ayudarme a crecer y ser la luz en los momentos donde vi oscuridad.

A Vanesa, por sus aportes tan claros y concisos para parte de esta tesis, por tomarse el tiempo de leer y enviar sugerencias y por su contribución desinteresada para la presentación. A Marisa, mi consejera de estudios, por sus recomendaciones y avales. A la subcomisión de doctorado-DCAO.

A don Luis Fernando Alvarado, del IMN, por sus especiales consejos para la investigación y su apoyo para obtener los datos necesarios. A los doctores Erick Alfaro y Hugo Hidalgo del CIGEFI-UCR por sus apreciaciones para la tesis y en especial a don Erick por su aliento al empezar este proceso doctoral y por su tiempo al escucharme cada vez que iba Costa Rica. Al jurado por aceptar de buen grado leer este trabajo y sus valiosas sugerencias. A José Antonio Guzmán, por su apoyo y gestión logística en la pasantía realizada en CORBANA, por brindarme los datos necesarios y la información técnica relativa a las plantaciones de banano. A Tatiana González del centro de documentación de CORBANA, por su disposición en el envío de información.

A los amigos que me regaló Argentina y se convirtieron en mi familia, que me escucharon y consolaron, que lloraron y rieron conmigo, que me celebraron los cumpleaños y que me han hecho pasar 5 años maravillosos en Argentina. A Rebeca, una profunda amiga y hermanos separados al nacer (como dice ella) que me regaló este camino doctoral. Siendo ambos ticos, el destino nos cruzó en Buenos Aires e hizo que floreciera esta amistad incondicional. A Matías, que tuve la dicha de conocer y de compartir tantas similitudes. Un amigo y hermano, lleno de amor para dar, comprensivo y empático, siempre dispuesto a ayudar. A Agustina, mi compañera de oficina, que siempre me alentó a seguir, se alegró y entristeció conmigo, me escuchó con detalle y comprensión. A Dailin, mi amiga venezolana, por preocuparse por mí, por buscarme y acompañarme, por su alegría, por enseñarme a hacer arepas y porque con sus ocurrencias y sabor tropical, me hacía sentir en casa. A Germán, mi *personal trainer*, que se convirtió en un amigo especial en las charlas cada día al entrenar. A Flor, Sol y Dai, compañeras de oficina, que siempre con una sonrisa y con un trato amoroso me apoyaron, me explicaron, me enseñaron a tomar mate y compartimos salidas. A las chicas del DCAO: Ro, las Pau, Euge, Mechi, Gime y Melu, por estar siempre e incluirme en las actividades. A Michelle, la mejor compañera de viaje. Dulce, Luchito, Ro, Vale y Petri, por ese viaje hermoso que compartimos en Bolivia y por su amistad.

A mis amigos de Costa Rica, que aunque la distancia y el tiempo nos separó, siempre me esperaron cada año. Gracias por su apoyo y frescura. A Daniela, mi mejor amiga, que nos alentamos mutuamente para doctorarnos. A Fabiola y Luis, seres sinceros y que expresan su amor con facilidad y dulzura. A Paul, Lidia, Vero y Marcelo. A David, un amigo muy especial.

A mi hermana María José y a mi estudiante de licenciatura en geografía José Ignacio Alvarado, por su apoyo en los diseños de algunos diagramas ilustrativos para este trabajo de tesis. A mis vecinas del edificio, Stella y Luli, que fueron otras madres para mí.

A la Argentina que me ha dado tanto y que amo como mi segunda patria. Me abrió sus puertas, me acogió como uno más, me hizo crecer como ser humano, me mostró su majestuosidad y sus maravillas. Me mostró a su gente, su sufrimiento y su entusiasmo, su alegría, su pasión por el fútbol y el mate, sus colores, su tango, sus cordilleras y cataratas, la pampa húmeda, la Patagonia y sus glaciares. El vino, las medialunas, el asado, el locro... Gracias Argentina, por tanto.

A mi Costa Rica, tierra bendita donde tuve el privilegio de nacer. Gracias por forjarme, por prepararme y por crecer en tus valles. Gracias por creer en mi y darme la dicha de volver.

# Acrónimos

AMM: Modo meridional del Atlántico

AMO: Oscilación multidecadal del Atlántico

AR6: Sixth Assessment Report

CATIE: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza

CAM: Centroamérica, México y el Caribe

CJ: Corriente en chorro del Chocó

CLLJ: Corriente en chorro en niveles bajos del Caribe

CMIP: proyectos de intercomparación de modelos acoplados

CN: Caribe norte

CNE: Comisión nacional de prevención de riesgos y atención de emergencias

CORBANA: Corporación Bananera Nacional

CORDEX: Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment

CORE: Coordinated Output for Regional Evaluation

CPC: Centro de predicción climática

CS: Caribe sur

DCC: Dirección de Cambio Climático

DMI: Índice del modo dipolar del Índico

ENSO: El Niño-Oscilación del Sur

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

ICE: Instituto Costarricense de Electricidad

IMN: Instituto Meteorológico Nacional

INEC: Instituto Nacional de Estadística y Censo

IOD: Dipolo del océano Índico

IPCC: Panel Intergubernamental de Cambio Climático

ITCZ: Zona de convergencia intertropical

GCM: Modelos climáticos globales

MIDEPLAN: Ministerio de Planificación y Política Económica

MINAE: Ministerio de Ambiente y Energía

MSD: Sequía de mediados de verano  
NAO: Oscilación del Atlántico norte  
NAOI: Índice de la oscilación del Atlántico norte  
NASH: Alta subtropical del Atlántico norte  
NE: Norte oriental (noreste)  
NO: Norte occidental (noroeste)  
NOAA: Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica  
ONI: Índice oceánico de El Niño  
PDO: Oscilación decadal del Pacífico  
PROCOMER: Promotora de Comercio Exterior de Costa Rica  
RB: Región bananera  
RCM: Modelos climáticos regionales  
RCP: Representative Concentrations Pathways  
RTHC: Región tropical húmeda del Caribe de Costa Rica  
SEPSA: Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria  
SST: Temperatura superficial del mar  
UNDRR: Oficina de la Naciones Unidas para la reducción del riesgo de desastres  
VC: Vertiente del Caribe  
VP: Vertiente del Pacífico  
WMO: Organización Meteorológica Mundial

# Índice

Resumen .....	II
Abstract.....	III
Agradecimientos .....	VI
Acrónimos .....	VIII
Prefacio .....	XII
<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1. Variabilidad de la precipitación en la vertiente del Caribe.....	1
1.2. Importancia del sector agrícola en la RTHC.....	7
1.3. Modelado climático y proyecciones futuras de la precipitación en la RTHC.....	9
1.4. Justificación e importancia del estudio .....	13
1.5. Objetivos y estructura de la tesis.....	16
<b>2. Datos, índices y modelos climáticos .....</b>	<b>18</b>
2.1. Base de datos.....	19
2.1.1. Conformación de la base de datos .....	19
2.1.2. Control de calidad de la base de datos.....	22
2.1.3. Periodos en común seleccionados.....	23
2.2. Índices climáticos utilizados.....	27
2.3. Modelos climáticos regionales.....	32
2.3.1. Selección de modelos climáticos regionales.....	32
2.3.2. Delimitación del área de estudio y periodo .....	34
<b>3. Variabilidad espacio-temporal y eventos extremos de precipitación.....</b>	<b>37</b>
3.1. Introducción .....	38
3.2. Metodología.....	40
3.2.1. Valores medios mensuales, estacionales y extremos.....	40
3.2.2. Estimación de las tendencias .....	41
3.2.3. Análisis de series de precipitación con periodos más extensos .....	42
3.3. Resultados.....	46
3.3.1. Climatología de la precipitación en diferentes escalas temporales .....	46
3.3.2. Climatología de los eventos extremos de precipitación .....	51
3.3.3. Análisis de tendencias.....	56
3.3.4 Variabilidades temporales-estacionales en las series con periodos más extensos.....	61

3.4. Discusión y conclusiones.....	76
<b>4. Mecanismos físicos y variabilidad de la precipitación mensual .....</b>	<b>80</b>
4.1. Introducción.....	81
4.2. Metodología.....	85
4.3. Resultados.....	86
4.3.1. Correlaciones entre índices y precipitaciones mensuales.....	87
4.3.2. Señales mensuales coincidentes entre mecanismos.....	94
4.3.3. Composites de las anomalías de precipitación mensual según fases del ENSO .....	98
4.4. Discusión y conclusiones .....	101
<b>5. Impactos de los eventos extremos de precipitación en el sector agrícola: énfasis en plantaciones de banano .....</b>	<b>107</b>
5.1. Introducción.....	108
5.2. Metodología.....	112
5.3. Resultados.....	114
5.3.1. Probabilidades mensuales de precipitación según umbrales fijos .....	114
5.3.2. Comportamiento espacial de los eventos extremos de precipitación en meses críticos	120
5.3.3. Distribución espacial de las probabilidades de precipitación óptimas .....	123
5.3.4. Probabilidad de eventos extremos de precipitación según las fases del ENSO .....	125
5.3.5. Sistematización de impactos registrados en las plantaciones de banano y fases del ENSO 1970-2021 .....	128
5.4. Discusión y conclusiones.....	131
<b>6. Proyecciones futuras de la precipitación mensual y eventos extremos.....</b>	<b>136</b>
6.1. Introducción.....	137
6.2. Metodología.....	140
6.3. Resultados.....	142
6.3.1. Validación de los valores medios y extremos de la precipitación .....	142
6.3.2. Proyecciones futuras de la precipitación mensual y eventos extremos según modelo...	150
6.4. Discusión y conclusiones.....	157
<b>7. Reflexiones Finales y trabajo futuro .....</b>	<b>161</b>
7.1. Reflexiones finales .....	161
7.2. Trabajo futuro.....	166
<b>Bibliografía.....</b>	<b>168</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>190</b>
Anexo 1: Principales patrones de circulación en Centroamérica .....	190

Anexo 2: Metodología de composites.....	192
Anexo 3: Características del cultivo de banano y su producción.....	193
Anexo 4: Composites de la precipitación mensual según fases del ENSO.....	200

## Prefacio

Este trabajo de tesis fue llevado a cabo en el Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO), parte de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires (FCEN-UBA) bajo la supervisión de la Dra. Olga C. Penalba y con la Dra. María I. Gassmann como consejera de estudios. El trabajo de investigación se inició en febrero de 2019 financiado por una beca doctoral de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA) como parte del Plan de fortalecimiento y estabilidad laboral de la Escuela de Ciencias Geográficas (ECG) de esta casa de estudios. El primer objetivo específico desarrollado en esta tesis, se encuentra plasmado parcialmente en la siguiente publicación de revista científica de alto impacto relacionada con las ciencias atmosféricas:

- Orozco-Montoya, R. A., y Penalba, O. C. 2023. Spatial and temporal rainfall variability in the Caribbean coast of Costa Rica. *Theoretical and Applied Climatology*, **151**, 1585–1599, doi:10.1007/s00704-022-04342-8.

Adicionalmente, parte del trabajo relacionado con esta tesis se ve reflejado en presentaciones en conferencias científicas y congresos nacionales e internacionales. Una de esta presentaciones ha sido premiada en el 2022. Asimismo, a lo largo de estos años, la formación científica y experiencia se completó con la asistencia a una escuela de verano de dos semanas en el International Centre for Theoretical Physics (ICTP) en Trieste, Italia, bajo la temática: “Theory, Mechanisms and Hierarchical Modeling of Climate Dynamics: Tropical Oceans, ENSO and their teleconnections”. Además se realizó una pasantía de investigación de un mes y medio en la Corporación Bananera Nacional (CORBANA) en el 2022 bajo la supervisión del MSc. José Antonio Guzmán, con el fin de desarrollar el tercer objetivo específico de esta tesis doctoral.

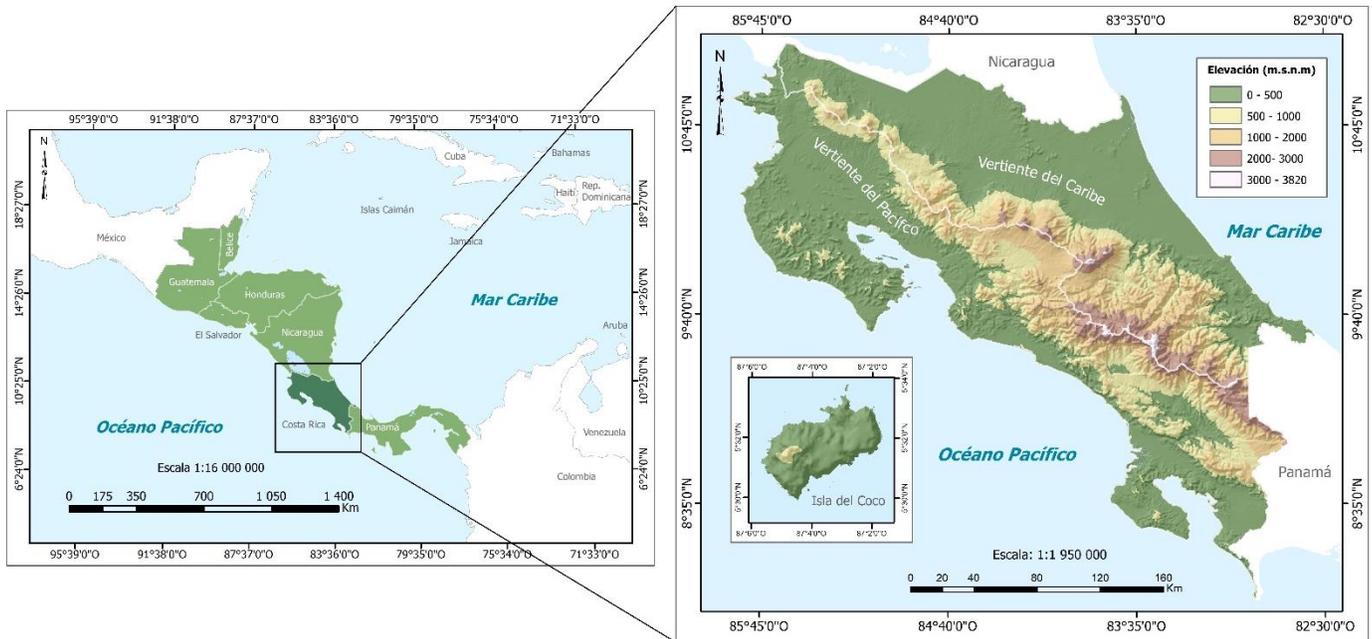
# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Variabilidad de la precipitación en la vertiente del Caribe

Costa Rica está localizada en el istmo centroamericano, estratégicamente situado entre el Océano Pacífico (al oeste) y el Mar Caribe (al este). Su característica climática más relevante es la precipitación. La orientación noroeste-sureste del sistema montañoso divide al país en 2 vertientes, Caribe y Pacífico, y determina las particularidades de la distribución de la lluvia (Manso et al. 2005). Esta misma disposición montañosa, junto con los vientos predominantes del noreste (Alisios), demarcan 3 grandes regiones climáticas distintas: la región tropical húmeda del Caribe, la región central intermontana y la región tropical del Pacífico (Solano y Villalobos, 2001).

La región de estudio de esta investigación es la región tropical húmeda del Caribe (RTHC, aproximadamente entre 9–11° N y 82–86° O), localizada en la vertiente del Caribe (VC) y cubre casi la mitad del territorio nacional (23 130 km<sup>2</sup>) (Figura 1.1). Aproximadamente, el 20% de la población total de Costa Rica se ubica en esta región y posee 3 de los cantones (municipios) con la mayor tasa de crecimiento anual del país entre 2011-2022 (INEC, 2023). La actividad agropecuaria y portuaria, la generación de energía hidroeléctrica y el turismo son las principales actividades económicas en la región. En ella se ubican el principal puerto comercial del país (Moín) y la planta hidroeléctrica más grande de Centroamérica (Reventazón) (Mideplan, 2014; Echeverría et al. 2017; Quesada y Waylen, 2020; Piedra-Castro et al. 2021). Los bosques tropicales húmedos dominan la costa caribeña, mientras que extensos pastizales para la ganadería, plantaciones bananeras y cultivos de piña, entre otros, conforman el paisaje agropecuario (McClearn et al. 2016).



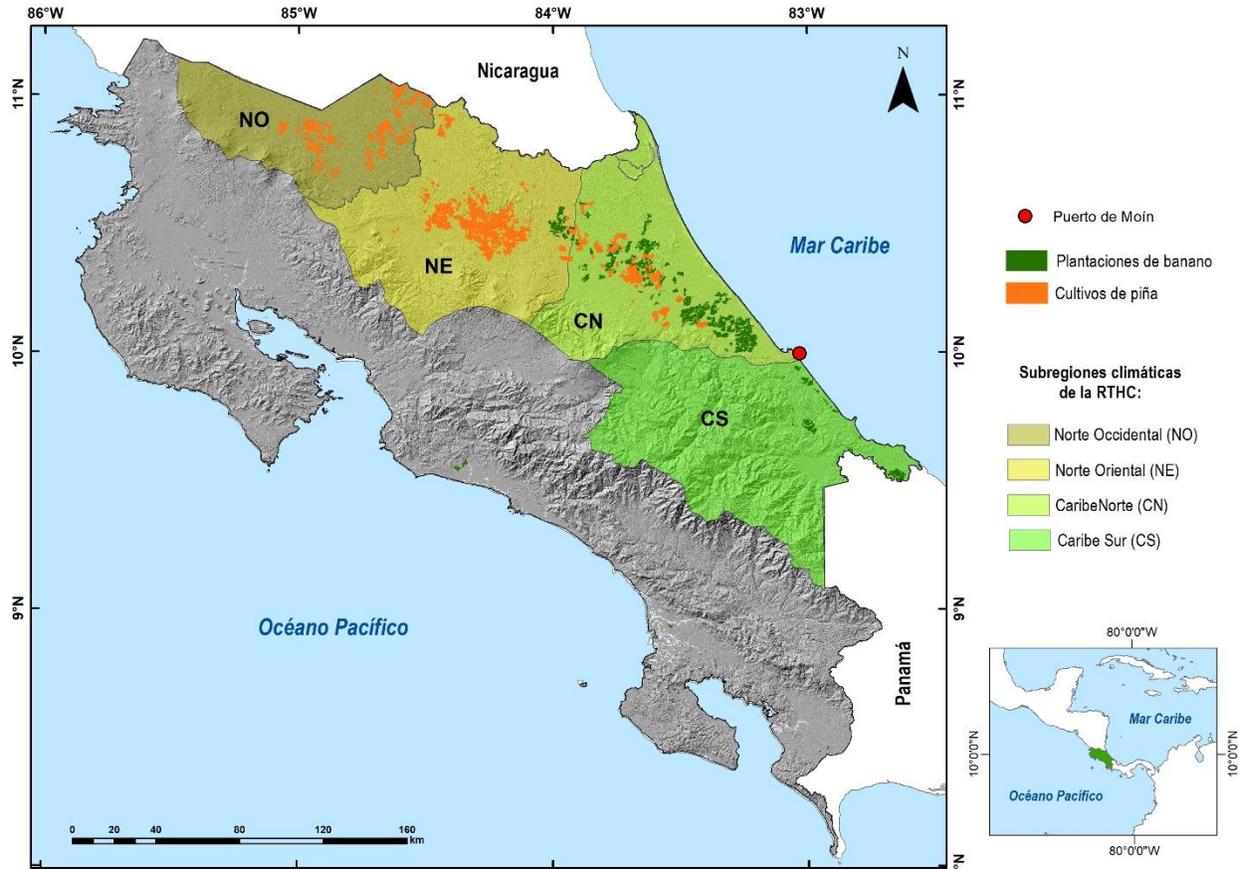
**Figura 1.1.** Localización de Costa Rica en el istmo centroamericano y su contexto regional (izquierda). División de vertientes del país de acuerdo con la disposición del sistema montañoso (derecha). La línea blanca representa la divisoria de las 2 vertientes (Caribe y Pacífico) y los colores corresponden a la elevación en metros sobre el nivel del mar (msnm).

La RTHC posee un clima húmedo durante todo el año, sin una estación seca definida. Las lluvias son casi invariables entre enero y mediados de octubre, con acumulaciones típicas de entre 180 y 300mm por mes. A partir de mediados de octubre se produce un marcado aumento de la acumulación de lluvias hasta el final del año (Taylor y Alfaro, 2005). La RTHC se subdivide en 4 subregiones climáticas en sentido noroeste-sureste: norte occidental (NO), norte oriental (NE), Caribe norte (CN) y Caribe sur (CS) (Figura 1.2).

La distribución espacio-temporal de las precipitaciones en la RTHC está influenciada por diversos forzantes desde la gran escala hasta la escala regional. Las precipitaciones en la región aumentan hacia el este, con máximos en la subregión del CN y mínimos en la NO y el CS (Figura 1.2). Aunque la región carece de una estación seca definida, en las zonas costeras de las subregiones CN y CS se pueden definir 2 periodos de disminución significativa de las precipitaciones en marzo-abril (150mm en promedio) y en septiembre-octubre (300mm en promedio) (Alfaro, 2002; Sáenz y Amador, 2016; Alfaro e Hidalgo, 2021; Alfaro et al. 2024). El primer periodo está en fase con la estación seca de la vertiente del Pacífico (VP), sin

embargo el segundo coincide con el período más lluvioso de dicha vertiente. Por otro lado, en la VC, se pueden precisar 2 periodos lluviosos intercalados entre los periodos de disminución, siendo el primero, de noviembre a febrero (el más lluvioso), y el segundo se caracteriza por un máximo en julio, el cual coincide con el veranillo de la VP. Los meses más lluviosos en la VC son julio y diciembre, y los más secos son marzo y septiembre. En las subregiones NO y NE, solo se produce un mínimo relativo de la precipitación en los meses de marzo y abril, siendo el resto del año lluvioso. En el CN y CS, el mes más lluvioso es diciembre (Manso et al. 2005). De la mano con lo anterior, la clasificación climática realizada por Pérez-Briceño et al. (2017) indica que la región presenta una variación espacial importante, siendo cálido subhúmedo con escasas precipitaciones en el noroeste, muy húmedo en la zona litoral norte y menos húmedo y más cálido con lluvia moderada en el litoral del Caribe Sur, hasta un clima excesivamente húmedo y frío en la cordillera.

La región se encuentra expuesta a extremos climáticos como los eventos extremos de precipitación, que afectan a las actividades agrícolas, la demanda energética, el trasiego de mercancías portuarias y el turismo, por lo que cumple un rol crítico en la economía regional. En particular, dadas las características físicas de los suelos en la región (texturas arcillosas y estructura pobre) y su abundante red hídrica (Ortiz-Vega et al. 1999), los eventos extremos de precipitación ocasionan el desborde de los cauces de los ríos y eventos severos de inundación, causando pérdidas humanas y materiales (Orozco-Montoya et al. 2022).



**Figura 1.2.** Delimitación de la RTHC y sus 4 subregiones climáticas. El círculo en rojo representa al Puerto de Moín (principal puerto comercial del país), los polígonos en verde oscuro corresponden a las plantaciones de banano, y los polígonos en anaranjado a los cultivos de piña en la RTHC.

Respecto a los principales forzantes en la región, en términos generales, la precipitación se asocia principalmente a la interacción de la topografía local con los vientos alisios que soplan en dirección noreste-suroeste, asociados al anticiclón del Atlántico Norte ([Amador, 2008](#)). Dicha interacción, induce variaciones climáticas espaciales que pueden conducir a comportamientos opuestos entre las vertientes del Pacífico y del Caribe ([Quesada y Waylen, 2020](#)). Otro sistema que también afecta las lluvias en la región es el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ, por sus siglas en inglés) ([McClearn et al. 2016](#); [Maldonado et al. 2018](#); [Durán-Quesada et al. 2020](#)). A su vez, las precipitaciones extremas sobre la RTHC se ven favorecidas por la intensificación de la corriente en chorro en niveles bajos del Caribe (CLL), por sus siglas en inglés, [Amador, 1998](#)), principalmente entre julio-agosto, con un segundo pico entre enero-febrero. Esta corriente en chorro favorece el desplazamiento de las masas de aire directamente hacia la región y sobre las tierras bajas

de la VC, donde el aire húmedo se ve obligado a ascender debido a la orografía, provocando abundantes eventos de precipitación en la región (Amador, 2008; Hidalgo et al. 2015).

Los sistemas sinópticos tropicales como las ondas del este, los ciclones tropicales y el desarrollo de sistemas convectivos de mesoescala, durante la temporada de mayo a noviembre, así como las interacciones de frentes fríos provenientes de las latitudes medias durante el invierno boreal (diciembre-febrero), también influyen en el comportamiento de la precipitación en la RTHC. En síntesis, Retana (2012) indicó que los 3 fenómenos atmosféricos que causan mayor cantidad de extremos lluviosos e impactos en la región son los sistemas de bajas presiones, el impacto indirecto de huracanes del Caribe y las intrusiones de masas de aire frío (Alfaro y Pérez-Briceño, 2014; Pérez-Briceño et al. 2016).

Las variaciones en la estacionalidad de las lluvias también están relacionadas con fenómenos océano-atmosféricos, como los episodios de El Niño–Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), principal forzante de la variabilidad interanual y considerado como la máxima expresión de la variabilidad climática, con signos evidentes en la región. La señal que el ENSO genera en la RTHC, se relaciona con eventos extremos de precipitación, tanto sequías como inundaciones. En términos generales, en Costa Rica, los eventos El Niño se asocian con periodos secos prolongados en la VP y periodos lluviosos en la VC, viceversa con los eventos La Niña (Alvarado y Fernández, 2001; Manso et al. 2005; Sánchez-Murillo et al. 2017; Durán-Quesada et al. 2020). Adicionalmente, el océano Atlántico norte juega un rol en las precipitaciones de la región. Según Enfield (1996) y Alfaro et al. (1998), las anomalías de la temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés) en el Atlántico norte influyen más en el aumento de precipitaciones principalmente en julio y agosto, que el fenómeno ENSO (Maldonado et al. 2016). La investigación de Alvarado y Fernández (2001); indican que anomalías positivas (negativas) de SST sobre el Atlántico norte y el Pacífico ecuatorial están asociadas con aumentos (disminuciones) de las lluvias en la VC, es decir, cuando ambos océanos se encuentran más cálidos, se relacionan con más lluvias en la VC.

En este contexto, el rol de las SST de los océanos Pacífico y Atlántico en la región ha sido exhaustivamente estudiado (Enfield, 1996; Waylen et al. 1996; Alfaro et al. 1998; Enfield y Alfaro, 1999; Alvarado y Fernández, 2001; Maldonado et al. 2013, 2016 y 2017). Uno de los

modos de variabilidad interanual en el Atlántico que afecta las lluvias en la región, es la oscilación del Atlántico norte (NAO, por sus siglas en inglés), que revela una correlación positiva con las precipitaciones en la RTHC durante el verano boreal (junio-agosto) (Waylen et al. 1996). Por su parte, el modo meridional Atlántico (AMM; Chiang y Vimont, 2004), que mide el gradiente entre las SST del Atlántico norte y sur, influye en la actividad de los ciclones tropicales (Vimont y Kossin, 2007; Durán-Quesada et al. 2020). De manera más remota, el océano Índico juega un rol en las precipitaciones de la RTHC. La variabilidad interanual en la región Indo-Pacífica, sintetizada por el Dipolo del Océano Índico (IOD, por sus siglas en inglés) ha demostrado alteraciones en las lluvias del área de interés. Al respecto, se puede mencionar el trabajo de Saji y Yamagata, (2003), quienes indicaron que para Centroamérica, las correlaciones con las anomalías de lluvia son negativas y significativas en el trimestre de octubre a diciembre.

Existen otros forzantes con distintas escalas temporales que juegan un rol importante en el clima de la VC. Pueden mencionarse: la oscilación Madden-Julian (escala intraestacional) que modula la temporada de huracanes en el Atlántico norte y la actividad lluviosa convectiva en los trópicos (Klotzbach, 2010; Poleo et al. 2014). La oscilación decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés), se correlaciona con las anomalías de precipitación en Centroamérica. Sus fases cálidas se asocian a periodos anómalamente secos en Centroamérica (Maldonado et al. 2013; Durán-Quesada et al. 2020). Por su parte, la oscilación multidecadal del Atlántico (AMO, por sus siglas en inglés) (Delworth y Mann, 2000), se relaciona con aumentos en la actividad convectiva tropical sobre el Caribe en su fase positiva, aportando gran parte de las precipitaciones durante la estación húmeda del verano boreal (Ashby et al. 2005; Ribera et al. 2020).

El incremento en la variabilidad de la precipitación es uno de los aspectos más importantes relacionados con el cambio climático. Las precipitaciones extremas suelen provocar inundaciones, deslizamientos y otros fenómenos asociados, víctimas mortales, daños en las infraestructuras y grandes pérdidas agrícolas y socioeconómicas (WMO, 2023). El Sexto Informe de Evaluación (AR6) del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) (IPCC, 2023) informó que la frecuencia y la intensidad de las

precipitaciones intensas probablemente han aumentado en la mayoría de las regiones terrestres con una buena cobertura de observación. La identificación de estos cambios es particularmente importante para distintos sectores económicos como el agrícola. Dado que, si se puede anticipar un periodo prolongado de falta de precipitación, o por el contrario de exceso, se pueden implementar planes para minimizar el impacto de estos. Precisamente, el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) de Costa Rica, identificó en un estudio realizado en el 2011, que la RTHC es la región con mayor susceptibilidad a enfrentar eventos extremos lluviosos en el país. Además, esta región presenta una población con necesidades básicas insatisfechas y viviendas en mal estado, por lo que la convierten en la más vulnerable del país a los efectos del cambio climático (IMN, 2011).

## 1.2. Importancia del sector agrícola en la RTHC

Las características climáticas de la RTHC descritas anteriormente, aunado a la topografía plana de las llanuras caribeñas, la humedad de los suelos y su estructura física, le confieren condiciones ideales para el desarrollo agrícola y ganadero. El sector agrícola de la región se basa en cultivos de frutas y tubérculos (INEC, 2022), sobresaliendo las frutas tropicales como el banano (*Musa spp.*) y la piña (*Ananas comosus*). Ambos son los principales productos agrícolas de exportación de Costa Rica, siendo el 8% y el 7% del total de bienes exportados (PROCOMER, 2022; SEPSA, 2023). En orden de divisas generadas, el banano (US\$ 1,031.4 millones) y la piña (US\$ 1,021.3 millones) corresponden al tercer y cuarto producto de exportación a nivel nacional (INEC, 2022). Considerando que la producción nacional de estos productos se desarrolla casi en su totalidad en la RTHC (98% y 86%, respectivamente), y que la región está expuesta a eventos extremos de precipitación, es donde se acrecienta la importancia de su estudio y su rol fundamental en la economía.

La precipitación en la RTHC y los eventos extremos han tenido repercusiones importantes en el sector agrícola. Históricamente, la región ha estado expuesta a eventos de lluvias en exceso. Entre 1970 y el 2021, en la base de datos de desastres DesInventar (UNDRR, 2023),

se han registrado 2 408 efectos de desastres en la región, de los cuales el 53% corresponden a inundaciones y el 25% a lluvias intensas (78% relacionado a excesos). Del total de impactos registrados en la RTHC, 77 han afectado directamente a los cultivos de banano, donde el 73% corresponde a inundación y el 17% a lluvias intensas. Además, en los últimos 20 años (2002-2021) se reportó el 62% de los impactos (48 de 77). El estudio llevado a cabo por [Bolaños \(2019\)](#) identificó que ambas fases del ENSO impactan de manera negativa en las plantaciones de banano. Por ejemplo, en el evento El Niño 2015, entre junio-julio, se registraron disminuciones de la productividad de un 9%. En el evento La Niña, entre noviembre del 2008 y febrero del 2009, hubo una disminución del 14%. Además, las afectaciones indirectas por lluvias extremas, abarcan la infraestructura en las fincas, los caminos y las viviendas.

Según la Corporación Bananera Nacional de Costa Rica ([CORBANA \(2021\)](#)) el 98% de la producción bananera nacional para exportación se produce en la RTHC. La misma se ubica mayoritariamente en las subregiones CN y CS, y en algunas porciones de la NE, cubriendo un total de 41 622 hectáreas (2% de la RTHC). Respecto a la piña, el 86% de la producción nacional se concentra en la región, principalmente en las subregiones NO, NE y CN, para un total de 55 803 hectáreas (3% de la RTHC) ([Figura 1.2](#)). Según [TradeMap \(2022\)](#), Costa Rica se consolidó como el primer exportador de piña y el cuarto de banano (superado por Ecuador, Filipinas y Guatemala) del mundo en 2022. Sin embargo, las divisas generadas por exportaciones de banano son mayores que las de piña ([INEC, 2022](#)). La presente investigación considera ambos cultivos en el análisis de la variabilidad espacio-temporal de la precipitación ([Capítulo 3 de la tesis](#)), y luego hace énfasis en el cultivo de banano al evaluar los impactos de eventos extremos de precipitación ([Capítulo 5 de la tesis](#)).

En este contexto de evaluación de impactos, haciendo énfasis en el banano, éste se cultiva durante todo el año requiriendo un suministro constante y amplio de agua para proporcionar las condiciones óptimas a su sistema radicular poco profundo y vegetación verde permanente ([Salvación, 2020](#)). Según [Robinson y Galán-Saúco \(2010\)](#) requiere en promedio 50mm de agua a la semana y lluvias distribuidas uniformemente a lo largo del año. CORBANA indica que para la VC, los requerimientos hídricos mensuales varían entre 200 y

500mm (Guzmán y González, 2021). Los aportes menores de precipitación pueden reducir y paralizar la emisión de hojas, por lo que en casos de déficit hídrico, la instalación de sistemas de riego es prioritaria (Galán-Saúco y Robinson, 2013). Por el contrario, los aportes mayores de lluvia pueden provocar excesos de agua que se acumulan en las raíces, provocando la muerte de estas y el amarillento de las hojas, por lo que se necesitan sistemas de drenaje eficaces. La alta pluviosidad en combinación con alta humedad, pueden generar infecciones por la enfermedad de la sigatoka negra (Robinson y Galán-Saúco, 2010).

Tomando en cuenta lo anterior, se evidencia la vulnerabilidad del cultivo a los extremos de precipitación y a los cambios de la lluvia en el tiempo. Adicionalmente, los trabajos de Giorgi, (2006); Diffenbaugh y Giorgi, (2012); Baumbach et al. (2021), entre otros, han plasmado que la VC y Centroamérica, son de las regiones más expuestas al cambio climático a nivel mundial. Las mismas son consideradas como puntos calientes o “hotspots” de vulnerabilidad humana en vista del aumento previsto de las temperaturas medias y la mayor variabilidad interanual de las lluvias que se proyecta para la región. La vulnerabilidad a los extremos climáticos en la región es alta debido a la fuerte dependencia económica de la agricultura (Imbach et al. 2017). Sumado a lo anterior, un estudio realizado por Bouroncle et al. (2015), indicó que el sector agrícola de la RTHC es el más vulnerable del país a los cambios en el clima. Específicamente para el cultivo de banano, Varma y Bebbber (2019), indicaron que la producción bananera en la RTHC podría presentar disminuciones en el rendimiento de hasta un 3% para el año 2050 debido a los cambios en los regímenes de precipitación. Otro estudio realizado por la cooperación alemana (GIZ) en el 2021 (Noleppa et al. 2021), determinó que la producción de banano en la RTHC podría verse realmente afectada negativamente con la ocurrencia de eventos extremos de precipitación frente al cambio climático. Por lo tanto, surge la importancia de analizar a futuro los cambios en las precipitaciones para la región y sus implicaciones para el cultivo de banano.

### **1.3. Modelado climático y proyecciones futuras de la precipitación en la RTHC**

En vista de los cambios en los patrones de precipitación observados, y en un escenario de cambio climático, la adaptación a los eventos extremos será uno de los elementos centrales

en la política económica de la región. En países subdesarrollados y con economías frágiles, la adaptación a los cambios futuros jugará un papel fundamental. Para ello, las políticas públicas de adaptación y mitigación requieren de información sobre la posible evolución de variables meteorológicas vinculadas a diversas amenazas climáticas, como la precipitación extrema (Zscheischler et al. 2018; Orth et al. 2021; Pascale et al. 2021; Olmo et al. 2022). La adaptación óptima será aquella que se puede planificar con antelación y no la que ocurre a medida que aparecen los cambios (Betzold y Weiler, 2017; Camilloni y Barros, 2020; Hidalgo, 2021; Nawrotzki et al. 2023), disminuyendo de esta forma los costos y fortaleciendo la capacidad adaptativa de los sistemas.

A pesar de los avances significativos en la simulación del clima terrestre, a partir de los modelos climáticos globales (GCM, por sus siglas en inglés), las incertidumbres en las proyecciones climáticas futuras aún son altas. Esto se debe a diferentes aspectos desafiantes del estudio del clima, como la variabilidad propia de los modelos climáticos, las distintas parametrizaciones, los escenarios de emisiones y la propia variabilidad natural del clima (Lehner et al. 2020). La comunidad científica dedica grandes esfuerzos al desarrollo y evaluación de diferentes procedimientos de modelado con el fin de obtener una representación óptima de los mecanismos físicos del sistema climático. En este contexto, los proyectos de intercomparación de modelos acoplados (CMIP, por sus siglas en inglés), proporcionan herramientas para comprender mejor los cambios climáticos derivados de la variabilidad natural o en respuesta a cambios en el forzamiento radiativo. Las salidas de las variables meteorológicas como la precipitación diaria de los GCM típicamente presentan dificultades en la reproducción de los valores extremos. Esto se debe principalmente a su poca resolución espacial y su limitada representación de los fenómenos, destacando la necesidad de generar información climática regional para el diseño de estrategias de adaptación y mitigación al cambio climático.

Las características de la RTHC, como lo reducido de su territorio, su contexto de ubicación en el istmo centroamericano y su orografía compleja, agregan desafíos relevantes para la modelación de la precipitación y la generación de proyecciones futuras. Dado lo anterior, es necesaria la búsqueda de iniciativas que proporcionen información a una escala más

pequeña, donde la orografía y las costas puedan ser mejor representadas (Stone et al. 2003; Lynn et al. 2007). Es así como la utilización de salidas de modelos climáticos regionales (RCM, por sus siglas en inglés) cobran protagonismo en el análisis de los cambios futuros de la precipitación en la región (Castillo et al. 2018; Cavazos et al. 2019; Coppola et al. 2021). En particular, los RCMs producen una mejor representación de los mecanismos físicos involucrados en la ocurrencia de eventos de precipitación extrema que los GCMs (Rummukainen, 2010). Estos últimos, han mostrado dificultades para representar algunos forzantes de la región que influyen la ocurrencia de eventos extremos de precipitación, como los patrones de teleconexión ENSO, la ITCZ y los ciclos estacionales del CLLJ (Hidalgo y Alfaro, 2015). Estos autores ahondan en que se necesita una investigación más detallada que evalúe el desempeño específico de los modelos en una variedad de escalas de tiempo y utilizando parámetros relevantes para estas y otras características climáticas de Centroamérica. La investigación de Méndez et al. (2020), que evaluó la precipitación mensual de 5 GCMs redimensionados por 2 RCMs en el periodo 1951-1995, mostró que la capacidad de estos para reproducir la magnitud y la forma del ciclo de precipitación anual observado sobre Costa Rica, depende de la estacionalidad, la región bajo estudio, la resolución espacial y la parametrización del modelo. Si bien, los autores recomiendan el uso del modelo PRECIS por su mayor resolución, identificaron sesgos significativos entre los resultados no corregidos de los GCM-RGM y las observaciones, poniendo de relieve la necesidad de evaluar y aplicar métodos de corrección de sesgos en territorios complejos como Costa Rica antes de forzar los datos climáticos en evaluaciones del impacto del cambio climático.

El IMN en su publicación sobre las proyecciones de cambio climático regionalizadas para Costa Rica (Alvarado, 2021), utilizó el modelo PRECIS (Wilson et al. 2016) con una simulación del clima del pasado en el periodo 1951-2005, destacando que en lo referente a la precipitación, PRECIS simula un ciclo anual muy distinto al observado. Respecto a las proyecciones futuras de la precipitación en la RTHC, para el escenario de más altas emisiones (RCP8.5), PRECIS indica que es la región de mayor variabilidad, ya que presenta cambios positivos y negativos en función de la temporada y el horizonte de tiempo. Por su parte, los escenarios de precipitación presentados por Hidalgo et al. (2013) para Centroamérica,

utilizando GCMs del CMIP en su fase 3, resaltan la disminución de la precipitación para finales del siglo XXI (2077-2099). Sin embargo, los autores hacen la aclaración que para la VC de Costa Rica y Panamá las incertidumbres pueden deberse a la respuesta que puede tener la corriente en chorro de bajo nivel del Caribe ante el cambio climático ([Pérez-Briceño et al. 2017](#)).

Otras iniciativas más recientes como Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX, por sus siglas en inglés) establece lineamientos para la realización de experimentos de downscaling coordinados y consistentes sobre diferentes regiones del mundo con RCM. Estos contribuyen a los estudios de impacto y de adaptación ([Gutowski et al. 2016](#); [Castillo et al. 2018](#)) y han demostrado la gran aplicabilidad de la reducción de escala climática y su valor añadido a escalas regionales y locales ([Giorgi et al. 2009](#); [Torma et al. 2014](#); [Giorgi y Gutowski, 2015](#)). Más recientemente, los RCM de alta resolución del proyecto integrado en el marco CORDEX, el Coordinated Output for Regional Evaluation (CORE) ([Gutowski et al. 2016](#); [Giorgi et al. 2022](#)), proporcionan un conjunto homogéneo de proyecciones de alta resolución (alrededor de 25km de cuadrícula) para regiones de todo el mundo. En el caso de Centroamérica y el Caribe, CORDEX-CORE está disponible desde la región 2, llamada CAM (Centroamérica, Caribe y México), con una resolución de 22km aproximadamente (CAM-22). Varios estudios han abordado la evaluación de los RCM de CORDEX-CORE en Centroamérica, incluida la RTHC ([Sitz et al. 2017](#); [Cabos et al. 2019](#); [Cavazos et al. 2019](#); [Luna-Niño et al, 2021](#)), e indican que los modelos han mostrado mejoras en la representación de los patrones de circulación claves en la región, como la ITCZ y la reducción de los sesgos de precipitación tanto en tierra como en los océanos, y en las regiones costeras. [Méndez et al. \(2020\)](#) demostraron que, para el caso particular de Costa Rica, la mayoría de los modelos analizados mostraron un sesgo negativo (subestimación) entre diciembre y mayo en casi todo el país, pero por el contrario observaron una sobrestimación (sesgo positivo) durante la temporada de lluvias, especialmente entre septiembre y noviembre. Estos sesgos de la lluvia son consecuencia de la naturaleza altamente no-lineal y convectiva de la misma y de su gran variabilidad espacial, particularmente en regiones orográficamente complejas como las de Costa Rica.

El análisis anterior evidencia que la aplicación de métodos de downscaling y el uso de RCMs aún es emergente en la región. Existe la necesidad de examinar sus diferentes fortalezas y debilidades para comprender mejor la precipitación extrema y para afianzar el conocimiento sobre sus posibles cambios en un contexto de cambio climático. Precisamente en el AR6 (IPCC, 2023) se indica que para la región hay datos y literatura limitada y que los RCM proyectan cambios inconsistentes (Imbach et al. 2018; Kusunoki et al. 2019; Coppola et al. 2021), generando una baja confianza en comparación con el pasado reciente (1995-2014) y con la época preindustrial. No obstante, es importante aclarar que el AR6 habla de la región de América Central (SCA) como un todo, sin tomar en cuenta la diferencia entre las vertientes del Pacífico y del Caribe, lo cual también lo realizan algunos estudios. Estos resultados impiden una evaluación en cuanto al cambio observado en las precipitaciones intensas, y poco acuerdo respecto a observaciones en sequías agrícolas y ecológicas. En este contexto, se evidencia que la falta de datos y de investigación en la RTHC y Centroamérica, limitan la posibilidad de resultados más claros en cuanto a las proyecciones futuras de precipitación.

#### **1.4. Justificación e importancia del estudio**

Los eventos extremos climáticos, y su influencia sobre las actividades humanas, constituyen un tema prioritario en la adaptación y el dinamismo de las economías de los países en vías de desarrollo. Aquellos países aún dependientes de la agricultura como principal medio de ingresos, son altamente vulnerables a los cambios en las distintas variables atmosféricas. Además, esta actividad constituye un medio de vida esencial en las comunidades rurales, y en algunos casos es el único sostén económico de las familias productoras. Con el avance del conocimiento sobre estos temas y las experiencias adquiridas, el ser humano ha tomado conciencia de la importancia del estudio de los eventos extremos, debido al fuerte impacto que producen sobre el medio ambiente y las actividades económicas. Estos extremos se presentan superpuestos a las tendencias climáticas y a las variaciones interanuales de las condiciones medias. La variabilidad tanto de las condiciones medias de la precipitación como de sus eventos extremos influye sobre las condiciones hídricas del suelo, impactando en el desarrollo de los cultivos (Sörensson y Menéndez, 2011; Rivera et al. 2013; Ruscica et al.

2014; Pántano et al. 2017). No es coincidencia que la mayoría de los países latinoamericanos hayan identificado al sector agrícola como crítico y vital en sus sistemas económicos y en la gestión del desarrollo, por lo que es prioritario en los planes de adaptación al cambio climático (Prager et al. 2020; Oyhantçabal y Rodríguez, 2022). Es por eso que, en vista de las pérdidas ocasionadas por los eventos extremos de precipitación (déficits y excesos), tanto el conocimiento del comportamiento de las precipitaciones y sus eventos extremos sobre la RTHC, como el desarrollo de planes de seguimiento, prevención y alerta temprana de los mismos y el correcto planeamiento en el sector agrícola, servirán para amortiguar los impactos de esta adversidad.

En concordancia con lo anterior, la variabilidad climática observada crea condiciones que pueden superar la capacidad de adaptación de las actividades que dependen de ella, lo que puede provocar vulnerabilidad social y pérdidas económicas. El impacto de esta variabilidad en las precipitaciones sobre el ambiente y las actividades humanas, depende principalmente del cambio en la frecuencia de aparición o la intensidad de los eventos extremos. Bajo la hipótesis de que la variabilidad espacial y temporal de los eventos extremos es mayor que la de los valores medios, un conocimiento detallado de la variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones, especialmente de las extremas, permitirá evaluar mejor los forzamientos. Para abordar este tema, son necesarios estudios con datos de alta calidad enfocados en las características orográficas y climáticas de cada región.

En este contexto, es importante aclarar que existen pocos trabajos que centran su análisis en la variabilidad espacio-temporal de la precipitación y los mecanismos físicos involucrados en la RTHC. Puede mencionarse a Quesada y Waylen (2020), que analizan las series de precipitación diaria de una estación individual y con registro largo (Limón, 1949-2017); o el de Alfaro (2002), en su estudio de Centroamérica, que incluye pocas estaciones meteorológicas ubicadas en la VC durante al menos 20 años (1950-1994). También el estudio de Sáenz y Amador (2016) sobre un análisis del ciclo diurno de la precipitación en la RTHC o la clasificación climática realizada por Pérez-Briceño et al. (2017) a partir de 2 métodos para el cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP), el de Thornthwaite y Hargreaves. Además, según Zhao et al. (2023) la precipitación anual sobre la VC es más

compleja en términos de variabilidad espacial. Por tanto, este trabajo de tesis pretende aportar información climática actualizada de la variabilidad de la precipitación en la RTHC, llenando el vacío de estudios en la VC de Costa Rica y Centroamérica en general.

El conocimiento de la distribución espacial y variabilidad temporal de la precipitación y los eventos extremos, así como su relación con los forzantes externos (atmosféricos y oceánicos) ayudará a su diagnóstico y abordaje. El análisis de los forzantes, en este trabajo de tesis, se centra en la forma en que los océanos modulan la variabilidad de la precipitación en la RTHC. En particular se analizarán modos de variabilidad observados del océano Pacífico (ENSO), del Atlántico (NAO) y del Índico (IOD) y su relación con la precipitación en la RTHC. Adicionalmente, tomando en cuenta la fuerte actividad agrícola de la región, es de vital importancia comprender cómo la variabilidad de la precipitación y los eventos extremos marcan la pauta en el desarrollo de cultivos de exportación como el banano y la piña. Finalmente, bajo la hipótesis de que los efectos del cambio climático tendrían sus impactos en los eventos extremos de precipitación (según el [AR6-IPCC, 2023](#)) modificando sus características regionales de frecuencia e intensidad, entre otros parámetros, es necesario un análisis de los posibles cambios en la precipitación a fin de determinar sus posibles impactos futuros en la actividad agrícola.

En síntesis, este trabajo de tesis aporta al conocimiento de una región donde los estudios previos existentes sobre variabilidad y cambio climático han sido escasos, o bien muy generales para la región centroamericana en su totalidad, sin tener en cuenta la división de las vertientes (Pacífico y Caribe) que muestran comportamientos inversos en algunas épocas del año. Además se destaca el nivel de detalle presentado en el estudio, ya que se analizó la variabilidad espacio-temporal a escala mensual y estacional, presentando resultados inéditos sobre el comportamiento de la precipitación y su variación intrarregional. Por otra parte, estos resultados obtenidos, sirvieron para dar un aporte novedoso a una actividad socioeconómica muy dinámica en la RTHC como es el sector bananero, a través de la identificación de periodos y umbrales críticos para este cultivo. Además la metodología empleada es replicable a otros cultivos, e incluso, los resultados podrían servir de base para analizar otros sectores y sus posibles afectaciones.

## 1.5. Objetivos y estructura de la tesis

A partir de todo lo mencionado anteriormente, el presente trabajo de tesis doctoral tiene como objetivo general mejorar el conocimiento de la variabilidad espacio-temporal de la precipitación y los mecanismos físicos responsables, con énfasis en los eventos extremos, en la Región Tropical Húmeda del Caribe (RTHC) de Costa Rica, América Central. Con este fin, se proponen 4 objetivos específicos:

1. Analizar la variabilidad espacio-temporal de la precipitación y eventos extremos.
2. Identificar los mecanismos físicos responsables de la variabilidad de la precipitación mensual.
3. Caracterizar espacialmente el impacto de los eventos extremos de precipitación en el sector agrícola de la RTHC de Costa Rica.
4. Analizar las proyecciones futuras de la precipitación mensual y eventos extremos en los periodos 2040-2069 y 2070-2099 sobre la RTHC.

Con base en los objetivos anteriores, se plantean los componentes de la investigación que se sintetizan en la [Figura 1.3](#), donde, partiendo de un análisis climatológico de la RTHC, a través de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación mensual y eventos extremos, se tendrá un marco de referencia para analizar los forzantes que influyen en la ocurrencia de la precipitación en la región y de los eventos extremos. Estos impactan de manera negativa al sector agrícola, con foco en el cultivo de banano. Finalmente, las proyecciones futuras serán un insumo para la planificación en la actividad agrícola con miras a la adaptación.



**Figura 1.3.** Síntesis de los componentes de la investigación.

La tesis doctoral se estructura de forma tal de abordar los objetivos específicos a través de diferentes capítulos:

- El [Capítulo 2](#) describe los datos y el control de calidad realizado para obtener una base de datos consistida. Además, brinda información sobre los índices climáticos utilizados para el análisis de los mecanismos físicos responsables de la variabilidad de la precipitación mensual, e indica los modelos climáticos regionales utilizados para las proyecciones futuras de la precipitación.
- El [Capítulo 3](#) describe la variabilidad espacial y temporal de la precipitación anual, mensual y estacional sobre la RTHC, así como de los eventos extremos de precipitación para los periodos 1985-2009 y 1997-2019, correspondiente a la publicación científica de [Orozco-Montoya y Penalba \(2023\)](#).
- El [Capítulo 4](#) se enfoca en la revisión bibliográfica de los mecanismos físicos responsables de la variabilidad de la precipitación mensual. Inicialmente se hace una revisión de los principales forzantes y los patrones de circulación regional, luego se hace énfasis en 3 mecanismos seleccionados, uno por cada océano: Pacífico (ENSO), Atlántico (NAO) e Índico (IOD).
- El [Capítulo 5](#) presenta un análisis del impacto de los eventos extremos de precipitación sobre el sector agrícola de la RTHC, haciendo énfasis en el cultivo de banano. El análisis se basa en los percentiles 25 y 75, y en umbrales fijos de precipitación para el cultivo. Además se realiza una relación de la precipitación con el ENSO y su impacto sobre las plantaciones de banano.
- El [Capítulo 6](#) analiza las proyecciones futuras de la precipitación mensual y los eventos extremos sobre la RTHC para 2 horizontes de tiempo 2040-2069 (futuro cercano) y 2070-2099 (futuro lejano). Para ello hace uso de algunos RCMs seleccionados según su representación para el área de estudio.

## Capítulo 2

# Datos, índices y modelos climáticos

### Resumen

En este trabajo se examinaron series de precipitación diaria de inicialmente 40 estaciones meteorológicas que cubren el período más largo desde 1942 hasta 2019. Los datos fueron proporcionados por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) de Costa Rica y el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). Los controles de calidad y consistencia permitieron identificar datos faltantes en las series temporales de algunas estaciones, así como valores inconsistentes y atípicos. Tras determinar el número de datos ausentes en cada serie, se excluyeron del estudio las estaciones con más de 10 a 15% de datos diarios faltantes por cada mes. Se obtuvo como resultado una base de datos con 28 estaciones meteorológicas. El periodo común más largo abarca el periodo 1985-2009 (24 estaciones). Con el fin de cubrir una zona desprovista de estaciones en el periodo mencionado, se llevó a cabo satisfactoriamente el control de calidad a 4 estaciones con observaciones ininterrumpidas desde 1997 hasta 2019. Se plantean 3 modos de variabilidad: El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), la oscilación del Atlántico norte (NAO), y el dipolo del océano Índico (IOD). Con el fin de analizar proyecciones futuras de la precipitación, y tomando en cuenta la escala local y la orografía compleja de la región, se utilizaron los modelos climáticos regionales (RCM) de CORDEX-CORE para el dominio de Centroamérica (CAM), con una resolución de 22km. Después de una selección, se eligieron 3 RCM (18 salidas).

## 2.1. Base de datos

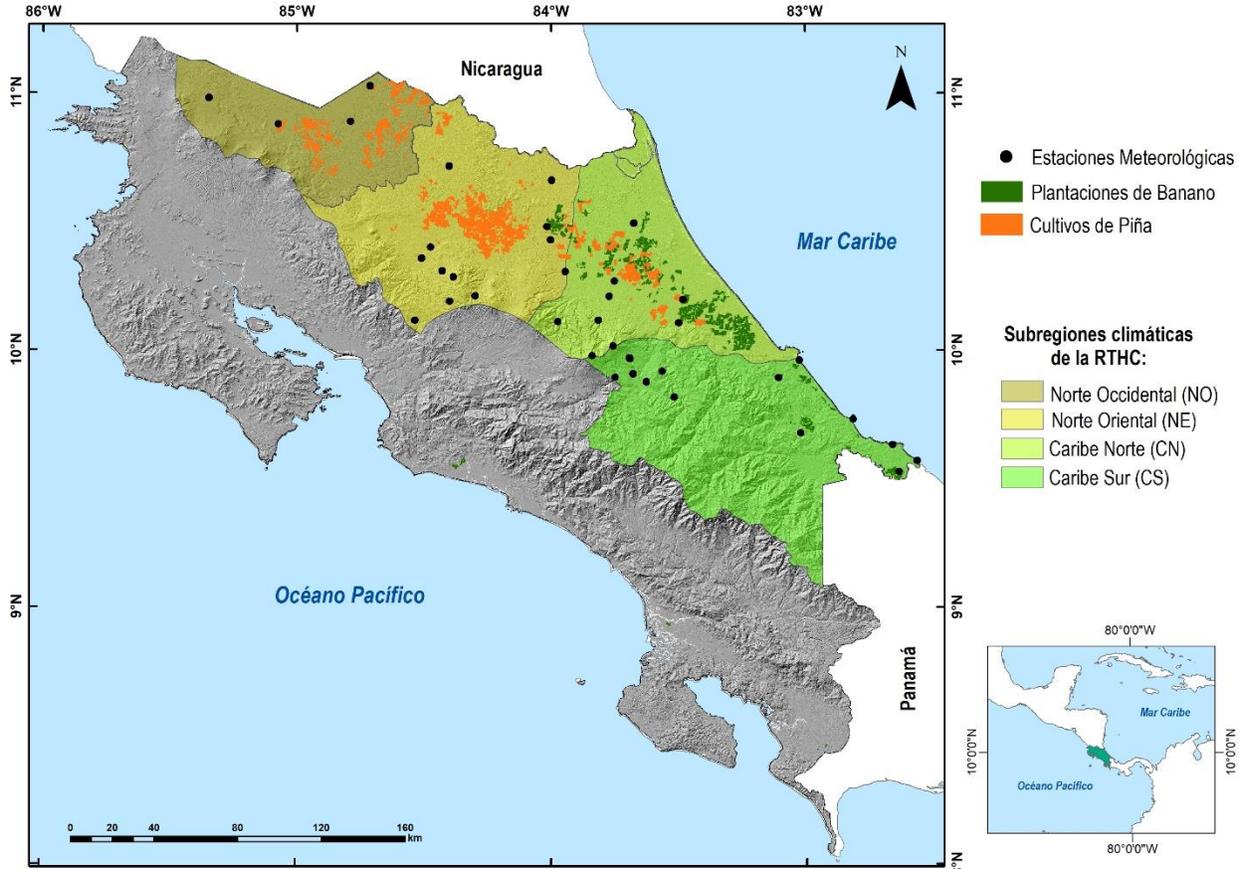
### 2.1.1. Conformación de la base de datos

Al plantear el estudio desde un enfoque climatológico, se requirió como principal condición, una base de datos completa, confiable, extensa y distribuida homogéneamente (WMO, 1966; 2017). Basado en lo anterior, la primera tarea realizada fue la obtención, análisis y selección de las estaciones meteorológicas que conformarían la base de datos para el estudio. Para ello, se solicitaron datos al Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), ambos de Costa Rica, que corresponden a las institucionales gubernamentales que poseen bases de datos históricas de estaciones.

La base de información utilizada en este estudio consiste en series de tiempo de precipitación diaria, procedentes inicialmente de 40 estaciones meteorológicas ubicadas en la Región Tropical Húmeda del Caribe (RTHC) de Costa Rica, y que cubren el período más largo desde 1942 hasta 2019 (Figura 2.1).

Al analizar estas 40 estaciones, se observó que algunas de ellas presentaron problemas en la cobertura temporal de sus registros. A partir de las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés) (Hulme et al. 1995; Morón et al. 1995), el periodo mínimo requerido es de 30 años de observaciones, ya que permite reducir la influencia de fluctuaciones climáticas naturales (Lamb y Changnon, 1988; WMO, 2004; 2006; 2017). A partir de lo expuesto, se procedió a realizar un análisis minucioso para definir las estaciones consideradas válidas para el estudio.

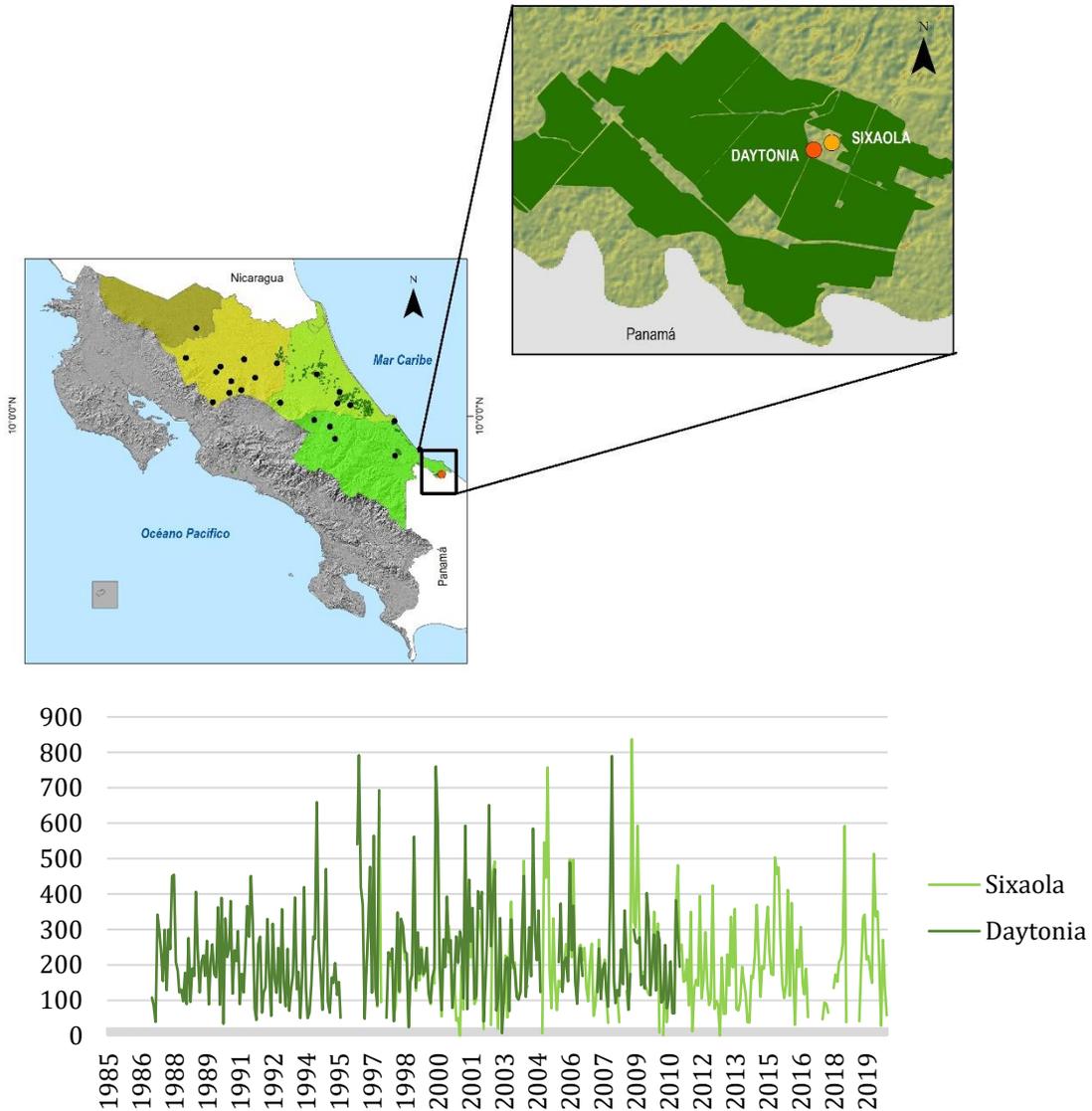
Inicialmente, se contabilizó la cantidad los datos diarios faltantes de las 40 estaciones. Dado que este estudio se realizó a escala mensual, se le permitió a cada mes que tenga entre un 10 a 15% de datos diarios faltantes. Las series de precipitación de cada estación que no cumplieron este criterio, fueron eliminadas (WMO, 2004), reduciéndose el número de estaciones a 25.



**Figura 2.1.** Ubicación geográfica de las 40 estaciones meteorológicas iniciales (círculos en negro), por subregión climática en la RTHC. Los polígonos en verde (anaranjado) representan las áreas cultivadas de banano (piña).

Seguidamente, se identificó que en el extremo sureste del área de estudio, en la subregión climática del Caribe Sur (CS), se encontraban las estaciones Daytonia (código 87003) y Sixaola (Código 87013), muy cercanas una de la otra, con una diferencia de ubicación de 365m aproximadamente y en una zona plana (Figura 2.2 arriba). La estación Daytonia posee datos desde 1987 a 2010, mientras que el registro de la estación Sixaola comprende el periodo 1997-2019. Ambas estaciones se ubican en un área prioritaria para la actividad agrícola en la región (plantaciones de banano). En este contexto, y dado que su análisis contribuirá al objetivo específico 3 de este trabajo de tesis, se llevó a cabo un análisis estadístico con el fin de evaluar la posibilidad de unir ambas series. El mismo consistió en comparar estadísticamente ambas series en el período en común entre ellas (1997-2010): parámetros robustos como la mediana (Di Rienzo et al. 2008; Gorgas et al. 2011), desviaciones estándares y valores extremos y graficarlas (Figura 2.2 abajo). Se obtuvo como

resultado, que no había diferencias significativas entre las series temporales de ambas estaciones, por lo que se fusionaron. De esta unión, se obtuvo una serie de 33 años de forma ininterrumpida (1987-2019) y se estableció el nombre de Sixaola Day para efectos de este estudio. De este modo el número de estaciones se redujo a 24 (incluyendo la estación fusionada Sixaola Day).



**Figura 2.2.** Ubicación geográfica de las estaciones Daytonia y Sixaola en el extremo Sureste de la RTHC. En la ampliación (arriba), aparecen ambas estaciones en áreas cultivadas de banano (polígonos verdes). Abajo, aparecen las series temporales de las estaciones Daytonia y Sixaola.

### 2.1.2. Control de calidad de la base de datos

Tomando como base las 24 estaciones, se llevó a cabo el control de calidad para los datos diarios de precipitación, basado en la lectura detallada de los registros y el control del formato, en el cual se verificó el orden y la completitud de las fechas. Adicionalmente se analizaron las observaciones dudosas (valores atípicos o “outliers”), posiblemente debido a una inapropiada calibración de los instrumentos de medición, errores en el registro o transcripción de los datos, recolecciones en momentos donde las condiciones ambientales pueden estar alejadas de la regularidad, entre otros (Di Rienzo et al. 2008). Los métodos robustos son útiles para la detección de este tipo de valores. Por lo tanto, es necesario: 1) identificar los valores atípicos, y 2) decidir si estos valores deben conservarse o rechazarse de la base de datos (Frosch et al. 2005).

Para ello, se efectuaron los siguientes controles: identificación de valores negativos de precipitación (al encontrarlo, se analizó si el valor real era el valor absoluto), e identificación de los valores atípicos o outliers (valores mínimos y máximos). En ambos casos, estos datos diarios, se les comparó con estaciones cercanas. Además, se revisaron exhaustivamente los boletines meteorológicos mensuales del IMN (<https://www.imn.ac.cr/boletin-meteorologico>), analizando la fecha en cuestión, con el fin de encontrar correspondencia entre los eventos ocurridos en ese momento y el dato analizado como dudoso.

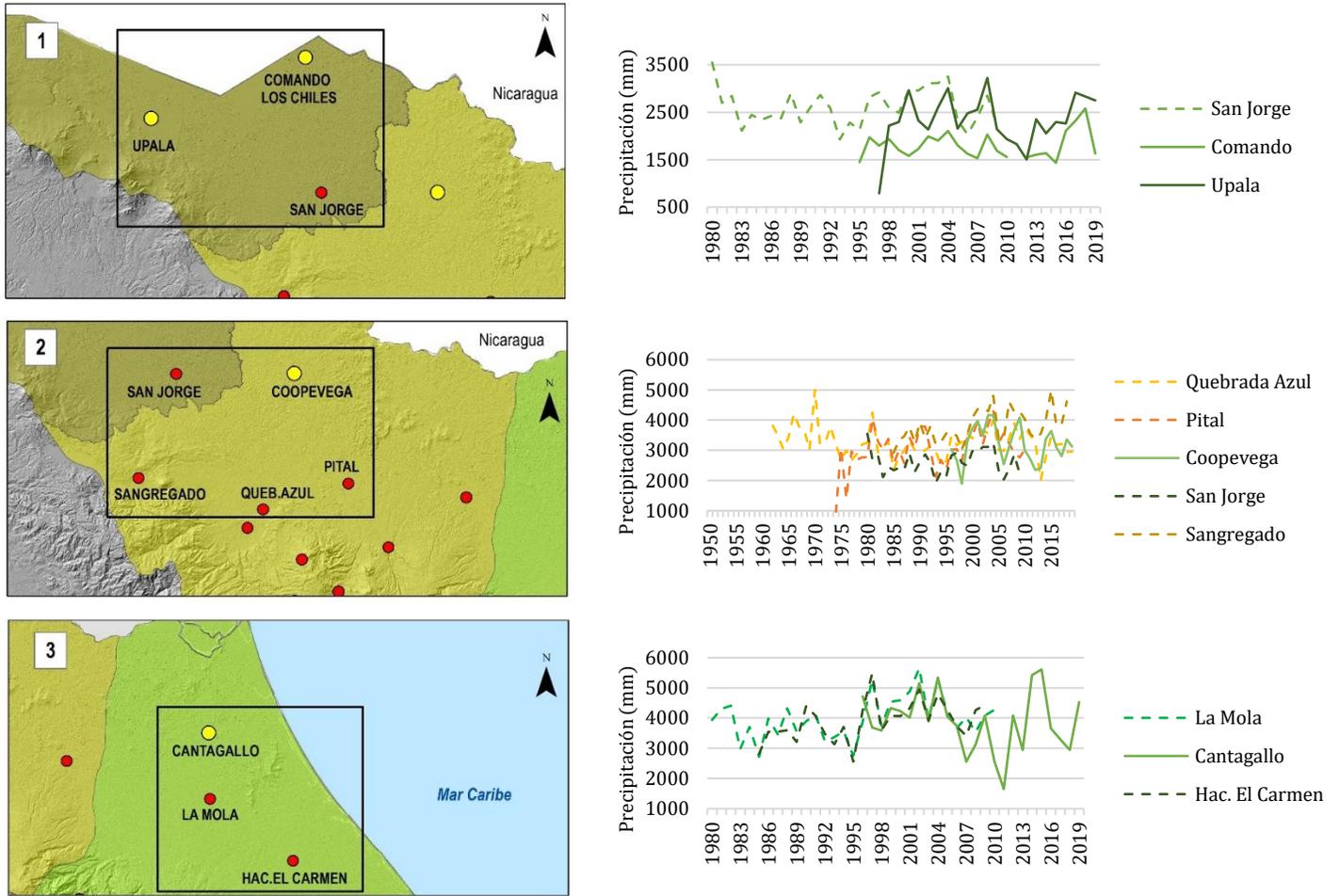
Finalmente, luego de este control de calidad, se calcularon los totales mensuales. Para aquellos meses que presentaron hasta un 10 a 15% de datos diarios faltantes (pocos casos), se completó el total mensual con el valor medio climatológico de precipitación del mes y estación en cuestión.

### 2.1.3. Periodos en común seleccionados

Con las 24 estaciones seleccionadas en el ítem anterior, se identificó el periodo en común más extenso entre ellas: 1985-2009 (25 años). Al analizar la cobertura espacial de estas 24 estaciones, se identificaron algunas áreas al norte de la región de estudio que quedaron desprovistas de información, y que corresponden a zonas prioritarias para la actividad agrícola de la RTHC, de interés en esta tesis ([Capítulo 5](#)). Dada esta situación, se inició una segunda búsqueda de periodos en común, que cumpliera los mismos requisitos indicados en el apartado anterior, y que cubriera los vacíos de información en las áreas faltantes.

Se identificó un grupo de 4 estaciones, con un periodo en común de 23 años consecutivos de datos (1997-2019) y que cumplieran el criterio de cantidad de datos diarios faltantes considerada en este trabajo (entre 10 y 15%). Para estas 4 estaciones, se llevó a cabo el control de calidad mencionado anteriormente: comparación de la media, la mediana, la desviación estándar y un análisis temporal de las series de precipitación. Posteriormente, se compararon estas estaciones con las más cercanas en los registros de 1997-2009 (periodo más extenso en común entre ellas). De esta forma, se seleccionaron 3 subregiones o cuadrantes, donde cada una incluyó 1 o 2 de las estaciones nuevas por analizar (periodo 1997-2019), y algunas estaciones cercanas del periodo 1985-2009, con el fin de determinar diferencias o particularidades que no permitieran la inclusión ([Figura 2.3](#)). De este análisis se encontró que las 4 estaciones en el periodo 1997-2019 no presentaron singularidades o diferencias sustanciales.

Finalmente, como síntesis, se dispone de una base de datos consistida y de calidad de 28 estaciones meteorológicas, de las cuales, 24 tienen un periodo en común de 25 años (1985-2009) y 4 (ubicadas en áreas prioritarias para la actividad agrícola) tienen un periodo en común de 23 años (1997-2019). Además, 7 de estas estaciones presentan periodos más extensos (con diferente extensión) siendo el más largo 1942-2019 correspondiente a Limón ([Tabla 2.1](#) y [Figura 2.4](#)).



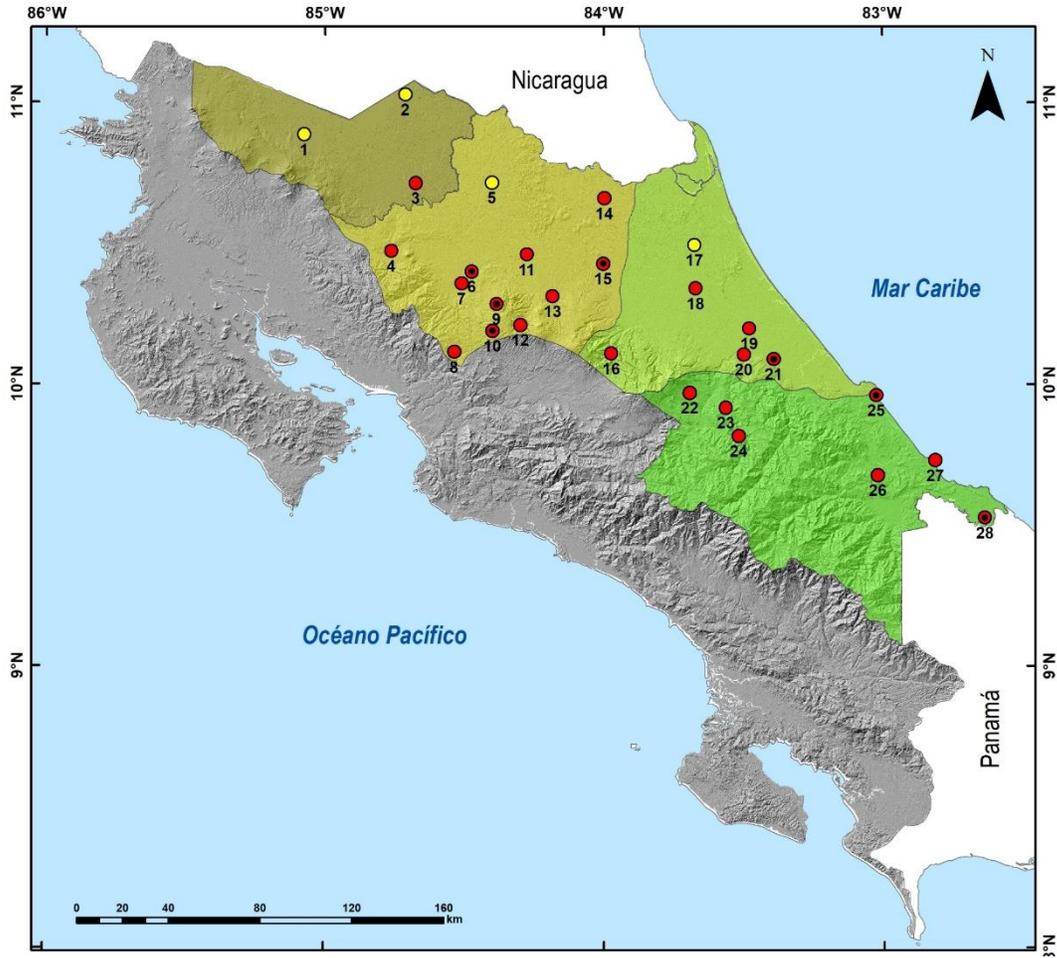
**Figura 2.3.** Izquierda: subregiones de análisis de estaciones del periodo 1997-2019 (círculos amarillos) con estaciones cercanas del periodo 1985-2009 (círculos rojos). Derecha: Series de precipitaciones anuales para las estaciones seleccionadas en el cuadro negro de la izquierda.

**Tabla 2.1.** Nombre, localización, altitud, y periodo de las estaciones meteorológicas analizadas

Número de estación	Nombre de la estación	Latitud (°N)	Longitud (°O)	Altitud (msnm)	Periodo
1	Upala*	10.88	-85.07	60	1997-2019
2	Comando Los Chiles*	11.03	-84.71	40	1995-2019
3	San Jorge	10.72	-84.67	55	1980-2009
4	Presa Sangregado	10.48	-84.76	547	1985-2018
5	Coopevega*	10.72	-84.40	100	1996-2019
6	Quebrada Azul °	10.40	-84.47	83	1962-2019
7	Santa Clara	10.36	-84.51	170	1984-2018
8	Piedades Sur	10.12	-84.54	1020	1984-2017
9	San Vicente °	10.29	-84.38	1640	1973-2019
10	Zarcelero °	10.19	-84.40	1736	1950-2019
11	Pital	10.46	-84.28	150	1974-2010
12	Bajos del Toro	10.21	-84.30	1449	1985-2018
13	San Miguel	10.32	-84.18	500	1960-2010
14	El Bum	10.66	-84.00	59	1985-2018
15	La Selva °	10.43	-84.00	40	1971-2019
16	La Montura	10.11	-83.97	1146	1985-2010
17	Cantagallo*	10.50	-83.67	20	1996-2019
18	La Mola	10.34	-83.67	70	1980-2010
19	Hacienda El Carmen	10.20	-83.48	15	1972-2013
20	Siquirres	10.11	-83.50	68	1985-2018
21	La Lola °	10.09	-83.39	40	1949-2013
22	Guayabo	9.97	-83.69	1003	1985-2017
23	Pacuar	9.92	-83.56	721	1985-2018
24	Pacuare	9.82	-83.52	798	1985-2018
25	Limón °	9.96	-83.03	5	1942-2019
26	Hitoy Cerere	9.68	-83.02	100	1982-2019
27	Puerto Vargas	9.73	-82.82	11	1977-2015
28	Sixaola Day °	9.53	-82.64	10	1985-2019

\* Estaciones del periodo 1997-2019, localizadas en áreas prioritarias para la actividad agrícola.

° Estaciones con las series de precipitación más largas.



**Figura 2.4.** Ubicación geográfica de las 28 estaciones meteorológicas seleccionadas para el estudio: periodo 1985-2009 (círculos en rojo) y periodo 1997-2019 (círculos en amarillo). Las estaciones con las series más largas se presentan con un círculo más pequeño en negro. La numeración de las estaciones se encuentra en sentido noroeste-sureste y el detalle se encuentra según la numeración en la [Tabla 2.1](#).

## 2.2. Índices climáticos utilizados

En Costa Rica y la RTHC, el efecto de la circulación atmosférica a gran escala y a escala regional, sumado a la topografía del istmo centroamericano, y a la circulación de los océanos circundantes, generan una interacción importante que modula su clima y las precipitaciones (Sánchez-Murillo et al. 2017; Maldonado et al. 2018). Para este estudio, a partir del análisis llevado a cabo en el Capítulo 4, se seleccionaron 3 forzantes de variabilidad climática que influyen en el comportamiento de la precipitación en la región: El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), la oscilación del Atlántico Norte (NAO, por sus siglas en inglés) y el dipolo del océano Índico (IOD, por sus siglas en inglés), basado en las 3 cuencas oceánicas más importantes: Pacífico (ENSO), Atlántico (NAO) e Índico (IOD).

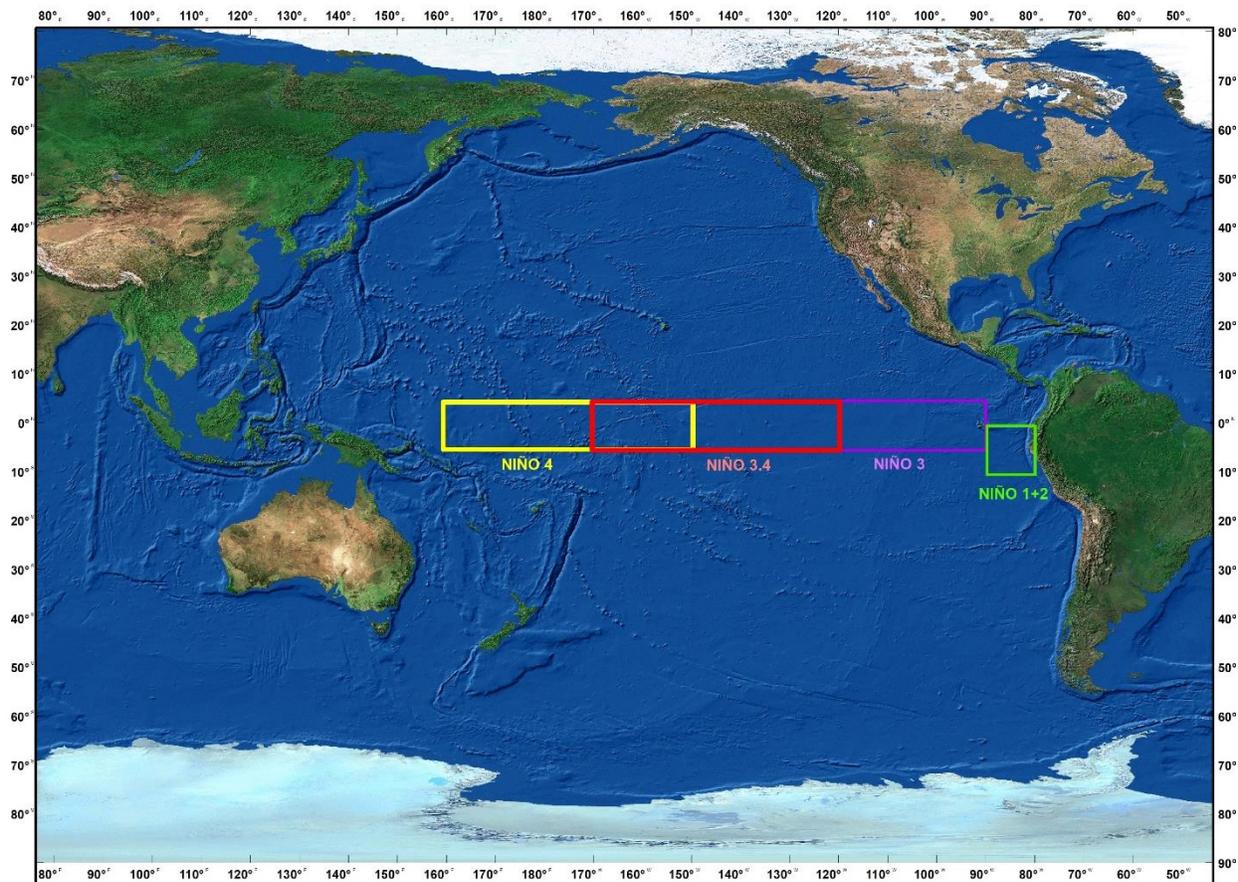
### EL Niño – Oscilación del Sur

Existen diversos índices que caracterizan al ENSO. Algunos de ellos como el Índice Multivariado combina 5 variables diferentes: presión al nivel del mar, temperatura de la superficie del mar, componentes zonales y meridionales del viento a nivel superficial y la radiación de onda larga saliente sobre la cuenca del Pacífico tropical (Zhang et al. 2019). Otros se refieren exclusivamente al océano, y se basan en las medias de grandes áreas de las anomalías de la temperatura de la superficie del mar (SST, por sus siglas en inglés) (McPhaden et al. 2021). Las regiones más utilizadas para calcular estas anomalías son: Niño 1+2 (0–10°S, 80–90°O), Niño 3 (5°N–5°S, 90–150°O), Niño 3.4 (5°N–5°S, 120–170°O) y Niño 4 (5°N–5°S, 150°O–160°E) que captan distintas variabilidades del océano. (Figura 2.5). Las regiones de los índices Niño 1+2, Niño 3 y Niño 4 fueron diseñadas por el Centro de Predicción Climática (CPC) de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) en 1982 y se utilizan desde entonces para el seguimiento en tiempo real de la evolución de las condiciones del ENSO (McPhaden et al. 2021). La región Niño 3.4, es parte de las regiones Niño 3 y Niño 4, fue una adición posterior basada en su alta correlación con el Índice de Oscilación del Sur (Barnston et al. 1997).

En este trabajo se seleccionó el Índice Oceánico del Niño (ONI, por sus siglas en inglés) de la NOAA, el cual mide las anomalías de las SSTs, promediadas trimestralmente (media móvil de

3 meses), a partir de la SST reconstruida ampliada versión 5 (ERSSTv5; Huang et al. 2017) en la región Niño 3.4 (Figura 2.5), con un periodo base de 30 años (1950-1979) que se actualiza cada 5 años (Barnston et al. 1997; Webb y Magi, 2022). La media trimestral está diseñada para filtrar las variaciones intermensuales significativas que se producen en el Pacífico tropical, con el fin de ofrecer una imagen más clara de la evolución de las condiciones del ENSO (McPhaden et al. 2021). Este índice es el que utiliza la NOAA para el seguimiento oceánico del ENSO. La fase de El Niño (La Niña) se define cuando los valores de ONI están por encima de  $0.5^{\circ}\text{C}$  (por debajo de  $-0.5^{\circ}\text{C}$ ), y las condiciones neutrales se definen entre  $-0.5^{\circ}\text{C}$  y  $0.5^{\circ}\text{C}$  cuando se alcanza el umbral durante un mínimo de 5 estaciones consecutivas solapadas. El índice se descargó de la página oficial del CPC de la NOAA en la siguiente dirección:

[https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)



**Figura 2.5.** Regiones de El Niño-Oscilación del Sur. El recuadro con línea sólida en rojo representa la región Niño 3.4, donde se calculan las anomalías de SST para el ONI. Elaboración propia.

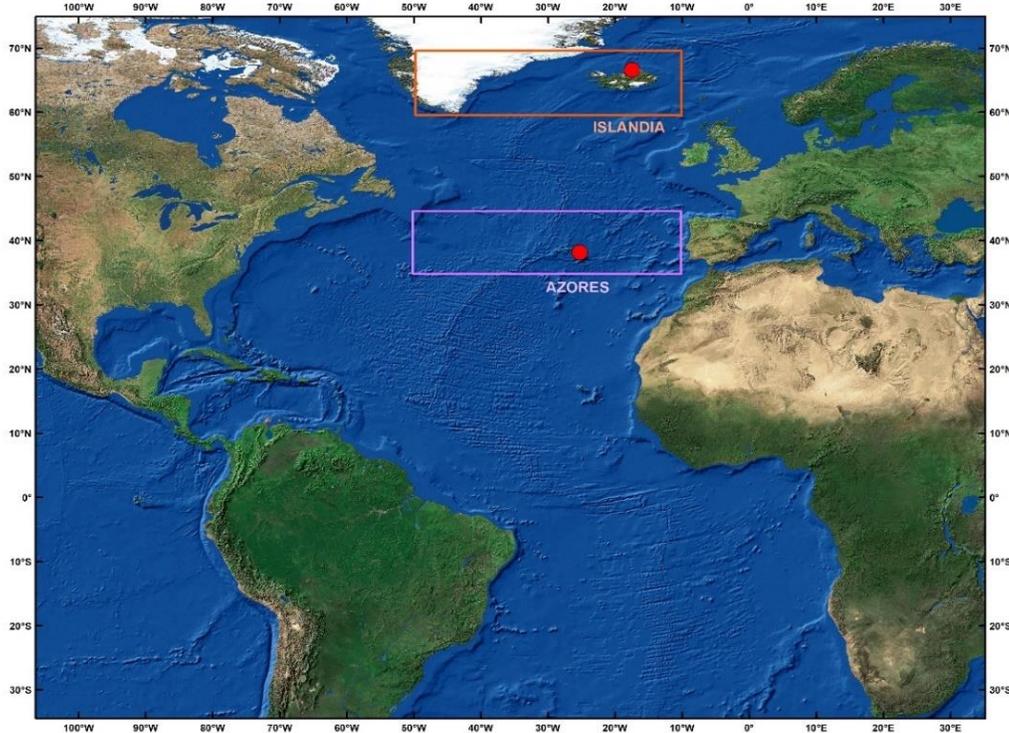
## Oscilación del Atlántico Norte

La NAO es el modo de variabilidad más importante de la circulación atmosférica del hemisferio norte durante todo el año, aunque es más pronunciado durante el invierno (Greatbatch, 2000). Existen diversos índices que lo caracterizan (Jianping y Wang, 2003). Algunos de ellos son índices simplificados basados en registros instrumentales que emplean 3 tipos de variables: presión al nivel del mar (Barnston y Livezey, 1987; Moses et al. 1987; Hurrell, 1995; Jones et al. 1997), temperatura del aire en superficie (van Loon y Rogers, 1978; Wallace y Gutzler, 1981) y SST (Cullen et al. 2002).

En el caso de esta investigación se utilizó el índice de la oscilación del Atlántico Norte (NAOI, por sus siglas en inglés) basado en la diferencia de presión a nivel del mar en superficie entre la alta subtropical (Azores) y la baja subpolar (Islandia) (Figura 2.6). Este es el índice utilizado por el CPC de la NOAA, calculado a las anomalías mensuales normalizadas de altura a 700hPa obtenidas en la región de análisis 20–90°N entre enero de 1950 y diciembre del 2000 (Barnston y Livezey, 1987). Las anomalías normalizadas se calculan a partir de la media diaria climatológica y la desviación típica del periodo 1950-2000. Los valores positivos (negativos) del NAOI indican que estas características son fuertes (débiles), creando una gran diferencia de presión entre ellas (Wallace y Gutzler, 1981; Barnston y Livezey, 1987; Portis et al. 2000). El índice se descargó de la página oficial del CPC de la NOAA en la siguiente dirección: <https://psl.noaa.gov/data/correlation/nao.data>

## Modo dipolar del Índico

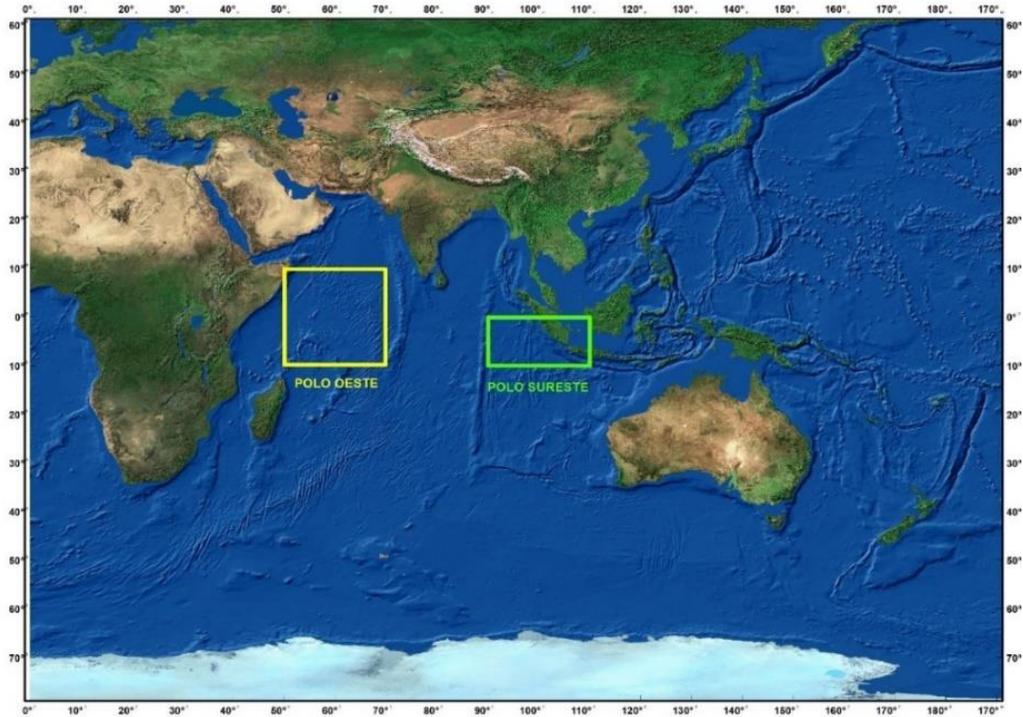
El IOD consiste en un patrón de variabilidad interna con SSTs anómalamente bajas frente a Indonesia y SSTs elevadas en el Océano Índico occidental (mar arábigo). La anomalía zonal del gradiente de la SST, es denominada Índice del Modo Dipolar (DMI, por sus siglas en inglés; Saji et al. 1999) y es el gradiente de la SST entre el océano Índico occidental (10°S–10°N y 50–70°E) y el oriental, al sur de Indonesia (10°S–0° y 90–110°E) (Figura 2.7).



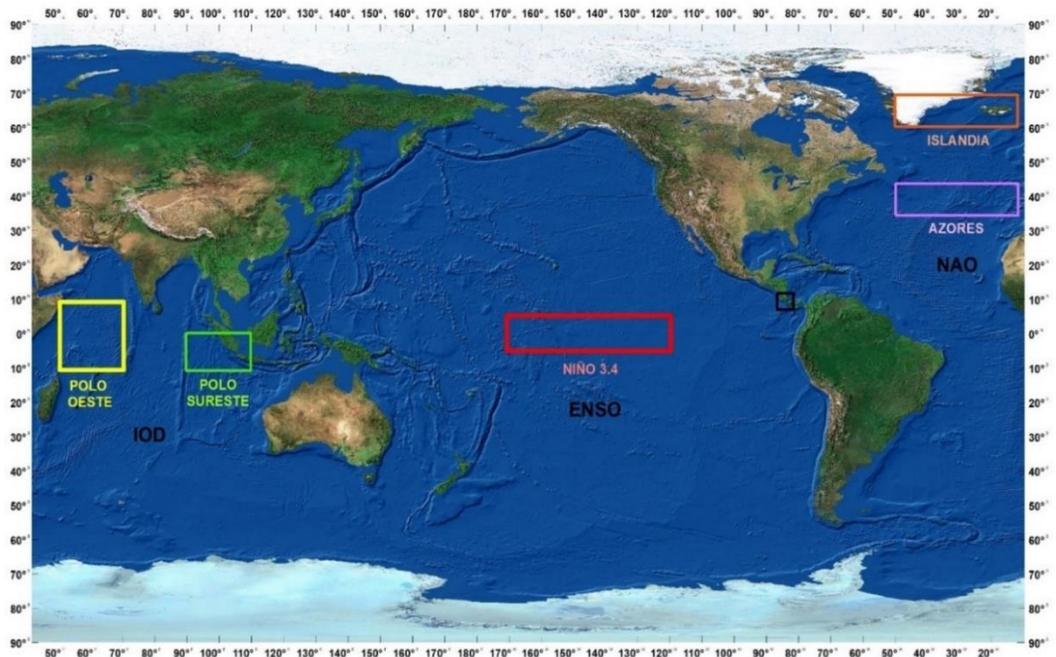
**Figura 2.6.** Regiones en el océano Atlántico norte que involucra a la NAO. El recuadro con línea sólida en morado representa la alta subtropical (cerca de las islas Azores), y el recuadro en anaranjado representa la baja subpolar (cerca de Islandia). Elaboración propia.

Cuando el índice DMI es positivo (negativo), el fenómeno es referido como el IOD positivo (negativo) (Saji et al. 1999; Saji y Yamagata, 2003; McKenna et al. 2020). Este índice es calculado por el laboratorio de ciencias físicas de la NOAA a escala mensual, con una cobertura temporal que va desde 1870 a la actualidad. Utiliza el conjunto de datos de SST HadISST1.1 para todo el periodo de tiempo. A la SST se le ha eliminado la climatología de 1981-2010 para cada mes y las 2 regiones se promedian por área y se restan entre sí (PSL-NOAA, 2023). El índice se descargó de la página oficial del CPC de la NOAA en la siguiente dirección: [https://psl.noaa.gov/gcos\\_wgsp/Timeseries/Data/dmi.had.long.data](https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/Data/dmi.had.long.data)

La Figura 2.8, sintetiza la ubicación de las regiones correspondientes a los 3 mecanismos de variabilidad que se analizan en este trabajo.



**Figura 2.7.** Regiones en el océano Índico ecuatorial que involucra el IOD. El recuadro con línea sólida en amarillo (verde) representa el polo Oeste (Sureste), donde se calculan las anomalías de SST para el DMI. Elaboración propia.



**Figura 2.8.** Síntesis de regiones de los índices climáticos para representar los 3 modos de variabilidad utilizados: ENSO, IOD y NAO. El recuadro en línea sólida en negro representa el área de estudio. Elaboración propia.

## 2.3. Modelos climáticos regionales

### 2.3.1. Selección de modelos climáticos regionales

Para la generación de las proyecciones futuras mensuales de precipitación y eventos extremos en la RTHC, se utilizaron salidas de modelos climáticos regionales (RCM, por sus siglas en inglés) (Giorgi y Mearns, 1991), proporcionando información más detallada que los modelos climáticos globales (GCM, por sus siglas en inglés), y representan un ajuste de escala dinámico (Amador y Alfaro, 2009). Los RCM modelan cambios regionales de la circulación atmosférica en áreas con orografía más compleja (Stone et al. 2003; Lynn et al. 2007), como es el caso de Centroamérica (Castillo et al. 2018; Cavazos et al. 2019; Coppola et al. 2021).

En los últimos años, los modelos han evolucionado, tanto en la complejidad de los procesos que simulan, como en los componentes que participan en ellos y en sus resoluciones espaciales, por ejemplo, los proyectos de intercomparación de modelos acoplados (CMIP, por sus siglas en inglés), en sus fases 3, 5 y 6 (la más reciente), han logrado mejorar la representación de los procesos. Sin embargo, aún presentan cierta dispersión entre ellos y en la definición de algunas variables (Penalba y Pántano, 2019). A pesar de que recientemente se puso a disposición en los repositorios de datos las simulaciones de la generación CMIP6, aún no se dispone de la evaluación de estos modelos ni tampoco del proceso de cambio de escala necesario para Centroamérica (Hidalgo et al. 2021). Es así como desde el marco de proyectos recientes como el Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX), se puso en marcha una nueva iniciativa de alta resolución el Coordinated Output for Regional Evaluation (CORE) denominada CORDEX-CORE (Gutowski et al. 2016). El objetivo es proporcionar un conjunto homogéneo de proyecciones de alta resolución (alrededor de 25km de cuadrícula) para regiones de todo el mundo. En el caso de Centroamérica y el Caribe, CORDEX-CORE está disponible desde la región o dominio 2, llamada CAM (Centroamérica, Caribe y México) y con una resolución de 22km aproximadamente (CAM-22) (Figura 2.9). Estas salidas son de acceso libre para fines científicos, disponibles a través de la página web <https://esg-dn1.nsc.liu.se/search/cordex/>.

Al seleccionar la información en el conjunto de datos de CORDEX-CORE-CAM, se realizó una selección de base, con las condiciones predeterminadas para el análisis que se requiere. En este caso, se eligió la opción CAM-22 (modelos con resolución de 22km) para la precipitación mensual. Con ello se obtuvo inicialmente 3 RCM anidados por 3 GCM cada uno y sus respectivos experimentos.

Cabe destacar que de las 27 salidas disponibles, los 3 RCM contaban con el experimento historical y con el Representative Concentrations Pathways (RCP) 8.5, mientras que solo 2 de ellos contaban con el RCP2.6, y ninguno con el RCP4.5 o 6.0. Además, no hubiese sido relevante incluir el RCP2.6, ya que en 2019, el forzante radiativo de origen humano, alcanzó el valor de 2.7 W/m<sup>2</sup> (superando al RCP2.6) con un rango de incertidumbre de entre 1.9 y 3.5 W/m<sup>2</sup> en relación con 1750 (IPCC, 2021).

Finalmente, se consideraron sólo los modelos que tenían disponibles las salidas de los siguientes experimentos:

- Historical: comienza en la época preindustrial (1850) y son simulaciones a partir de los forzantes naturales y antropogénicos observados en el periodo.
- RCP8.5: el forzante radiativo se incrementa a lo largo del siglo XXI hasta alcanzar 8.5 W/m<sup>2</sup> a fin de siglo, y continúa en aumento. Este experimento representa el escenario más extremo.

Tomando en cuenta lo anterior, las salidas disponibles se redujeron a 18, compuestas por 3 RCM anidadas por 3 GCM cada uno. La [Tabla 2.2](#) detalla los nombres de los RCM y sus respectivos GCM, así como la institución que los desarrolló.

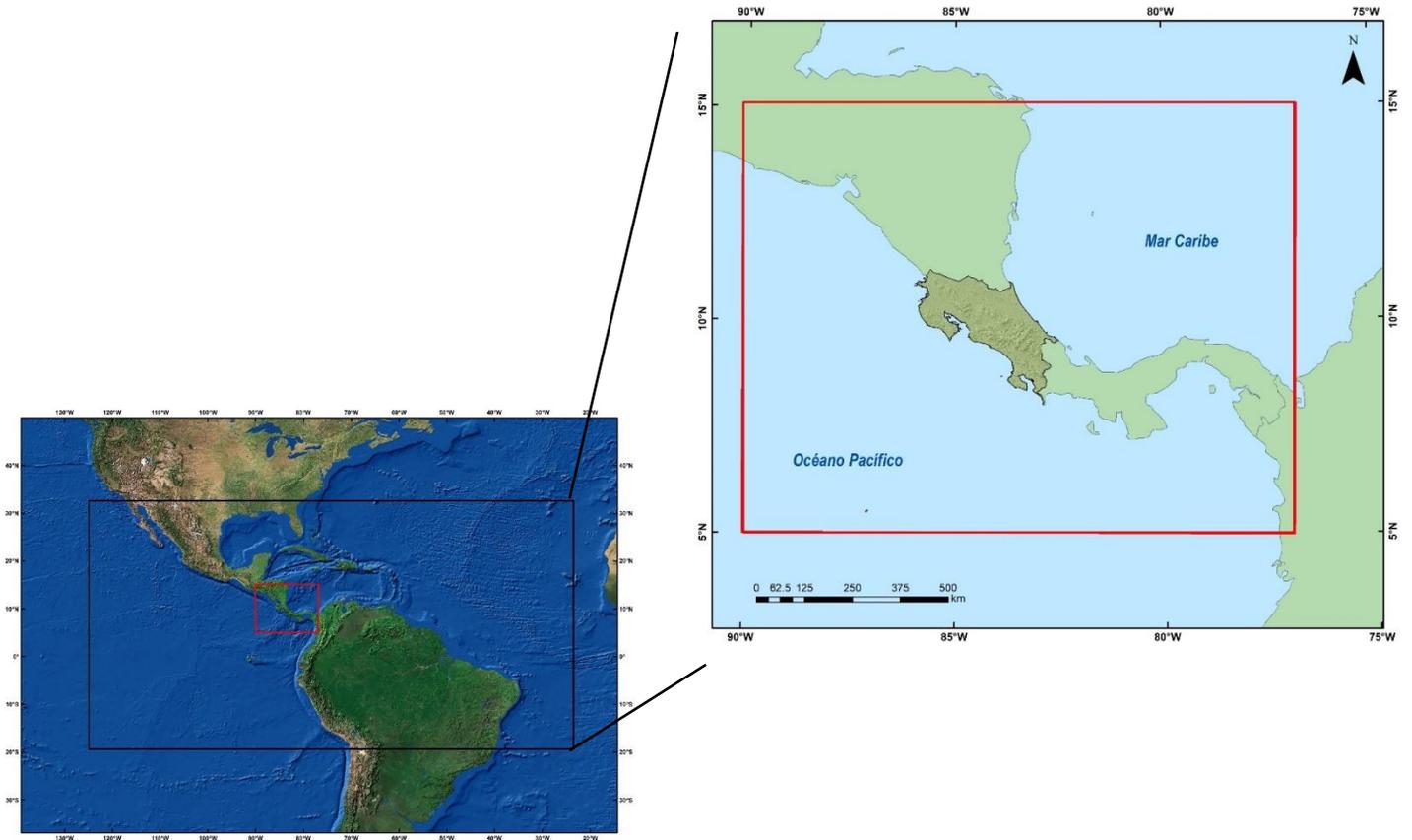
La selección de estos RCM, se respalda en investigaciones previas que han utilizado dichos modelos, como por ejemplo: [Sitz et al. \(2017\)](#); [Cabos et al. \(2019\)](#); [Cavazos et al. \(2019\)](#); [Luna-Niño et al. \(2021\)](#), y que indican que los modelos han mostrado mejoras en la representación de los patrones de circulación clave en la región, como la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ, por sus siglas en inglés) y la reducción de los sesgos de precipitación tanto en tierra como en los océanos, y en las regiones costeras.

**Tabla 2.2.** Modelos Climáticos Regionales seleccionados, incluyendo información sobre los modelos climáticos globales que los alimentan, institución que lo desarrolló y referencias.

RCM	GCM	Institución (País)	Referencia modelo
RegCM4-7	HadGem2 MPI-ESM-MR GFDL-ESM2M	ICTP (Italia)	<a href="#">Giorgi et al. 2012</a>
REMO2015	HadGem2 MPI-ESM-LR NorESM1-M	GERICS (Alemania)	<a href="#">Jacob, et al. 2001</a>
CRCM5	CanESM2 CERFACS-CNRM-CM5 GFDL-ESM2M	Ouranos (Canadá)	<a href="#">Martynov et al. 2013</a> <a href="#">Separovic et al. 2013</a>

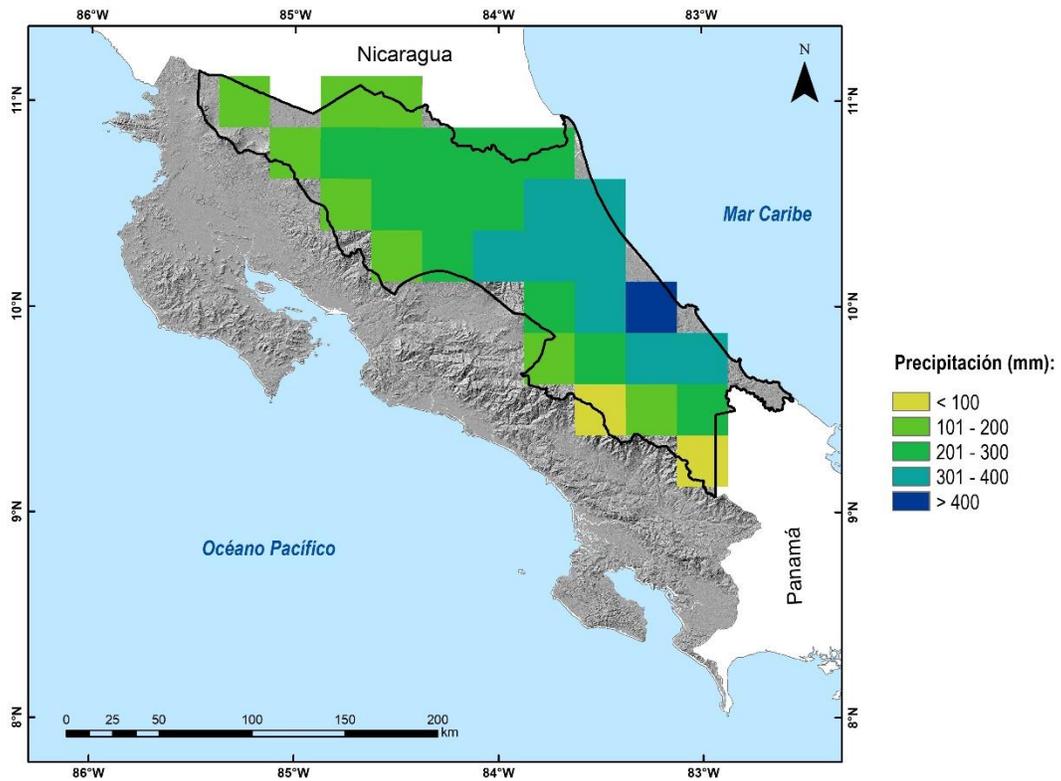
### 2.3.2. Delimitación del área de estudio y periodo

Con el fin de comparar los resultados con los datos observados, la región seleccionada se delimitó en un cuadrante entre las latitudes 5–15°N y las longitudes 77–90°O ([Figura 2.9](#)). Para una mejor comparación de los resultados, las salidas fueron interpoladas a una retícula común de 0.25° por 0.25° utilizando el método de interpolación bilineal ([Accadia et al. 2003](#)) ([Figura 2.10](#)). El periodo de análisis en el experimento histórico, no cubre hasta el año 2009, como las observaciones. La mayoría de las corridas están disponibles hasta el año 2005, por lo que, para el periodo de la validación entre el histórico de los modelos (1985-2005) y la base de datos de las estaciones, se utilizaron los periodos completos empleados para la climatología de la precipitación media (1985-2009 y 1997-2019). Esto se debió a que cuando se llevó a cabo el estudio correspondiente ([Capítulo 3](#)), no se encontraron diferencias entre los distintos estadísticos en los periodos mencionados con el periodo 1985-2005. La elección del período de tiempo futuro se basó en considerar resultados a largo plazo, con el fin de cuantificar cambios significativos. Tomando como base los horizontes de tiempo utilizados por el IMN en las proyecciones de cambio climático regionalizadas para Costa Rica ([Alvarado, 2021](#)), se seleccionaron 2 horizontes de tiempo: 2040-2069 (futuro cercano) y 2070-2099 (futuro lejano).



**Figura 2.9.** Delimitación de los RCM. El recuadro con línea sólida en negro, a la izquierda, representa la región CORDEX-CAM, y el recuadro con línea sólida en rojo, delimita el corte realizado para la descarga de los RCM para el área de estudio: se amplía en la figura de la derecha.

La [Figura 2.10](#) muestra un ejemplo de la resolución, por defecto, de uno de los RCM, en la retícula de  $0.25^\circ$  por  $0.25^\circ$ , para la RTHC, para el mes de diciembre en el periodo histórico (1985-2005). Posteriormente, se aplicó una metodología de interpolación y suavizado: “Spline with barriers” ([Briggs, 1974](#); [Wolny et al. 2017](#)), que mejoró la visualización de los modelos y que se explica a mayor detalle en el [Capítulo 3](#).



**Figura 2.10.** Resolución por defecto, en retícula de 0.25°\*0.25°, para el modelo CRCM5-CanESM2: precipitación acumulada promedio de diciembre, en el periodo histórico 1985-2005.

## Capítulo 3

# Variabilidad espacio-temporal y eventos extremos de precipitación

### Resumen

Las precipitaciones en la RTHC se producen prácticamente durante todo el año, concentrando los trimestres diciembre-febrero (DEF) y junio-agosto (JJA) más del 70% de las precipitaciones anuales. Por el contrario, en marzo-abril (MA) y en septiembre-octubre (SO) llueve por debajo de los 100mm mensuales. Este comportamiento estacional de las precipitaciones hace que la región sea ideal para la producción de frutas tropicales de exportación (banano y piña). Sin embargo, el clima de esta región ha sido poco estudiado hasta ahora. Esta investigación analizó la variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones anuales, mensuales y estacionales (DEF, MA, JJA, SO) en la RTHC y cómo cambian en el periodo de estudio, basándose en las series de precipitaciones diarias de 28 estaciones meteorológicas en 2 periodos: 1985-2009 y 1997-2019. Los resultados muestran que los regímenes pluviométricos de la región son variables en el espacio y a lo largo del año, con máximos cerca de la cordillera y mínimos cerca de la costa. Las tendencias fueron estadísticamente significativas en el periodo 1985-2009, con predominio de tendencias positivas (negativas) significativas en DEF (SO). No se observaron tendencias significativas (positivas o negativas) en el periodo 1997-2019. Los promedios móviles de las estaciones más largas, muestran una distribución espacial homogénea más clara en las subregiones climáticas del Caribe norte y sur que en las ubicadas en las subregiones del norte. La variación interanual fue más importante que la interdecadal. El análisis con la transformada de Wavelet para las series históricas de lluvias anuales y estacionales indica variabilidades interanuales en la escala de 2-7 años asociadas con el ENSO.

### 3.1. Introducción

Costa Rica está estratégicamente situada entre el Océano Pacífico y el Mar Caribe en el istmo centroamericano. Los procesos oceánicos de gran escala que se originan en estos 2 cuerpos de agua tienen una gran influencia en el clima de la región (Maldonado et al. 2018; Durán-Quesada et al. 2020). Los patrones regionales de precipitación en Centroamérica están determinados por los vientos alisios, que juegan un papel relevante en el transporte de humedad desde el mar Caribe, y por tanto, en la variabilidad estacional de las variables climáticas (Alfaro, 2002; Poveda et al. 2014; Durán-Quesada et al. 2017). También existe la influencia de la corriente en chorro del Caribe (Amador, 1998; 2008) y la corriente en chorro del Chocó (Poveda y Mesa, 2000). Su papel en la modulación de los patrones de precipitación y su conectividad con mecanismos de gran escala como la ITCZ ha sido ampliamente estudiado (Cook y Vizy, 2010; Hidalgo et al. 2015; Durán-Quesada et al. 2017), así como el ENSO (Alvarado y Fernández, 2001; Maldonado et al. 2018; Durán-Quesada et al. 2020).

La compleja orografía de Costa Rica, interactúa con los vientos alisios del noreste que están asociados al anticiclón del Atlántico norte (Amador, 1998). Dicha interacción induce variaciones climáticas espaciales que conducen a comportamientos opuestos entre las vertientes del Pacífico y del Caribe (Quesada y Waylen, 2020).

La precipitación en la vertiente del Pacífico (VP) de Costa Rica tiene un comportamiento bimodal, con una época seca bien definida en el invierno boreal (diciembre-marzo), que en algunas zonas se extiende hasta abril, y una época lluviosa con 2 máximos de precipitación, uno en mayo-junio y el otro (generalmente más intenso) en septiembre-octubre (Alfaro, 2002; Alfaro e Hidalgo, 2021). Entre ambos máximos de precipitación, se presenta un periodo de disminución de lluvias entre julio-agosto, y que localmente se conoce como veranillo o canícula (Magaña et al. 1999; Amador, 2008; Maldonado et al. 2016; García-Franco et al. 2023). La variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones en esta vertiente ha sido ampliamente estudiada (Retana, 2012; Quesada y Waylen, 2013; Maldonado et al. 2018; Alfaro e Hidalgo, 2021). Principalmente en la última década, se ha avanzado en el análisis de eventos extremos secos, ya que la región norte de la VP, región con la mayor ocurrencia de sequías en el país, forma parte del Corredor Seco

Centroamericano, (AlMutairi et al. 2019; Quesada-Montano et al. 2019; Guillén-Oviedo et al. 2020; Quesada-Hernández et al. 2020).

La vertiente del Caribe (VC)-región de interés de esta tesis-, no tiene una época seca definida (Alfaro, 2002; Alfaro et al. 2024). Las precipitaciones no varían mucho entre enero y mediados de octubre (entre 200 y 500mm). Este periodo representa aproximadamente el 60% del total anual en esta región. A partir de mediados de octubre hay un marcado incremento en la acumulación de lluvias, entre 400 y 600mm por mes, mayormente concentrado en el trimestre de diciembre-febrero (DEF) (Taylor y Alfaro, 2005). Este ciclo anual presenta un comportamiento espacial desde cálido subhúmedo con escasas precipitaciones en el noroeste de la región hasta clima excesivamente húmedo y frío en la zona montañosa (Pérez-Briceño et al. 2017). Aunque la región carece de una época seca definida, existen dos periodos de disminución significativa de las precipitaciones en marzo-abril (MA) y en septiembre-octubre (SO), intercalado por el trimestre junio-agosto (JJA) que registra elevadas precipitaciones (Alfaro, 2002; Sáenz y Amador, 2016; Alfaro e Hidalgo, 2021; Alfaro et al. 2024).

La VC tiene una creciente actividad industrial y portuaria, así como actividades de recreación. Es uno de los principales destinos turísticos del país, debido a sus paisajes (Quesada-Román y Pérez-Briceño, 2019) y a la belleza natural de sus playas y arrecifes (Piedra-Castro et al. 2021). Por otro lado, presenta una extensa actividad agrícola (Quesada y Waylen, 2020). Las características climáticas que actúan en la llanura costera del Caribe, dan lugar a condiciones ideales para la producción de banano (*Musa spp*) y piña (*Ananas comosus*). Ambos son los principales productos agrícolas de exportación de Costa Rica y representan el 8 y el 7% del total de bienes exportados (PROCOMER, 2022). Según los análisis realizados por TradeMap (2022), Costa Rica es el primer (cuarto) exportador de piña (banano) del mundo. Sin embargo, según Bouroncle et al. (2015), el sector agrícola de esta región es el más vulnerable a los cambios climáticos.

En cuanto al análisis de la variabilidad temporal de las lluvias en la VC, no ha sido estudiada en detalle como lo es la VP. En la literatura existen trabajos que analizan series de precipitación diaria de una estación individual -Limón- y con registro largo (1949-2017)

como el de [Quesada y Waylen \(2020\)](#), o estudios más regionales analizando toda Centroamérica, incluyendo pocas estaciones meteorológicas ubicadas en la VC durante al menos 20 años (1950-1994) como el de [Alfaro \(2002\)](#) o el reciente de [Alfaro et al. \(2024\)](#), que analiza las precipitaciones diarias de estaciones en la VC de América Central para caracterizar el descenso de lluvias durante SO.

Según [Zhao et al. \(2023\)](#) la precipitación anual sobre la VC es más compleja en términos de variabilidad espacial y temporal. Esto además se refleja en la ocurrencia de eventos extremos de precipitación a los cuales está expuesta la región y que han dejado daños y pérdidas en sus actividades económicas ([Retana, 2012](#); [Orozco-Montoya et al. 2022](#); [UNDRR, 2023](#)).

Bajo la hipótesis de que el comportamiento espacial y temporal de los eventos extremos de precipitación es mayor que el de los valores medios ([IPCC, 2023](#)), un conocimiento detallado de su variabilidad permitirá en futuros trabajos evaluar mejor los mecanismos físicos (locales y remotos). Basado en lo anterior, este capítulo de tesis busca analizar la variabilidad espacial y temporal observada de las precipitaciones anuales, mensuales y estacionales (DEF, MA, JJA y SO), con especial atención en los eventos extremos. El interés de estas estaciones radica en que son periodos críticos para el sector agrícola (banano y piña) ([Serrano et al. 2008](#); [Soto, 2014](#)).

El desarrollo de este capítulo de tesis y parte de sus resultados se encuentran analizados en el trabajo publicado por [Orozco-Montoya y Penalba, \(2023\)](#).

## **3.2. Metodología**

En este estudio se analizaron datos pluviométricos anuales, mensuales y estacionales (DEF, MA, JJA y SO) procedentes de las 28 estaciones meteorológicas seleccionadas en el [Capítulo 2](#) ([Tabla 2.1.](#) y [Figura 2.6](#)).

### **3.2.1. Valores medios mensuales, estacionales y extremos**

El análisis climatológico de la precipitación anual, mensual y estacional se basó en medidas de posición (media y mediana) y de dispersión (desviación estándar). Estos estadísticos se calcularon para cada uno de los 2 periodos seleccionados: 1985-2009 y 1997-2019. Para el análisis de los eventos extremos de precipitación se calcularon los percentiles 25 (extremos

secos) y 75 (extremos húmedos) (Wilks, 2006). Además, se determinó la contribución de las precipitaciones estacionales a los totales anuales, es decir, cuánta lluvia cae en cada estación seleccionada respecto de la anual.

Con el fin de llevar a cabo el análisis espacial se realizó una interpolación con el método “Spline with barriers” (SB). Este método de curvatura mínima permite analizar información de regiones con barreras naturales (orografía, lagos y ríos) o discontinuidades superficiales (Briggs 1974; Wolny et al. 2017). Además, se destaca como un método de interpolación no paramétrico que toma las discontinuidades codificadas tanto en las barreras como en los datos de entrada. De este modo, el método SB es capaz de estimar un valor en un punto desconocido (Malcangio et al. 2020). Riehl et al. (2014) y Malcangio et al. (2020), destacan la importancia del uso del método SB en comparación con otros (spline regular, kriging e IDW), ya que este toma en cuenta las barreras geográficas, como las cadenas montañosas y las alteraciones en las precipitaciones que estas producen.

Basado en lo anterior, se eligió el SB como método de interpolación. Con ello se obtuvo una mejor aproximación en el área de estudio, la cual tiene la particularidad de presentar puntos de estación distribuidos de manera irregular, algunas áreas desprovistas de información y una orografía compleja. Cabe destacar que se probaron otros métodos de interpolación (spline, kriging, natural neighbour), sin embargo, no permitían cubrir correctamente toda la RTHC. La barrera seleccionada para la inclusión en el método de interpolación se realizó a través de la topografía del terreno, obteniéndose resultados satisfactorios.

### 3.2.2. Estimación de las tendencias

Existen varios métodos de evaluación de tendencias en la literatura. La prueba no-paramétrica de Mann-Kendall es la adecuada para evaluar las tendencias en las variables que no presenten distribución normal (Birkel y Demuth, 2006; Wang et al. 2008; Penalba y Robledo, 2010; Sulaiman et al. 2015; Ali et al. 2019; Aditya et al. 2021 y otros). El test de Mann-Kendall (Kendall, 1938; Mann, 1945; WMO, 1988; Salas, 1992) se utiliza para determinar tendencias en los datos, basándose en las clasificaciones relativas de un intervalo de tiempo determinado. En esta prueba, los datos no deben cumplir los supuestos de normalidad. La Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés)

recomienda esta prueba para detectar tendencias en conjuntos de datos climáticos (WMO, 1966; 2004; 2018), ya que no se ve afectada por la distribución de estos y es menos susceptible a los valores atípicos (Siegel, 1956; Yue y Wang, 2002; Sulaiman et al. 2015).

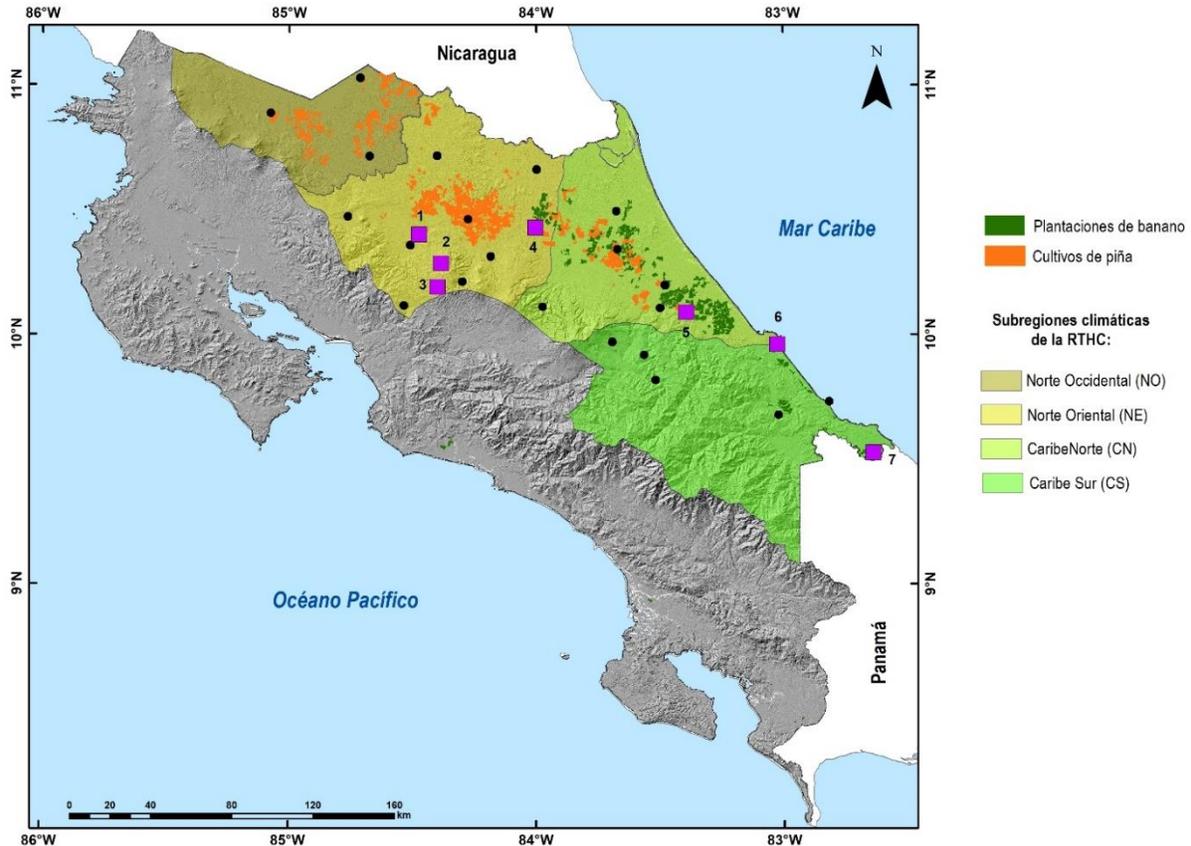
Por lo tanto, en el caso de esta investigación, se estimaron las tendencias con el test de Mann-Kendall a una significancia estadística del 90, 95 y 99%. Dado que para este tipo de análisis se necesitan series completas (sin datos faltantes), y con el fin de obtener resultados más robustos, se aplicó la prueba a las estaciones con series completas (20 estaciones), es decir, aquellas a las que no se les tuvo que rellenar información (criterio explicado en Capítulo 2).

### 3.2.3. Análisis de series de precipitación con periodos más extensos

Con el propósito de analizar los modos de variabilidad dominantes y cómo los mismos varían en el tiempo, se aplicaron 2 métodos a las 7 series de precipitación con los periodos más extensos en el rango: 1942-2019 (Tabla 3.1 y Figura 3.1). El primero, fue la aplicación de promedios móviles ponderados en ventanas de 11 años (Hu et al. 1998); y el segundo fue el método de la transformada de wavelet (Meyers et al. 1993; Torrence y Compo, 1998). La importancia de ambos métodos utilizados radica en que permiten descomponer las series temporales en el espacio tiempo-frecuencia.

**Tabla 3.1.** Estaciones meteorológicas con series de precipitación con periodos más extensos

Número	Nombre de la estación	Latitud (° N)	Longitud (° O)	Altitud (msnm)	Periodo
1	Quebrada Azul	10.40	-84.47	83	1962-2019
2	San Vicente	10.29	-84.38	1640	1973-2019
3	Zarcelo	10.19	-84.40	1736	1950-2019
4	La Selva	10.43	-84.00	40	1971-2019
5	La Lola	10.09	-83.39	40	1949-2013
6	Limón	9.96	-83.03	5	1942-2019
7	Sixaola Day	9.53	-82.64	10	1985-2019



**Figura 3.1.** Localización de las 7 estaciones (cuadrados en violeta) con el periodo más extenso (1942-2019) en la RTHC. Los círculos en negro representan las estaciones seleccionadas para el estudio. Los polígonos en verde (anaranjado) corresponden a las plantaciones de banano (piña) de la región. La numeración de las estaciones se encuentra en sentido noroeste-sureste y el detalle en la [Tabla 3.1](#).

### Método de promedios móviles

De acuerdo con [Poblete et al. \(2013\)](#), los promedios móviles para un período de duración seleccionado, consisten en una serie de medias aritméticas (simples o ponderadas) calculadas a lo largo del tiempo. Además, recomiendan que el periodo sea impar para que la media móvil esté centrada en el período ([Montgomery et al. 1990](#)).

La media móvil ponderada centrada de 11 años, filtra las variaciones con periodos inferiores a 10 años y conserva las variaciones interdecadales ([Hu et al. 1998](#)). Los pesos asignados desde el primero hasta el undécimo año de la ventana son: 1/24, 1/24, 1/12, 1/8, 1/8, 1/6, 1/8, 1/8, 1/12, 1/24 y 1/24 respectivamente. La simetría de la distribución de pesos garantiza que no se produzca ningún desplazamiento de fase de las variaciones de la serie

temporal una vez aplicado el filtro (Penalba y Vargas, 2004; Rivera et al. 2013; Pospieszńska y Przybylak, 2019).

### Método de transformada de wavelet

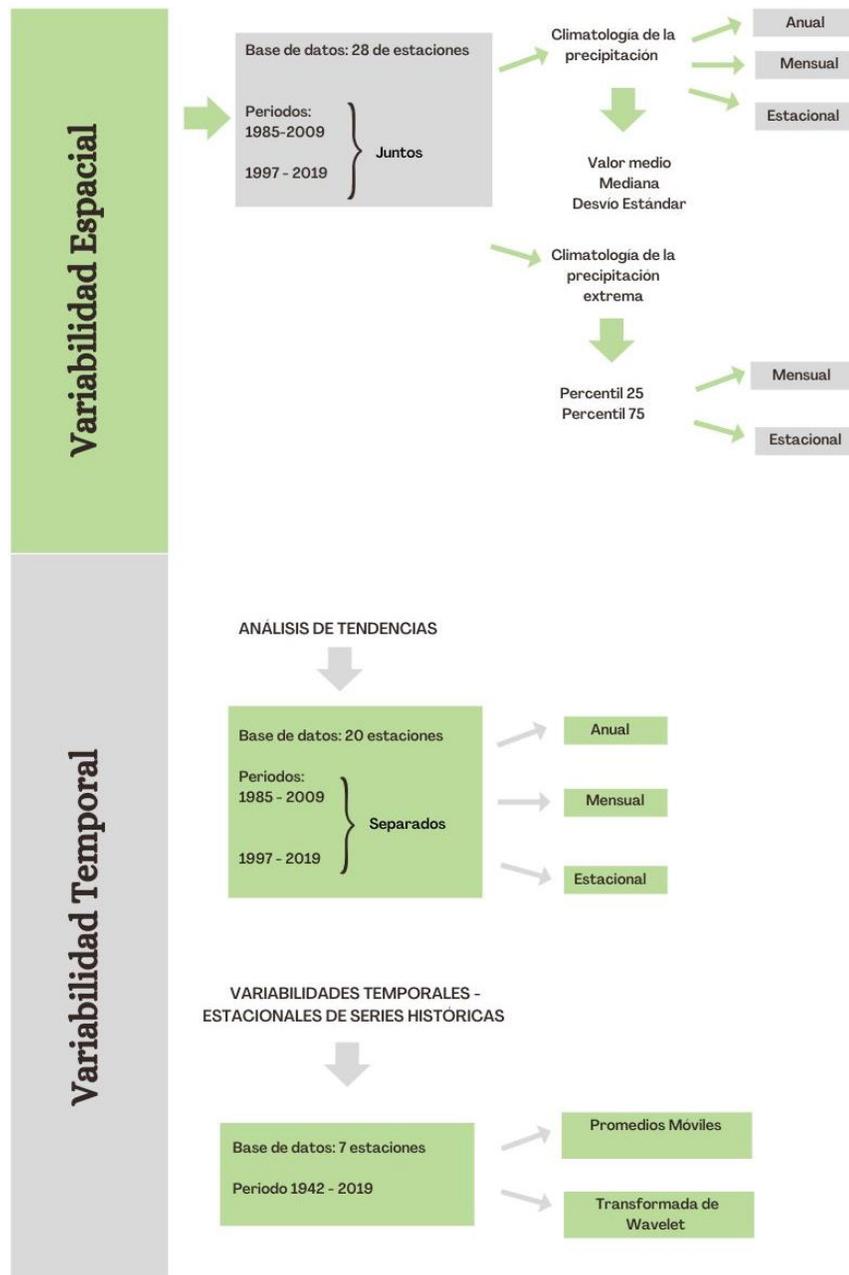
El análisis de ciclos a través de la transformada de wavelet es una herramienta común para el análisis de variaciones no estacionarias del poder espectral en series temporales geofísicas (Anctil y Coulibaly, 2004). A diferencia de la transformada de Fourier, la de wavelet descompone una serie temporal en componentes de variación en un espacio continuo frecuencia-tiempo (Torrence y Compo, 1998). El análisis wavelet ofrece numerosas ventajas en comparación con el análisis espectral, ya que proporciona una localización temporal de la señal (Pasquini et al. 2006). En síntesis, este método descompone ciclos e identifica dónde son predominantes en el tiempo. Se seleccionó la función madre de Morlet por ser una ondícula compleja, ampliamente utilizada en las ciencias atmosféricas con mejor localización tiempo-frecuencia que otras ondículas reales (Morlet et al. 1982; Penalba y Vargas, 2004; Addison, 2005; Rivera et al. 2013; Rathinasamy et al. 2019).

Dado que se trata de series temporales de longitud finita, se podrían producir errores al principio y al final de los espectros de potencia de las ondículas, lo que se conoce como “aliasing” (Torrence y Compo, 1998; González-Flores et al. 2016), éste se presenta cuando la frecuencia del patrón se aproxima a la frecuencia del muestreo (Chae et al. 2013).

A fin de ignorar los efectos de borde, se introdujo un cono de influencia, el cual corresponde a la región del espectro de ondículas con tiempo de decaimiento 1/e para la autocorrelación del espectro de poder de onditas en cada escala. La información que quede dentro del cono de influencia no es tomada en cuenta en el análisis. La significancia estadística de las periodicidades obtenidas con el análisis de wavelet, se evaluó para cada serie temporal, utilizando un espectro de ruido blanco, con un nivel de confianza del 95%. Se obtuvo el primer coeficiente de correlación igual a cero y se testeó con el Test de Anderson (ecuación 1), donde N es la cantidad de datos, t es el tiempo de desfase y 1.645 es la constante para el nivel de significancia de 5% utilizado.

$$r_{(t)} = \frac{-1 \pm 1.645 \sqrt{N-2}}{N-t} \quad (1)$$

Como síntesis de la metodología, la [Figura 3.2](#) presenta esquemáticamente el proceso.



**Figura 3.2.** Síntesis del proceso metodológico para el análisis de la variabilidad espacial y temporal

### 3.3. Resultados

Los resultados se dividen en dos partes: en la primera, se analiza la variabilidad espacial de la precipitación anual, mensual y estacional, así como los percentiles 25 y 75 de la precipitación mensual. La segunda, pone foco en los resultados del análisis de tendencias y en los ciclos de las estaciones meteorológicas de mayor longitud de datos (históricas) en el periodo más extenso de 1942-2019.

#### 3.3.1. Climatología de la precipitación en diferentes escalas temporales

Este análisis permitirá comprender cómo es la variación espacial en la RTHC del ciclo anual de la lluvia, su distribución mensual y estacional (DEF, MA, JJA y SO) (poniendo énfasis en el sector agrícola).

##### Escala Anual

En primer lugar se analiza la distribución espacial de la precipitación anual en la RTHC de Costa Rica ([Figura 3.3](#)). El total de precipitación anual presenta una variación espacial en toda la VC, con una media regional de alrededor de 4000mm. Las mayores cantidades (por arriba de 7000mm) se encuentran sobre la cordillera que separa las vertientes del Caribe y del Pacífico, siguiendo una línea suroeste-noreste que coincide con las llanuras situadas cerca de la costa del mar Caribe ([Figura 3.3](#)). Las precipitaciones anuales más bajas, alrededor de 2000mm o menos, ocurren en el norte cerca de la frontera con Nicaragua y el sureste del área de estudio ([Chacón y Fernández, 1985](#); [Fernández et al. 1996](#)). La desigual distribución de las precipitaciones anuales en la región coincide con la encontrada por [Pérez-Briceño et al. \(2017\)](#) para el periodo 1960-2011.

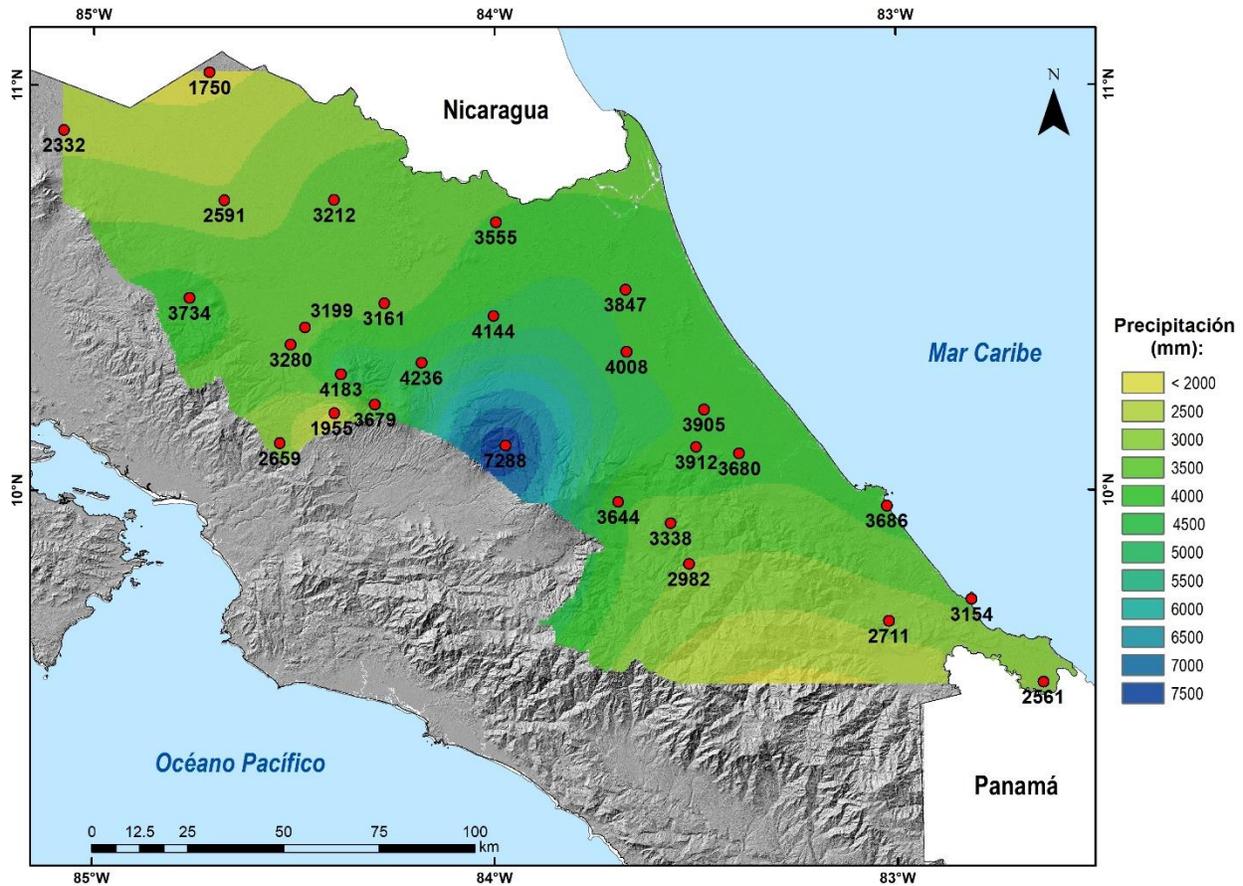
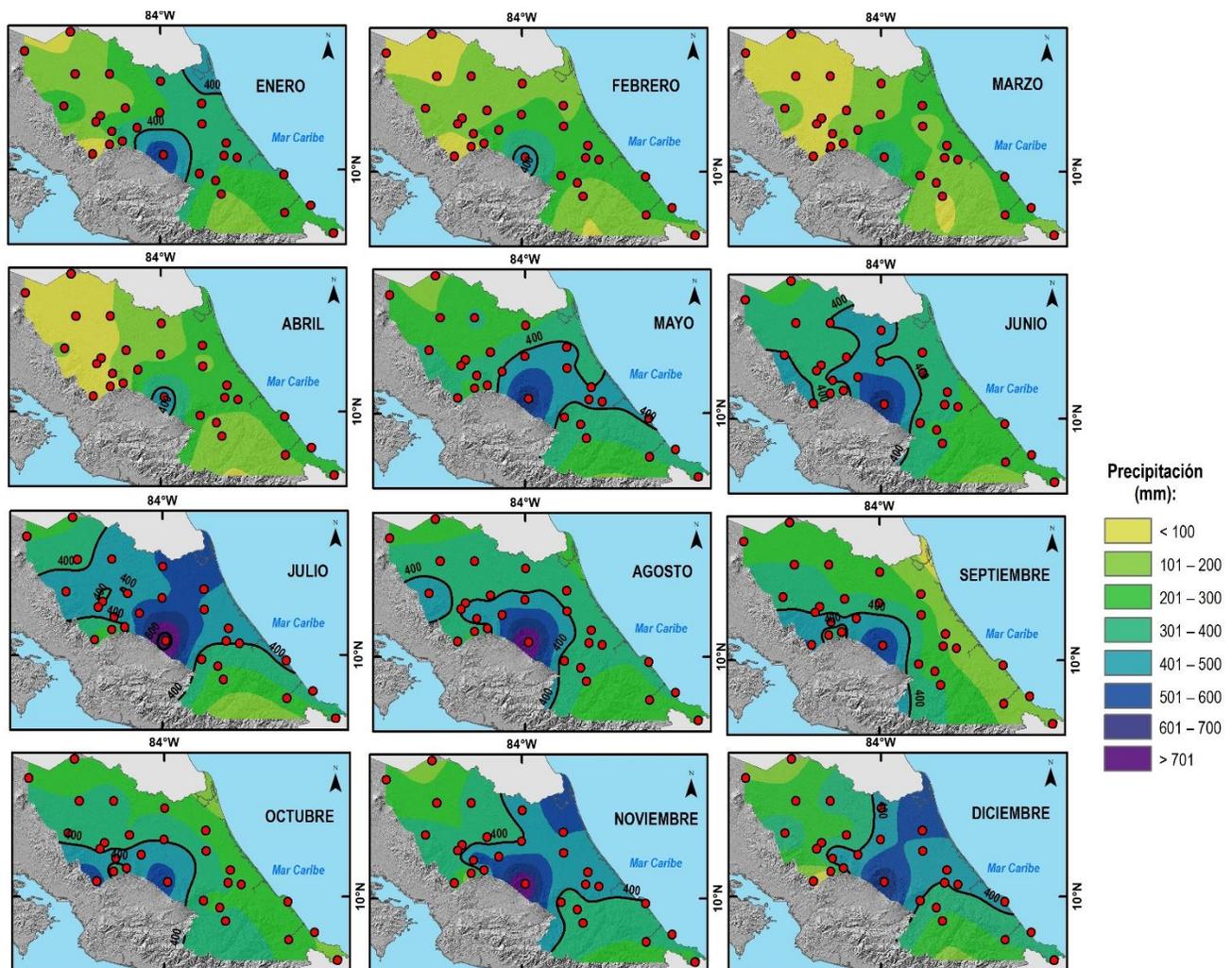


Figura 3.3. Precipitación media anual (mm) en la RTHC, Costa Rica.

### Escala Mensual

Seguidamente se analiza el comportamiento espacial de las precipitaciones mensuales (Figura 3.4). Analizando la región de interés como un todo, se observa que los máximos de precipitación ocurren en los meses de junio a agosto y en noviembre y diciembre. En estos meses los máximos ocurren en una franja espacial comprendida entre el noreste y suroeste de la región. En particular, diciembre presenta esta franja que conecta el noreste de la costa caribeña con la cordillera en el suroeste, con precipitaciones mayores a 500mm. Este patrón espacial también se observa en julio (más intenso), y en agosto (menos intenso). El patrón espacial de las precipitaciones de enero es similar a julio, noviembre y diciembre, con menores valores. El máximo de enero (600mm) está localizado en la estación cordillerana La Montura y en el litoral noroeste (Punta Castilla, 500mm) disminuyendo hacia el oeste del

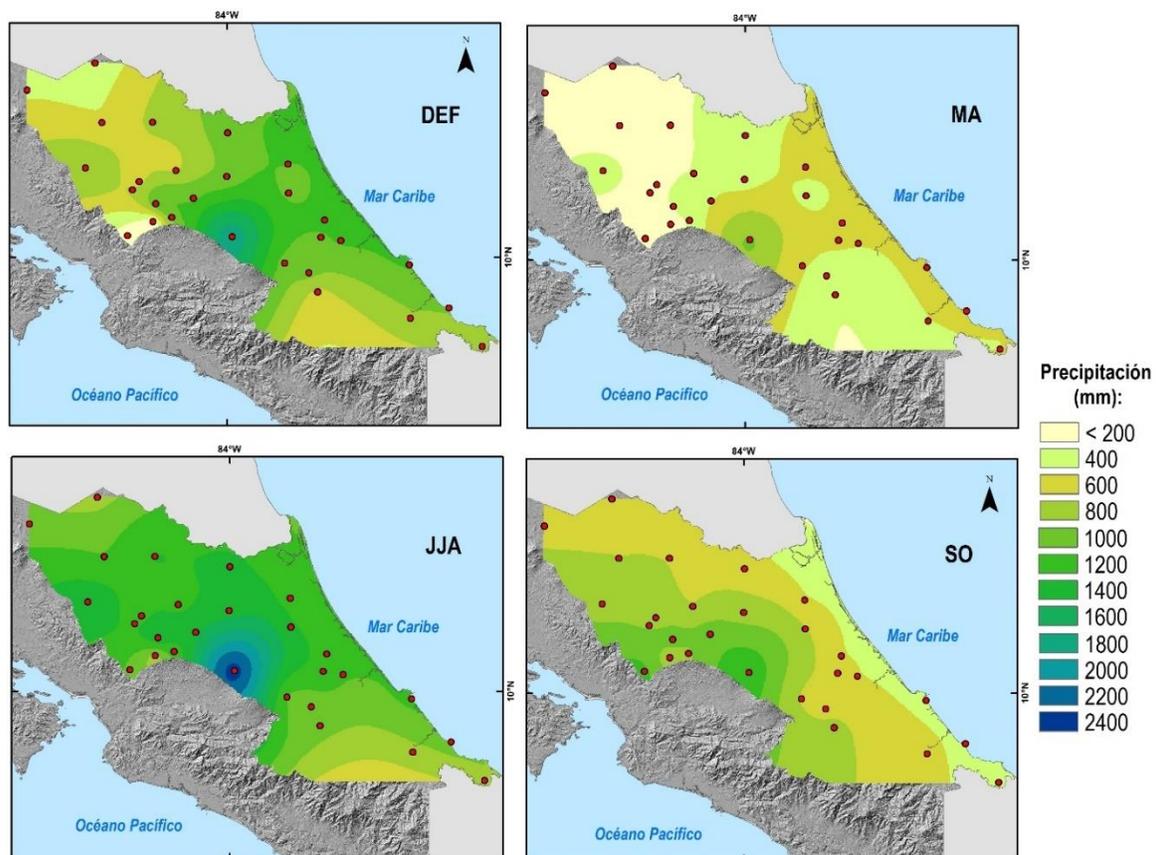
área de estudio (lluvias menores a 200mm en las estaciones Upala y Comando Los Chiles). En enero y febrero se observa un comportamiento espacial similar al del ciclo anual de lluvias, con picos en la cordillera (principalmente en el suroeste) y valores mínimos tanto en el extremo noroeste en la frontera con Nicaragua como en el extremo sureste de la región (Figuras 3.3 y 3.4). En marzo y abril se observan las menores lluvias (inferiores a 100mm por mes). Los meses de septiembre y octubre presentan una variación espacial menos pronunciada a lo largo de la costa caribeña y un mayor gradiente montaña-costa. Las cantidades mayores de lluvia siguen observándose en la cordillera disminuyendo hacia la costa caribeña nororiental, con una diferencia de 500mm entre ambos puntos (Figura 3.4).



**Figura 3.4.** Total de Precipitación mensual (mm) en la RTHC, Costa Rica: La línea negra indica el contorno de 400mm.

### Escala Estacional

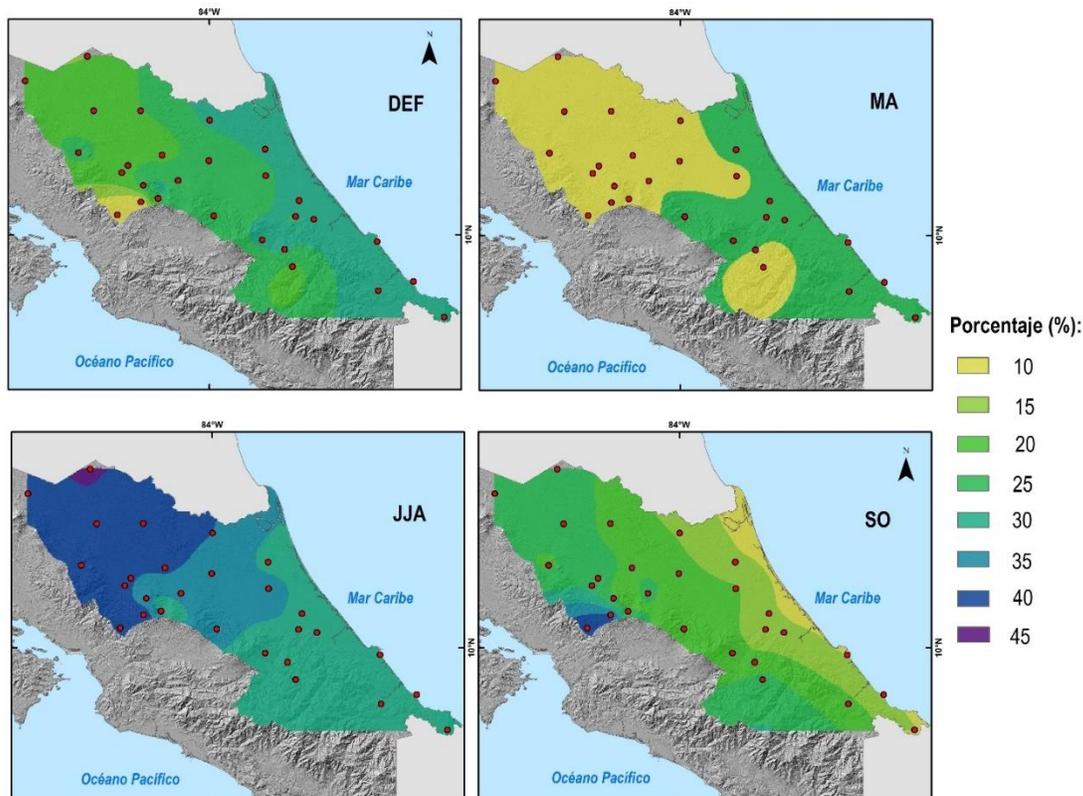
Dada la importancia de la variabilidad estacional de las precipitaciones para el sector agrícola (banano y piña), se realizó un análisis detallado de las precipitaciones en los bimestres Marzo-Abril (MA) y Septiembre-Octubre (SO), y en los trimestres Diciembre-Febrero (DEF) y Junio-Agosto (JJA) (Figura 3.5). El bimestre MA es el que presenta los menores valores de precipitación (entre 200-600mm). En SO se observa un cambio en el régimen pluviométrico, los menores valores siguen la línea costera del Caribe (menores a 400mm), y los máximos ocurren en la zona montañosa (1000-1200mm). DEF presenta las mayores precipitaciones a lo largo de la costa del Caribe (1200-1400mm) y en la cordillera (1800mm). Con respecto al trimestre JJA se observa una distribución espacial similar a la de la climatología de la precipitación anual, con máximos superiores a 2000mm en una parte de la cordillera y mínimos en el noroeste y el sureste de la región (600-800mm) (Figura 3.5).



**Figura 3.5.** Precipitaciones estacionales totales (mm) en DEF, MA, JJA, y SO, en la RTHC, Costa Rica.

Con base en lo anterior, se observa un cambio en la distribución espacial de las precipitaciones en DEF y JJA, presentando ambos trimestres valores máximos sobre la costa y en sectores de la zona montañosa. En los bimestres, los valores mínimos se observan al noroeste (menores a 200mm) y los máximos (alrededor de 600mm) sobre la líneas costera en MA; mientras en SO se da el patrón contrario, ya que los mínimos ocurren a lo largo de la costa (menores a 400mm) y los máximos sobre la cordillera (alrededor de 1000mm).

Además del análisis del comportamiento regional de las precipitaciones estacionales, se analizó la contribución de éstas a los totales anuales, en porcentaje (Figura 3.6). En general, se observan cambios espaciales según la época del año. El bimestre MA, concentra menos del 25% de la precipitación anual, con un gradiente noroeste-sureste. Los menores porcentajes (10%) se encuentran en la zona norte y noroeste y en la costera y cordillerana corresponde a un 25% aproximadamente. En el bimestre SO, el patrón espacial cambia, la zona costera explica menos del 15% de la precipitación anual mientras que las contribuciones en la cordillera superan el 35%.



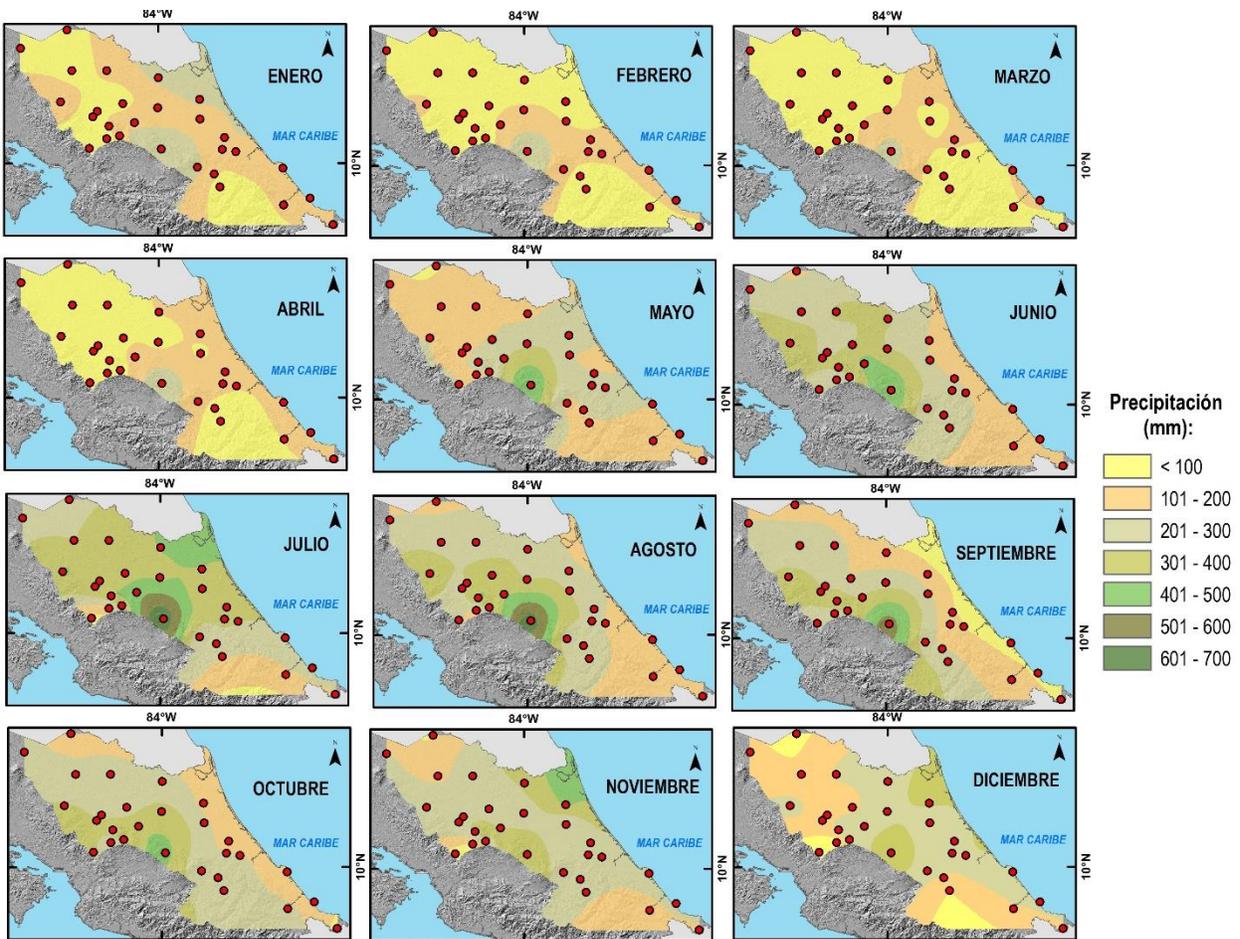
**Figura 3.6.** Contribución (%) del total de la precipitación en distintas estaciones-bimestres, trimestres- al total de precipitación anual en la RTHC, Costa Rica.

Trimestralmente, alrededor del 20-30% de la precipitación anual se produce en DEF. Se observa un mínimo de porcentaje en una zona montañosa en el suroeste, cerca de la frontera con la VP que explica hasta el 10% de la precipitación anual. En JJA, las contribuciones cercanas y superiores al 40% se concentran en el norte de la región de estudio. Estos resultados evidencian que aproximadamente el 70% de la precipitación de la región se concentra entre los trimestres DEF y JJA ([Figura 3.6](#)).

### 3.3.2. Climatología de los eventos extremos de precipitación

#### Escala Mensual

Con el fin de analizar el comportamiento espacial de las precipitaciones mensuales extremas de cada mes, en las [Figuras 3.7](#) y [3.8](#), se muestran los percentiles 25 y 75. Iniciando con el percentil 25 ([Figura 3.7](#)), se puede observar que algunos meses presentan un patrón espacial muy similar al de la precipitación mensual del mes correspondiente ([Figura 3.4](#)). Por ejemplo, los meses de enero, marzo, septiembre y octubre son los que presentan mayores similitudes. Se destaca que el primer cuatrimestre del año (enero a abril) es el periodo con mayores ocurrencias de lluvias por debajo de 100mm en casi toda la RTHC, principalmente en febrero y marzo para las áreas del norte y el sureste. En abril, la línea costera presenta lluvias entre 100-200mm (mismo patrón que se produce en el percentil 25 en junio, agosto y octubre). Es interesante observar que a partir de mayo y hasta agosto, toda la región presenta lluvias entre 200 y 700mm. Los máximos sobresalen en julio, cercanos a la estación La Montura sobre la cordillera (700mm) y al norte en Punta Casilla (500mm). Para septiembre y octubre sobresale el gradiente montaña-costa (disminuciones hacia la costa), siendo más importantes los mínimos del percentil 25 en septiembre (por debajo de 100mm). En noviembre y diciembre se visualiza un patrón espacial similar, aunque el percentil 25 de diciembre presenta los valores mínimos en la región noroeste y sureste. Los máximos valores del percentil 25 en ambos meses se ubican en La Montura y en Punta Casilla, siendo este último más alto en noviembre (400-500mm) que en diciembre (300-400mm) ([Figura 3.7](#)). Estos resultados son de importancia para el sector agrícola (banano y piña), al tomar en cuenta que ambos cultivos necesitan lluvias mínimas mensuales de 200mm (banano) y 100mm (piña) ([Robinson y Galán-Sauco, 2010](#); [Soto, 2014](#)).



**Figura 3.7.** Percentil 25 de la precipitación mensual, RTHC, Costa Rica.

En cuanto al percentil 75 (Figura 3.8), el patrón espacial presentado en febrero, mayo, julio y diciembre es muy similar al que presenta la precipitación media mensual de dichos meses (Figura 3.4). Es posible identificar que entre febrero y abril, así como septiembre, se dan los mínimos valores (menores a 100 y hasta 500mm), mientras que en enero, entre mayo y agosto, y entre octubre y diciembre, se concentran los máximos valores (entre 200 y más de 700mm), siendo los meses de junio-julio y noviembre-diciembre, los que presentan los mayores valores del percentil 75 y de manera más generalizada para la región. A partir de mayo y hasta agosto, puede verse que los valores del percentil 75 van en aumento y expandiéndose a toda la RTHC, hasta presentar en julio y agosto lluvias por arriba de 400mm en prácticamente toda la región, con una franja característica norte-sur (límite norte con Nicaragua-estación La Montura) con lluvias de 600mm al norte hasta más de 700mm en la cordillera. En septiembre y octubre, el gradiente cordillera-costa (presentado en el análisis

de la precipitación mensual y en el percentil 25) se sigue visualizando, siendo mayor en septiembre, donde los mínimos (100-200mm) se dan en la línea costera. Por su parte noviembre y diciembre encierran máximos (mayores a 700mm) en la cordillera (estación La Montura) y en el caso de diciembre se observa otro máximo en la costa norte del Caribe (700mm). En estos últimos dos meses del año, la región del noroeste es la que presenta los menores valores (entre 100 y 400mm). Tomando en cuenta que la ocurrencia de lluvia por encima de 500mm es perjudicial para los cultivos de banano y piña (Robinson y Galán-Saucó, 2010; Guzmán y González, 2021) se destacan dos momentos en el año con lluvias por arriba de este umbral en algunas subregiones de la RTHC, siendo el primero de mayo a agosto, y el segundo de noviembre a enero. Algunas áreas presentan precipitaciones superiores a los 700mm, ocurriendo principalmente en los meses de junio-julio y noviembre-diciembre.

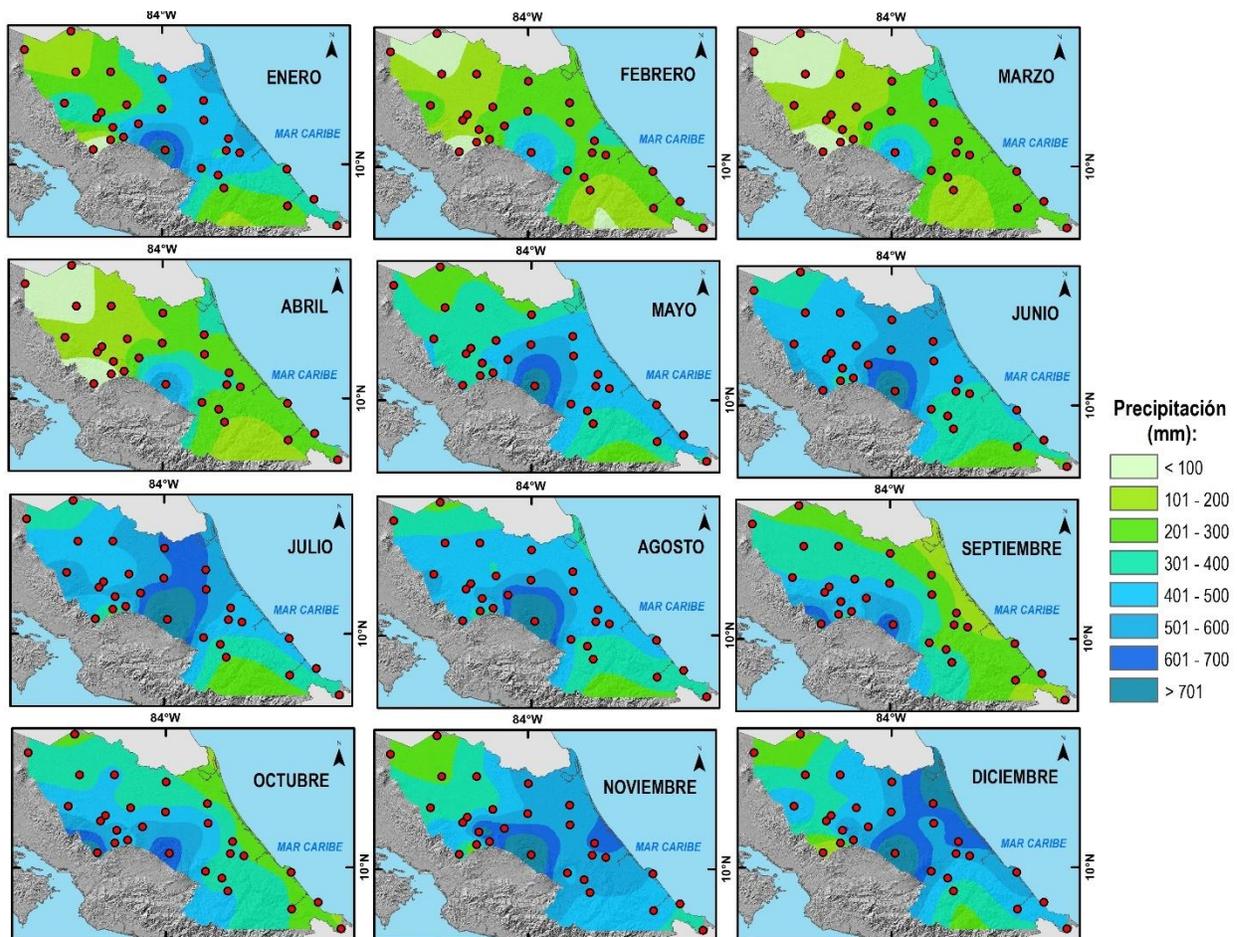
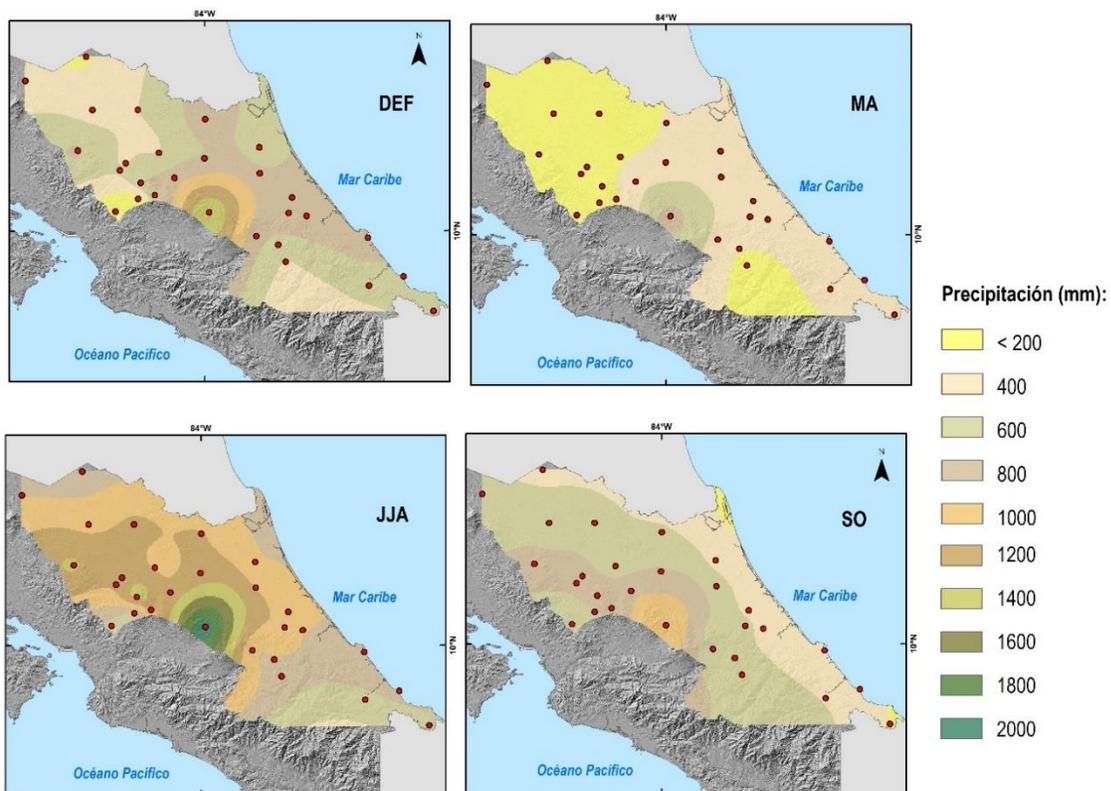


Figura 3.8. Percentil 75 de la precipitación mensual, RTHC, Costa Rica.

## Escala Estacional

Siguiendo con el análisis en la [Figura 3.9](#) se presenta el percentil 25 para DEF, JJA, MA y SO. Los patrones espaciales de DEF y de SO son similares a los analizados en la precipitaciones media de estas estaciones ([Figura 3.5](#)). Sin embargo, para MA hay precipitaciones por debajo de 600mm en toda la región, a excepción de la estación La Montura. Además, presenta una extensa región hacia el noroeste con valores por debajo de 200mm. SO presenta montos por debajo de 400mm en la franja fronteriza con Nicaragua y las planicies cercanas a la costa caribeña donde se cultiva banano. Valores por debajo de 200mm se observan en Punta Castilla en el extremo litoral norte. En SO el gradiente montaña-costa sigue siendo importante. En DEF, el comportamiento del percentil 25 es heterogéneo, con mínimos entre 200 y 400mm al noroeste y máximos entre 800 y 1000mm hacia el este (costa caribeña) y la cordillera. JJA presenta cantidades de lluvia entre 800 y 1200mm en casi toda la región. Respecto al sector agrícola, MA presentaría la mayor amenaza para los cultivos de piña en el noroeste de la RTHC, donde los montos de precipitación se ubicarían menores a 200mm.



**Figura 3.9.** Percentil 25 de la precipitación estacional, RTHC, Costa Rica.

En lo que se refiere al percentil 75 (Figura 3.10), los patrones espaciales de JJA y SO son más similares a los identificados en la precipitación media correspondiente (Figura 3.5). Bimestralmente, MA presenta un aumento de las precipitaciones hacia el este (con montos por debajo de 200 hasta 800mm en la costa del Caribe). En SO, el gradiente montaña-costa se evidencia con valores que van entre 1600mm en la cordillera hasta 800mm en la línea costera. Por su parte DEF y JJA sobresalen con las lluvias más elevadas (superiores a 1000mm para casi toda la región), siendo más intenso en JJA que en DEF. La región con los mayores montos se ubica en el centro de la RTHC, con distribución latitudinal sur-norte, donde las mayores precipitaciones (superiores a 2000mm) se concentran en el sur sobre la zona montañosa en ambos trimestres y van en disminución hacia el norte con montos entre 1400-1600mm. El patrón de lluvias por arriba de 2000mm es importante en JJA, donde su influencia abarca la estación La Montura y otras cercanas como San Miguel y La Selva.

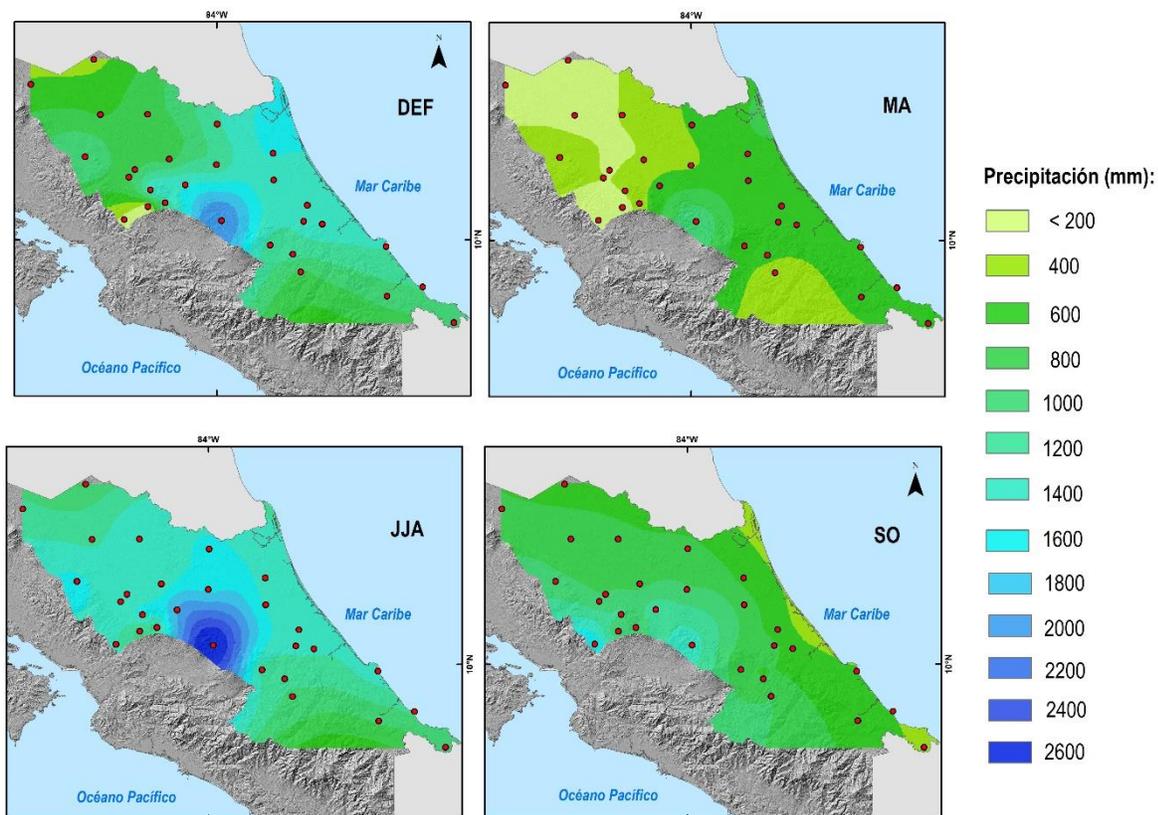


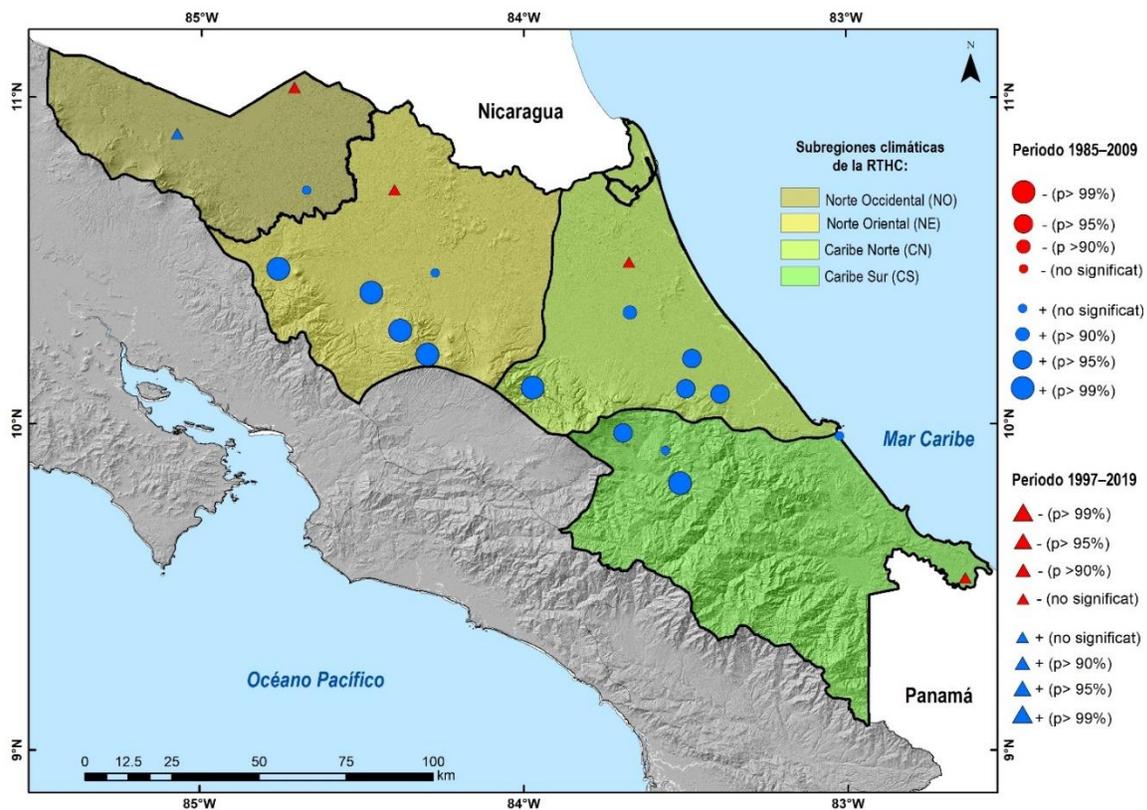
Figura 3.10. Percentil 75 de la precipitación estacional, RTHC, Costa Rica.

### 3.3.3. Análisis de tendencias

El estudio de variabilidad temporal se inició con un análisis de tendencias no paramétrico. Para ello se utilizaron las estaciones que no presentaban datos faltantes (20 estaciones), en los 2 periodos seleccionados: 1985-2009 (15 estaciones) y 1997-2019 (5 estaciones).

#### Tendencias Anuales

En general, las tendencias de las precipitaciones anuales son estadísticamente positivas y significativas para la mayoría de las estaciones en el primer periodo (círculos azules-Figura 3.11); observándose la mayor significancia (99%) en las estaciones situadas sobre la cordillera. La segunda importancia (95%) se ubicó específicamente en la subregión CN, en 3 estaciones cercanas (La Lola, Siquirres y Hacienda El Carmen). Por el contrario, en el periodo 1997-2019 las tendencias son negativas y no significativas en 4 de las 5 estaciones. Upala (ubicada al noroeste) presentó signo positivo sin ser significativo (Triángulos-Figura 3.11).



**Figura 3.11.** Tendencia de la precipitación anual en la RTHC, Costa Rica. Círculos (periodo 1985-2009), triángulos (periodo 1997-2019). El color azul (rojo) representa las tendencias positivas (negativas). Se muestran las 4 subregiones climáticas de la RTHC en sentido noroeste-sureste.

## Tendencias Mensuales

El análisis del comportamiento espacial de las tendencias mensuales de la precipitación (Figura 3.12) mostró un comportamiento heterogéneo tanto en el espacio como en el tiempo. Como visualización general, se observa que los primeros meses del año (enero-abril) se caracterizan por tendencias positivas en su mayoría de las estaciones para el primer periodo (1985-2009) aunque no significativas, salvo en abril cuando 2 estaciones sobre la cordillera (La Montura y Bajos del Toro) presentan significancia. En estos primeros meses las estaciones del segundo periodo (1997-2019) son en su mayoría negativas y no significativas. Las precipitaciones del mes de mayo presentan tendencias positivas con un leve aumento en la significancia para el primer periodo sobre la cordillera, mientras para el segundo periodo se observa un cambio de signo a positivo. Esta tendencia positiva y significativa se presenta también en los meses de junio y julio. Sin embargo, el resto de las estaciones (periodo 1985-2009), en junio y julio las tendencias no son significativas. A partir de agosto y hasta octubre, se da un cambio de signo para el primer periodo, siendo no significativo para agosto, pero aumenta fuertemente en septiembre para las estaciones ubicadas en la subregión CN. En octubre se mantiene el patrón de tendencias negativas, pero la significancia disminuye, siendo significativas 1 estación en el CN (Hacienda El Carmen) y 1 en el CS (Pacuar). En este mes las estaciones del segundo periodo permanecen negativas (a excepción de Upala en la subregión NO). Para noviembre ocurre un resultado bastante llamativo, ya que todas las estaciones del primer periodo cambian a signo positivo y significativas al 99% (a excepción de San Jorge en la subregión NO). En diciembre se mantiene el patrón de tendencias positivas pero bajan las significancias drásticamente, siendo significativas solo 2 estaciones sobre la cordillera (Bajos del Toro y Guayabo). Para el segundo periodo, en diciembre solo la estación Cantagallo en el CN muestra una tendencia negativa-no significativa (Figura 3.12).

En síntesis, los resultados más sobresalientes de este análisis los presentan los meses de septiembre y noviembre, en donde se destacan por su significancia en el periodo 1985-2009 (Figura 3.12), aunque con signos opuestos.

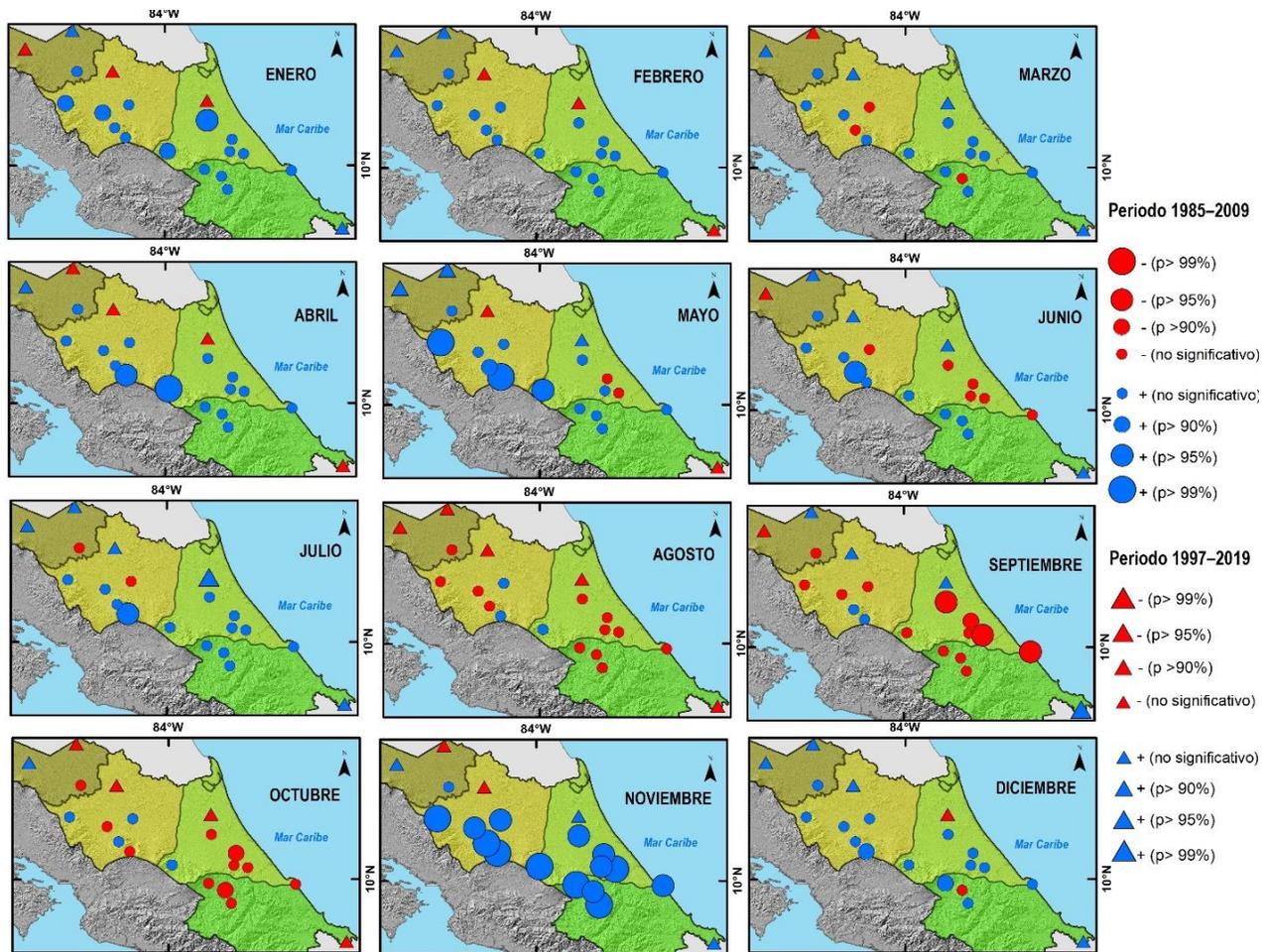


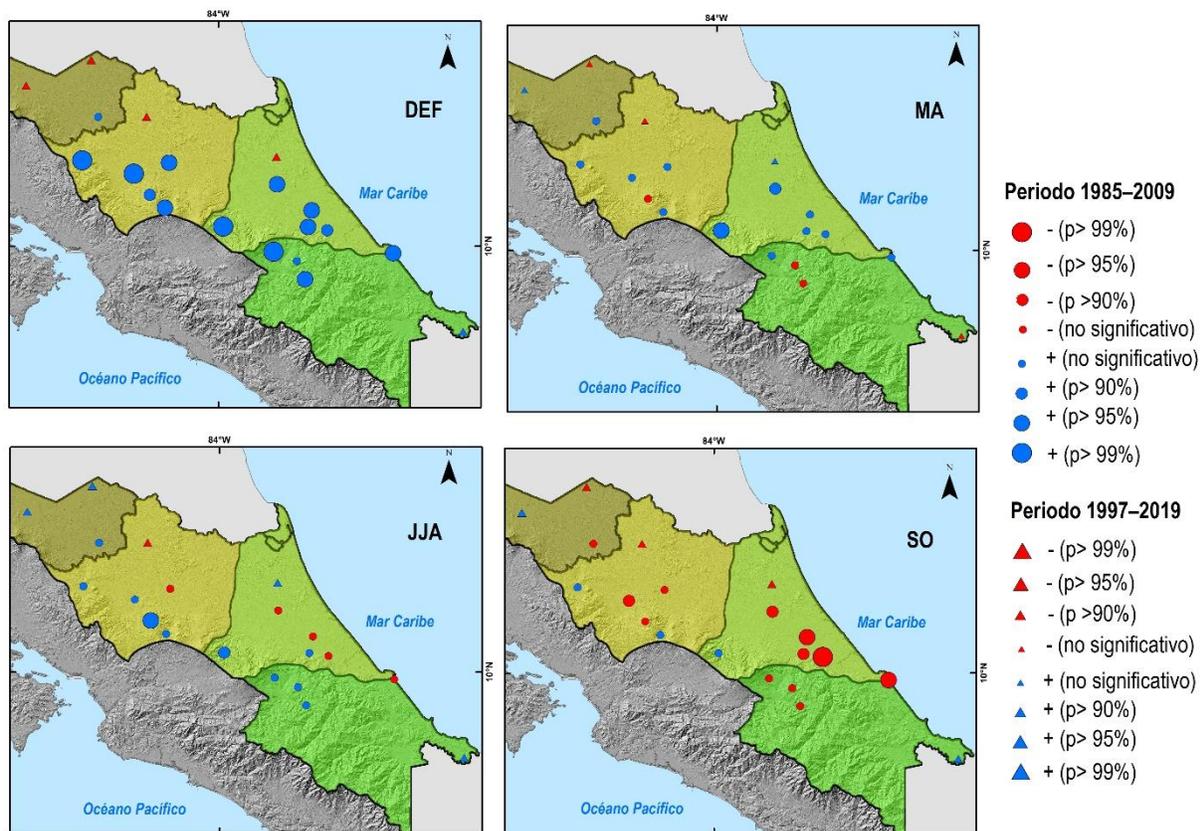
Figura 3.12. Tendencia mensual de la precipitación en la RTHC, Costa Rica. El color azul (rojo) representa las tendencias positivas (negativas).

### Tendencias Estacionales

Bimestralmente, MA para el periodo 1985-2009 en general, presenta tendencias positivas, siendo significativas las ubicadas en la zona montañosa, específicamente Bajos del Toro y La Montura. En SO, se observa un predominio de tendencias negativas significativas cerca de la costa, principalmente en el norte para el primer periodo. Además, en la zona de montaña, las tendencias son positivas en algunas estaciones del sur y el suroeste y negativas en el sureste, aunque ninguna de ellas es significativa (Figura 3.13). Trimestralmente, DEF en el periodo 1985-2009 muestra un cambio categórico en la tendencia de la precipitación, que se vuelve positiva y significativa en la mayoría de las estaciones, particularmente en las subregiones

NE, CN y CS. Se destacan tendencias más marcadas tanto en la cordillera como en las llanuras de CN. Sólo 2 estaciones no presentan significación estadística en DEF (Figura 3.13). La comparación del resultado con las tendencias de los meses individuales (Figura 3.12) muestra que cada uno presenta tendencias positivas en prácticamente todas las estaciones estudiadas, siendo enero la que contribuye más en la significancia.

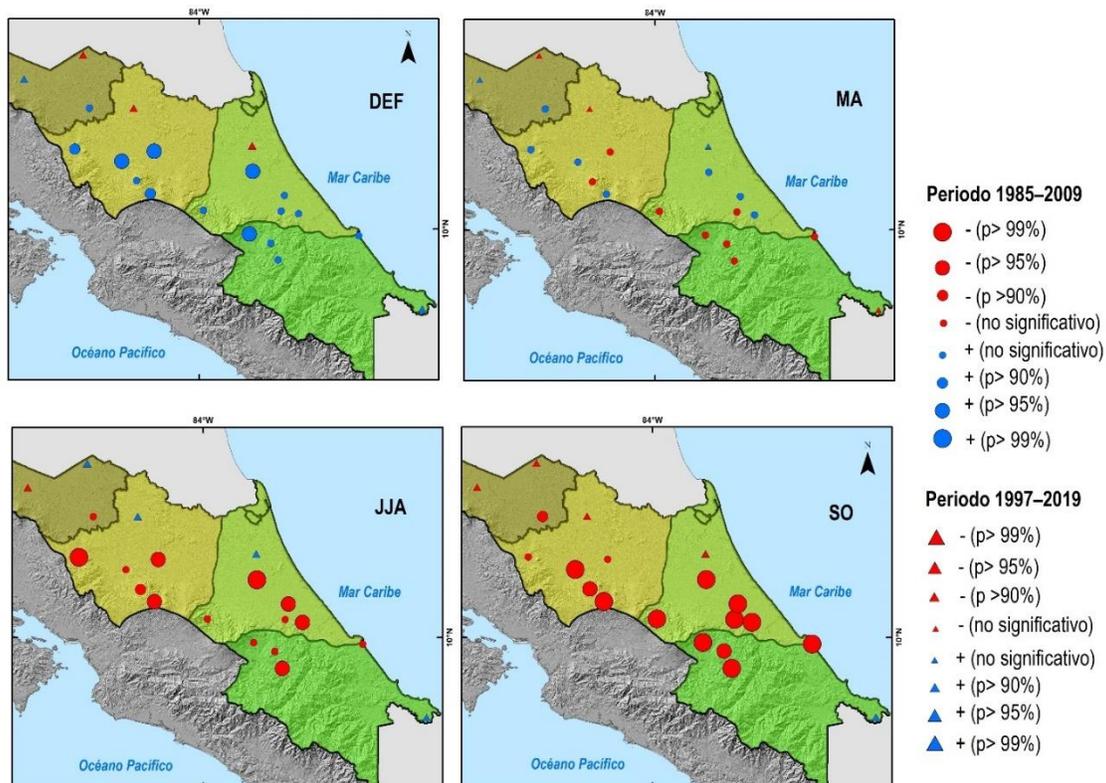
Las tendencias del JJA en el periodo 1985-2009 son positivas y significativas sólo en un par de estaciones cercanas a la zona montañosa, mientras que en las llanuras del Caribe (por debajo de los 200msnm) cercanas a la zona costera se observan tendencias negativas, aunque no significativas. Durante este trimestre, el comportamiento de las precipitaciones de junio y agosto juegan un papel importante en la subregión del CN, donde las estaciones presentan tendencias negativas, que cambian de signo en julio (Figura 3.12).



**Figura 3.13.** Tendencia estacional de la precipitación en la RTHC, Costa Rica. Se muestra la división de las 4 subregiones climáticas de la RTHC (NO, NE, CN y CS). El color azul (rojo) representa las tendencias positivas (negativas). Se muestran las 4 subregiones climáticas de la RTHC en sentido noroeste-sureste.

### Tendencias de la contribución estacional

A partir de los resultados obtenidos en las secciones anteriores (contribución de las distintas estaciones a la precipitación anual y el comportamiento dispar de las tendencias de la precipitación anual y estacional) y dada la importancia de estas épocas del año (estaciones) para los cultivos de banano y piña, se analizaron las tendencias de las contribuciones de cada estación a la precipitación total anual (Figura 3.14). En MA las tendencias no son significativas, sin un comportamiento espacial homogéneo. Es interesante observar que aunque la precipitación total anual presenta una tendencia positiva, la tendencia de las contribuciones de las estaciones JJA y SO a la tendencia anual es negativa y significativa en la mayoría de las estaciones (principalmente en SO). Por otro lado, DEF presenta tendencias positivas con valores significativos en la zona de montaña. El comportamiento de la tendencia en el periodo 1997-2019 es desigual y no significativo (Figura 3.14). Las tendencias en las estaciones del periodo más reciente (1997-2019) no son significativas.



**Figura 3.14.** Porcentaje de la tendencia de la precipitación estacional sobre la tendencia de la precipitación anual. El color azul (rojo) representa las tendencias positivas (negativas).

### 3.3.4 Variabilidades temporales-estacionales en las series con periodos más extensos

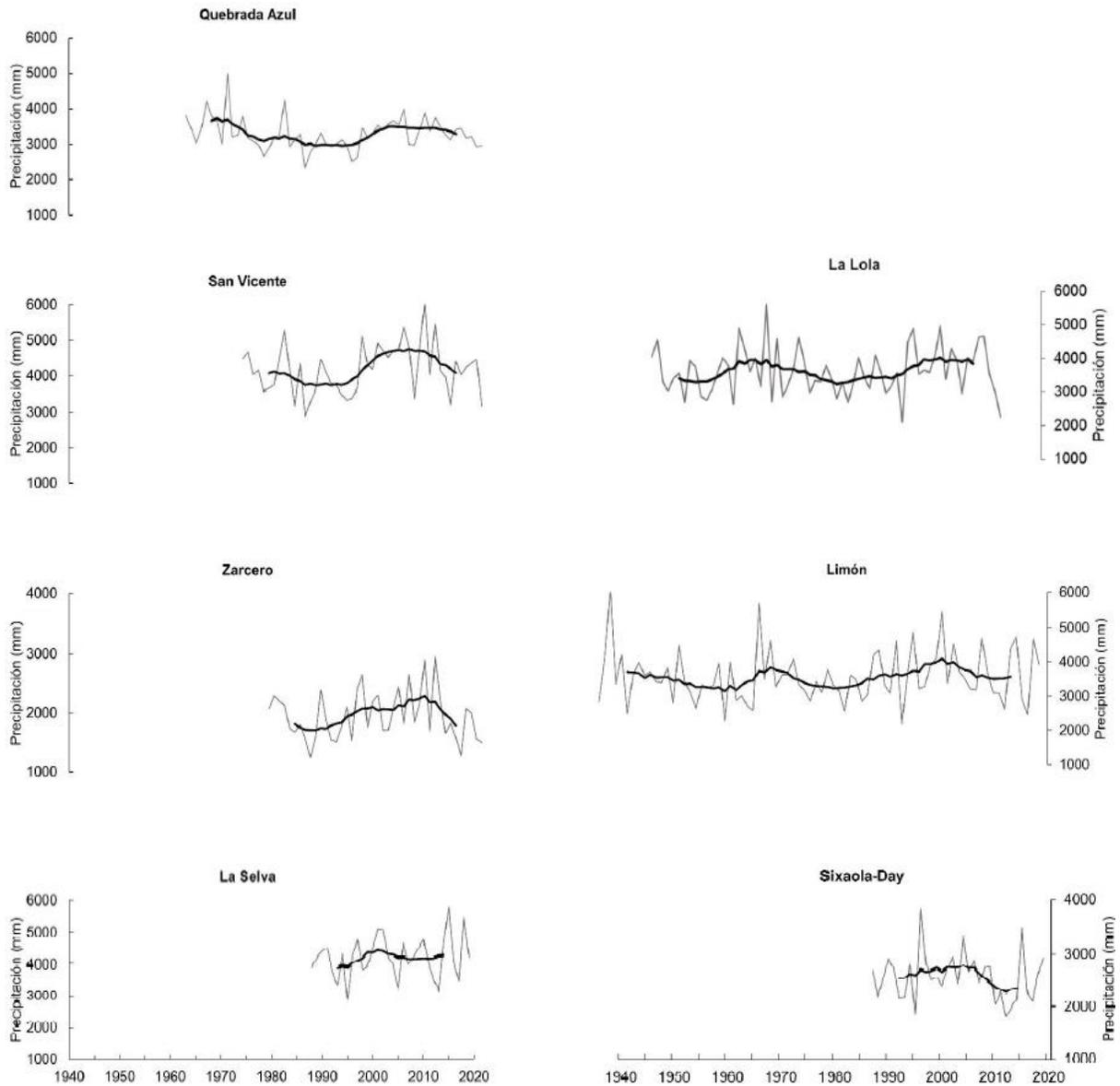
#### Promedios móviles

Dadas las características climatológicas de la región y las tendencias significativas encontradas en la sección anterior, se seleccionaron las estaciones con registros históricos (7 estaciones, [Figura 3.1](#)), con el propósito de evaluar variabilidades de baja frecuencia presentes en la región. El periodo más largo (78 años) lo presentó la estación Limón y el más corto (35 años) la estación Sixaola Day. El análisis se realizó para la precipitación anual ([Figura 3.15](#)) y los totales estacionales ([Figuras 3.16 a 3.19](#)), a partir de promedios móviles ponderados centrados de 11 años.

#### Análisis Anual

En términos generales, la precipitación anual media (línea fina) presenta anomalías negativas en comparación con su media ponderada (línea gruesa), observándose 2 periodos: uno en torno a 1985-1995 y otro a partir del 2010 hasta el final del periodo ([Figura 3.15](#)). El primer periodo de anomalías negativas se observa principalmente en las estaciones de la subregión NE (Quebrada Azul, San Vicente, Zarcero y La Selva) y La Lola en el CN. La disminución a partir del 2010 hasta 2019, es evidente en toda la región. De manera intercalada a estos periodos, aparece un aumento alrededor del 2000 que se mantiene hasta el 2010. Este es bastante representativo en la estación San Vicente, y en las estaciones de las llanuras del Caribe (La Lola, Limón y Sixaola\_Day) se observa desde alrededor de 1995 y culmina antes del 2010. No obstante, la duración de estos periodos y la intensidad de las anomalías negativas o positivas dependerán de cada estación y de la subregión climática.

Para las estaciones con periodos más extensos (desde 1970) como Quebrada Azul, La Lola y Limón, se observan bajos valores de precipitación anual entre 1970 y 1980. El componente de variación interdecadal de la precipitación anual es más evidente en la estación San Vicente, donde después de un periodo de disminución (1980-1990), hay un rápido ascenso desde 1990 que se mantiene hasta alrededor del 2010 ([Figura 3.15](#)).



**Figura 3.15.** Series temporales de la precipitación anual en las estaciones seleccionadas (línea fina) con un filtro de promedio móvil de 11 años (línea gruesa).

La estación Quebrada Azul, mostró una disminución de la precipitación anual a partir de la década de 1970 y un periodo húmedo a partir del 2000, que también se evidenció en la estación San Vicente. Zarcerro y La Selva presentan un comportamiento muy similar, caracterizando a la subregión NE. Las estaciones del CS (Limón y Sixaola Day) presentan un leve aumento entre 1995 y el 2005, luego se da una disminución y se observa un primer pico negativo en 2012 y una abrupta disminución entre 2016-2017.

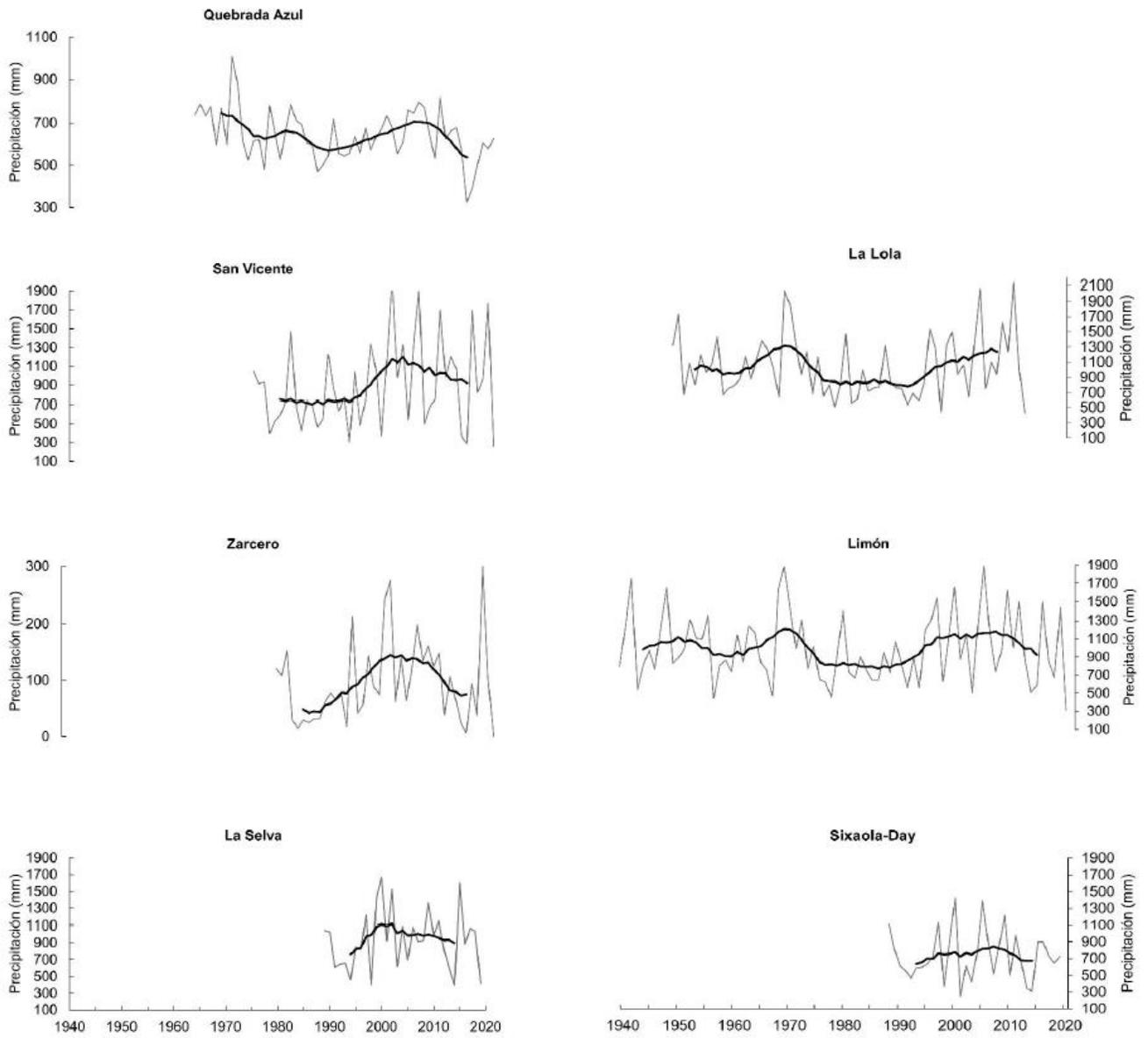
## Análisis Estacional

El análisis estacional presenta notables diferencias entre las distintas épocas del año y entre subregiones climáticas, por lo que sus observaciones se realizan de manera separada para cada estación climática (DEF, MA, JJA y SO).

Inicialmente en la [Figura 3.16](#), se muestra el análisis para los meses del invierno boreal (DEF). Este trimestre presenta un comportamiento similar en toda la región, principalmente se identifica un periodo húmedo entre 2000-2015. En las estaciones de la costa del Caribe inicia en 1995, siendo más evidente en las estaciones Quebrada Azul, San Vicente y La Selva en la subregión NE entre 1990-2000. Por otro lado, las estaciones del CN y CS, presentan un largo periodo de 20 años con disminuciones entre 1975 y 1995. Resulta interesante el comportamiento de la estación San Vicente, que presenta un salto a finales de los 90, pasando de precipitaciones por debajo de los 900mm a lluvias por arriba de los 1100mm entre el 2000 y el 2015. Las estaciones Zarcero y La Selva, en el NE, presentaron aumentos en todo el periodo de análisis, así como la estación Sixaola Day en el CS.

Este análisis en DEF, sobre todo en las estaciones del CN y CS, concuerda con lo encontrado por [Alvarado y Fernández \(2001\)](#), quienes resaltaron el periodo de inviernos secos que se registró en la VC desde 1975, dentro del cual se presentaron episodios de El Niño y La Niña.

En el bimestre MA ([Figura 3.17](#)), el componente de la variación interdecadal se observa principalmente en las estaciones Quebrada Azul, Zarcero y La Lola. En las demás estaciones se observa principalmente una variación interanual. Por otro lado, toda la región presenta 2 periodos con disminución (1990-2000 / 2010 en adelante) a excepción de la estación Zarcero que presenta un comportamiento inverso a las demás en todos los periodos, y la estación La Selva presenta un aumento desde 1990 que se mantiene hasta el 2010, ambas en la subregión NE. Por su parte, las estaciones con períodos más largos, ubicadas en las costas del Caribe (La Lola y Limón) presentan un periodo de anomalías húmedas considerables entre 1955 y 1970, con máximos de lluvias a inicios de los 60 y de los 70. Las 3 estaciones del Caribe presentan menores precipitaciones en los 90, principalmente en 1994 y 1997, relacionadas posiblemente con los eventos El Niño ([Alvarado y Fernández, 2001](#)).



**Figura 3.16.** Series temporales de la precipitación en DEF en las estaciones seleccionadas (línea fina) con un filtro de media móvil de 11 años (línea gruesa).

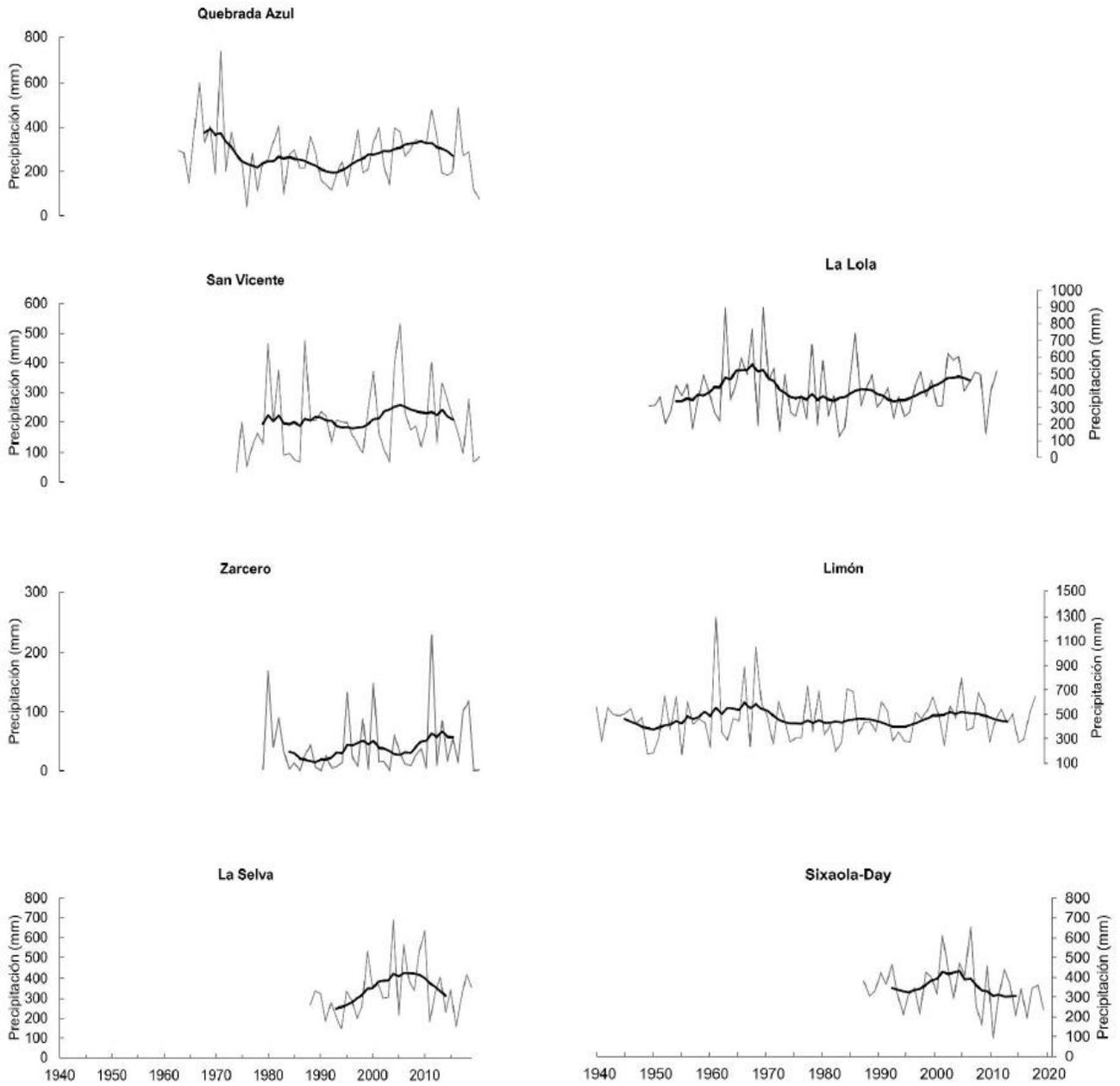
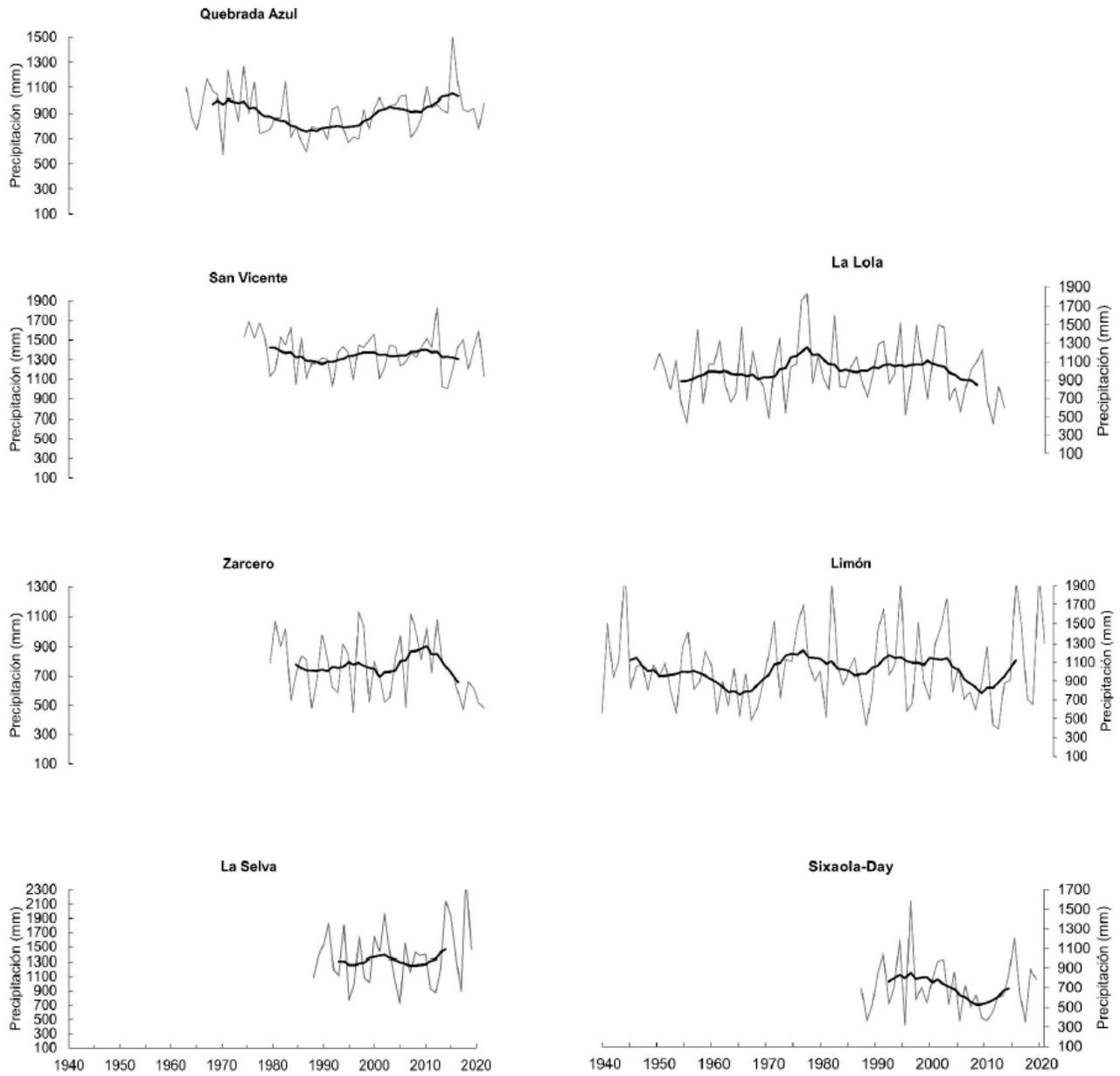


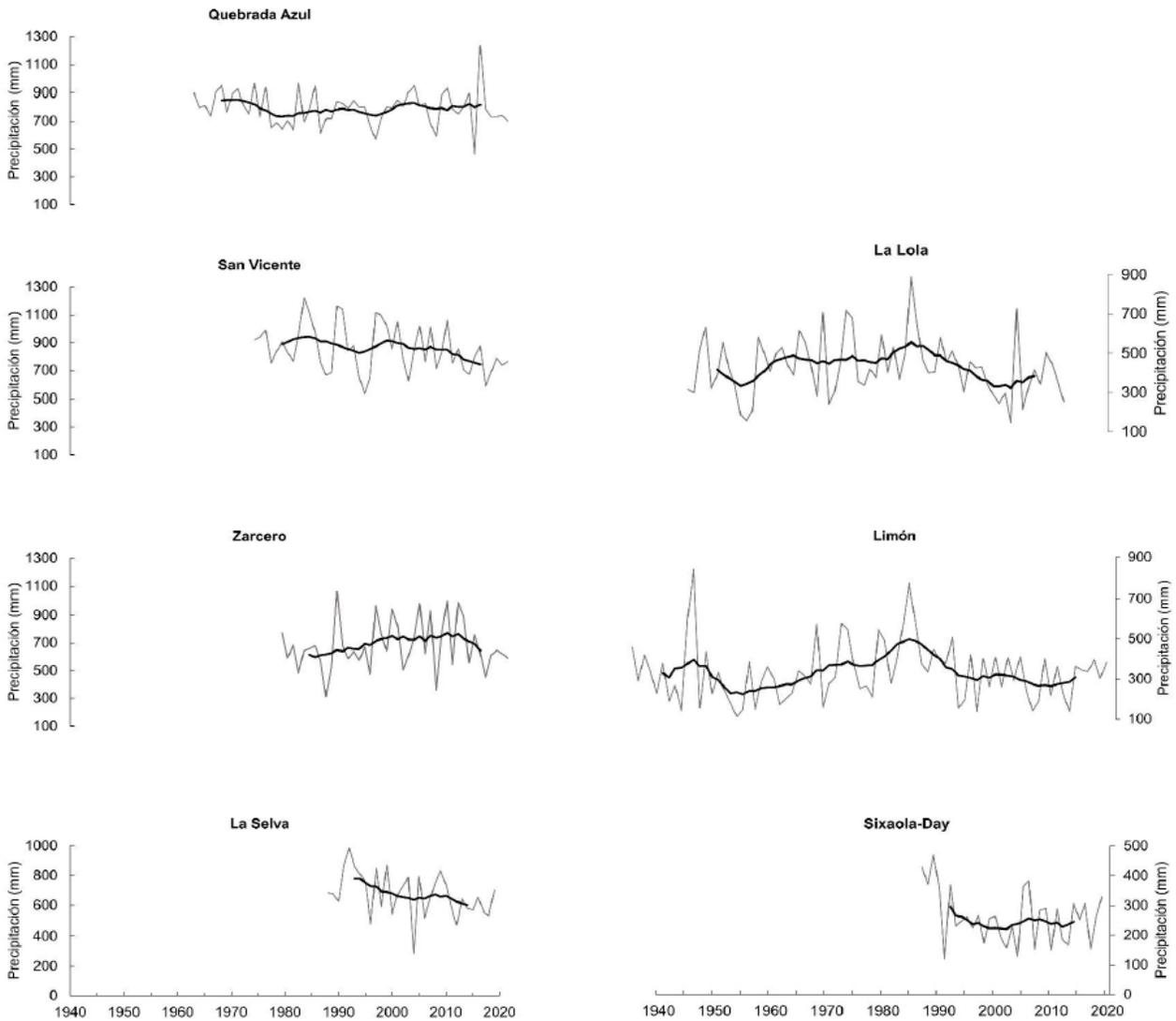
Figura 3.17. Series temporales de la precipitación en **MA** en las estaciones seleccionadas (línea fina) con un filtro de media móvil de 11 años (línea gruesa).

Los meses del verano boreal (**JJA**), presentan un comportamiento distinto entre subregiones ([Figura 3.18](#)). Por un lado, la subregión NE presenta similitudes en 3 de sus estaciones (Quebrada Azul, San Vicente y La Selva), por ejemplo, un periodo largo con disminuciones en dicho trimestre entre 1980 y el 2000. Además, el comportamiento es distinto entre estaciones (Quebrada Azul presenta aumentos de precipitación entre 2000 y 2010, mientras que La Selva después de un máximo de lluvias alrededor del 2005, vuelve con disminuciones). Llama la atención el comportamiento inverso de Zarcero, con variabilidad interanual muy marcada y un aumento de precipitación entre el 2005-2015. Las 3 estaciones del Caribe presentan los mismos resultados desde 1990 y hasta el 2015 (variación interdecadal importante, principalmente entre 1960 y 1990).

El bimestre **SO**, presenta comportamientos heterogéneos entre las estaciones del NE y más homogéneos entre las estaciones de las llanuras del Caribe ([Figura 3.19](#)). Por un lado, las estaciones San Vicente y La Selva, tienen disminuciones en el periodo 1995-2015, mientras que en el mismo periodo, Zarcero presenta aumentos y Quebrada Azul ninguna variación importante. Por su parte, en el Caribe, La Lola y Limón, comparten un periodo de anomalías positivas entre 1980 y 1990, seguido por negativas desde 1990 y hasta el 2015, siendo el mismo caso de Sixaola Day para este último periodo. Esto a su vez concuerda con el análisis de tendencia observadas negativas y significativas ([Figura 3.13](#)), en SO. Para Limón (estación con mayor longitud de datos), se identifica otro periodo con escasas precipitaciones entre 1950 y 1970.



**Figura 3.18.** Series temporales de la precipitación en **JJA** en las estaciones seleccionadas (línea fina) con un filtro de media móvil de 11 años (línea gruesa).



**Figura 3.19.** Series temporales de la precipitación en SO en las estaciones seleccionadas (línea fina) con un filtro de media móvil de 11 años (línea gruesa).

### Transformada de wavelet

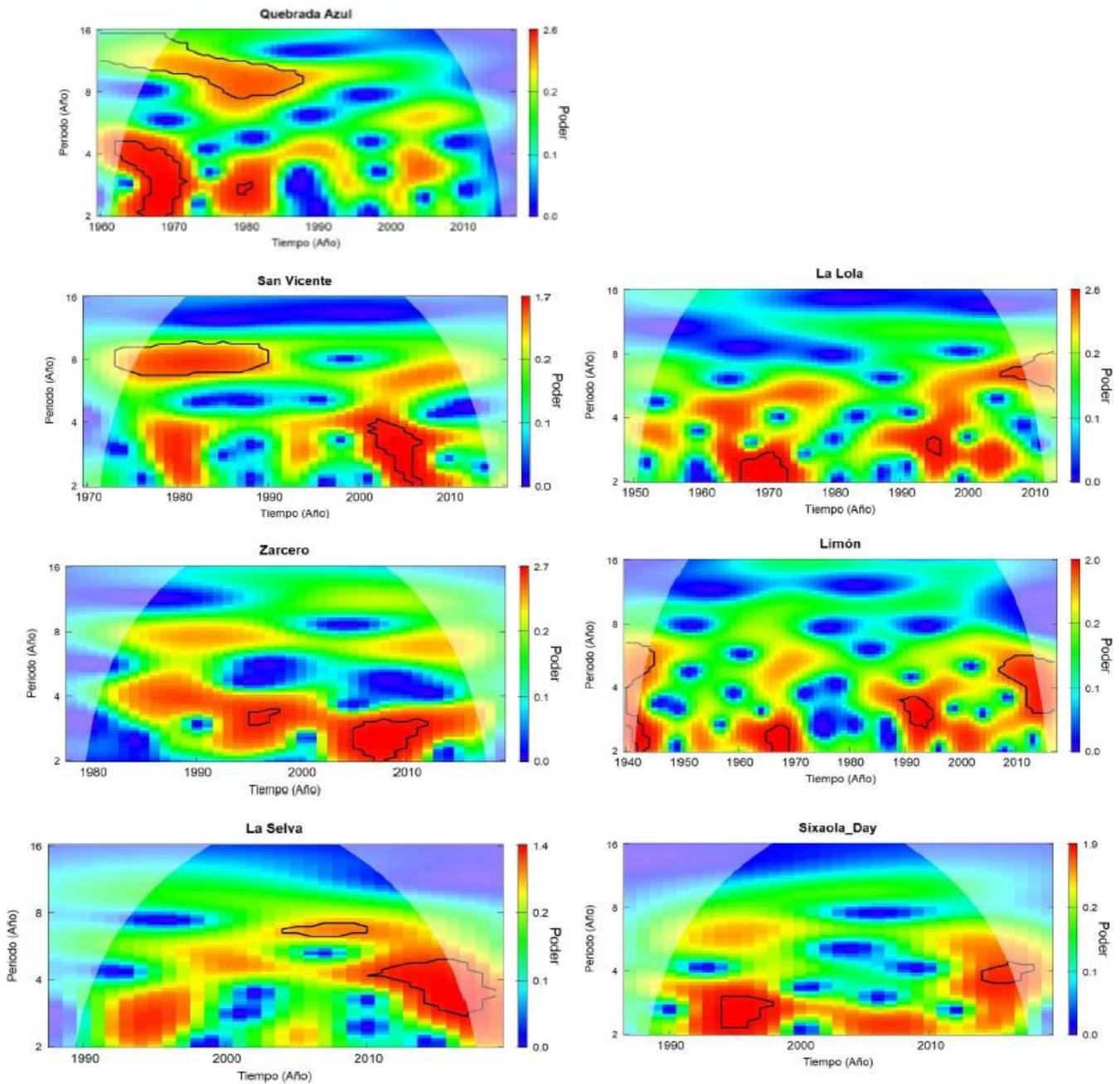
Para analizar ciclos y cuas Ciclos, y su ubicación temporal, se aplicó la transformada de wavelet con la función madre de Morlet a las series temporales de la precipitación anual y estacional en las 7 estaciones meteorológicas seleccionadas. Inicialmente, para cada serie se analizó el primer coeficiente de autocorrelación resultando no significativo (Test de Anderson, significancia 95%, resultado no mostrado).

## Análisis Anual

La característica más marcada para la precipitación anual es la variabilidad por debajo de los 10 años en toda la región de estudio ([Figura 3.20](#)). Únicamente la estación Quebrada Azul, presentó fuera de su cono de influencia, una periodicidad significativa por encima de los 10 años entre 1970-1990 aproximadamente. Esta significancia se observa únicamente en San Vicente, pero con periodicidades más cercanas a los 8-10 años. Entre los 4 y 8 años, las estaciones de San Vicente, Zarcero y La Selva presentan altos valores de energía, alrededor del 2005-2010, siendo significativo únicamente en La Selva. Esta misma variabilidad, en las estaciones del CN y CS, se presentó alrededor de 1995 y hasta el 2010 en La Lola y Limón.

La mayoría de las estaciones mostraron periodos significativos con valores entre 2 y 4 años, siendo significativas entre el 2000 y 2010 para San Vicente y Zarcero. Por su parte La Selva, y las 3 estaciones del CN y CS (La Lola, Limón y Sixaola Day), presentaron significancias en el mismo rango de años, pero cercanas al final del periodo, alrededor del 2015, aunque gran parte de la variabilidad cayó dentro del cono de influencia. La Lola y Limón, al ser las estaciones con el registro de años más largo, presentaron una periodicidad significativa en el rango de 2 a 4 años en 1970, lo cual se identifica también en Quebrada Azul, pero su ubicación podría estar influenciada por el “aliasing”. Resulta interesante el comportamiento de las 3 estaciones de las llanuras del Caribe, presentando periodicidades significativas (2-4 años) en 3 momentos: alrededor de 1970, cerca de 1990 y al final del periodo, después del 2010 ([Figura 3.20](#)).

Es probable que exista una conexión entre estos resultados y la señal del ENSO y otros procesos oceánicos y climáticos. Por ejemplo, [Trenberth \(1997\)](#) y [Weng y Lau \(1996\)](#), observaron escalas temporales de variabilidad interanual centradas en 3.5 años en muchos índices climáticos relacionados con el ENSO. El Niño se asocia con eventos inusuales de fuerte calentamiento que ocurren cada 2 a 7 años y van de la mano con las anomalías del Pacífico tropical ([Wang y Fiedler, 2006](#); [McPhaden et al. 2021](#)). No obstante, el análisis de los procesos y mecanismos físicos se analizará en detalle en el [Capítulo 4](#) de la tesis.



**Figura 3.20.** Transformada de Wavelet de la precipitación anual en las estaciones seleccionadas. El contorno grueso, en negro, encierra regiones con una confianza superior al 95%. Las regiones sombreadas con transparencia, en ambos extremos indican el cono de influencia. El eje x no es igual en cada caso ya que depende del periodo de datos de las estaciones.

## Análisis Estacional

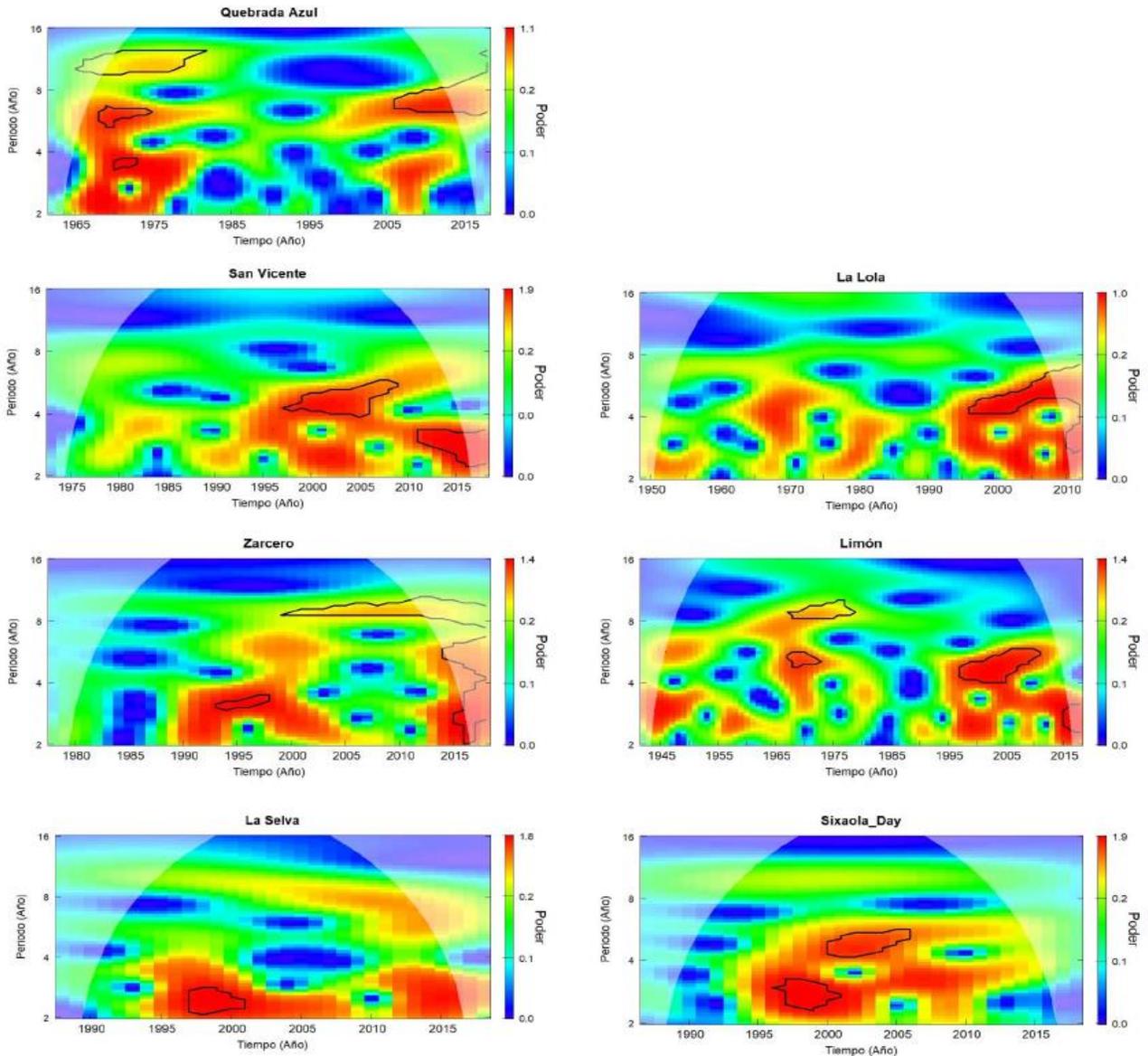
El análisis de wavelets se llevó a cabo para las distintas estaciones del año. Para **DEF** (Figura 3.21), se observan significancias de distintas variabilidades al final del periodo en casi todas las estaciones de la región (después del 2000). Las variabilidades significativas alrededor de los 10 años aparecen en las estaciones Quebrada Azul y Zarcero. Esta última, presenta una variabilidad de 10 años desde el 2000 hasta el 2015. Las variabilidades ubicadas entre 4 y 8 años se observan en San Vicente, La Lola y Limón entre el 2000-2010.

Para el caso de **MA** (Figura 3.22). En torno a los 10 años, la estación San Vicente es significativa alrededor de 1980-1985. Las variabilidades entre 6-8 años se observan en San Vicente, La Selva y Sixaola Day, siendo significativo solo en San Vicente entre el 2000-2010. Quebrada Azul, La Lola y Limón, presentan una variabilidad alrededor de los 4 años, significativa entre 1970 y 1975 que se extiende a 1980 en La Lola; Quebrada Azul también presenta otra cerca del 2000.

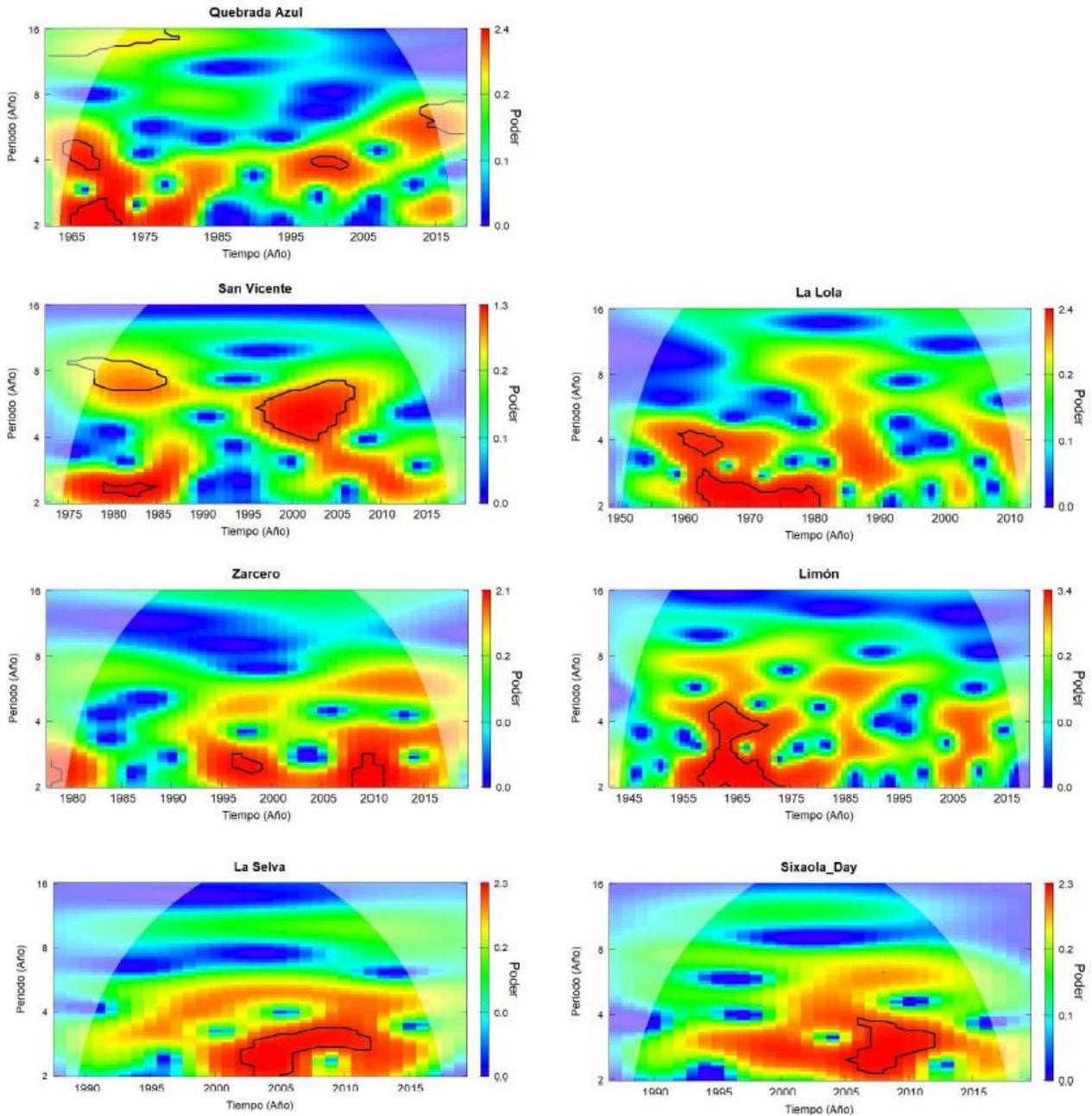
En **JJA**, las variabilidades significativas más importantes oscilan entre 4-8 años, a excepción de Quebrada Azul que presenta una interdecadal cercana a los 10 años en 1975-1985 y otra alrededor de los 16 años casi al final del periodo. Todas las estaciones presentan oscilaciones significativas entre los 4-8 años pero en distintos periodos. Por ejemplo, San Vicente y La Selva lo presentan alrededor del 2010-2015, mientras Zarcero presenta un poder alto muy extenso, desde 1985 y continua hasta el 2015 aproximadamente alrededor de los 4 años, siendo significativo el periodo 1985-2000. Las estaciones La Lola y Limón, presentan patrones bastante similares con variabilidades entre los 4-8 años en 2 momentos: primero alrededor de 1970-1975 y después entre 1995 y el 2000.

En el bimestre **SO**, 4 de las 7 estaciones presentan variabilidades por arriba de los 8 años, lo cual podría estar más relacionado a variabilidades interdecadales. San Vicente y La Selva presenta una variabilidad de 10 años entre 1990-2000. En el caso de las llanuras del Caribe, en La Lola y Limón, la variabilidad se da entre 10 y 15 años al inicio del periodo (1945-1960). Luego ambas comparten un periodo de 20 años (1970-1990) con una variabilidad entre 4 y 8 años. Limón presenta además una variabilidad alrededor de los 6-4 años cerca de 1950.

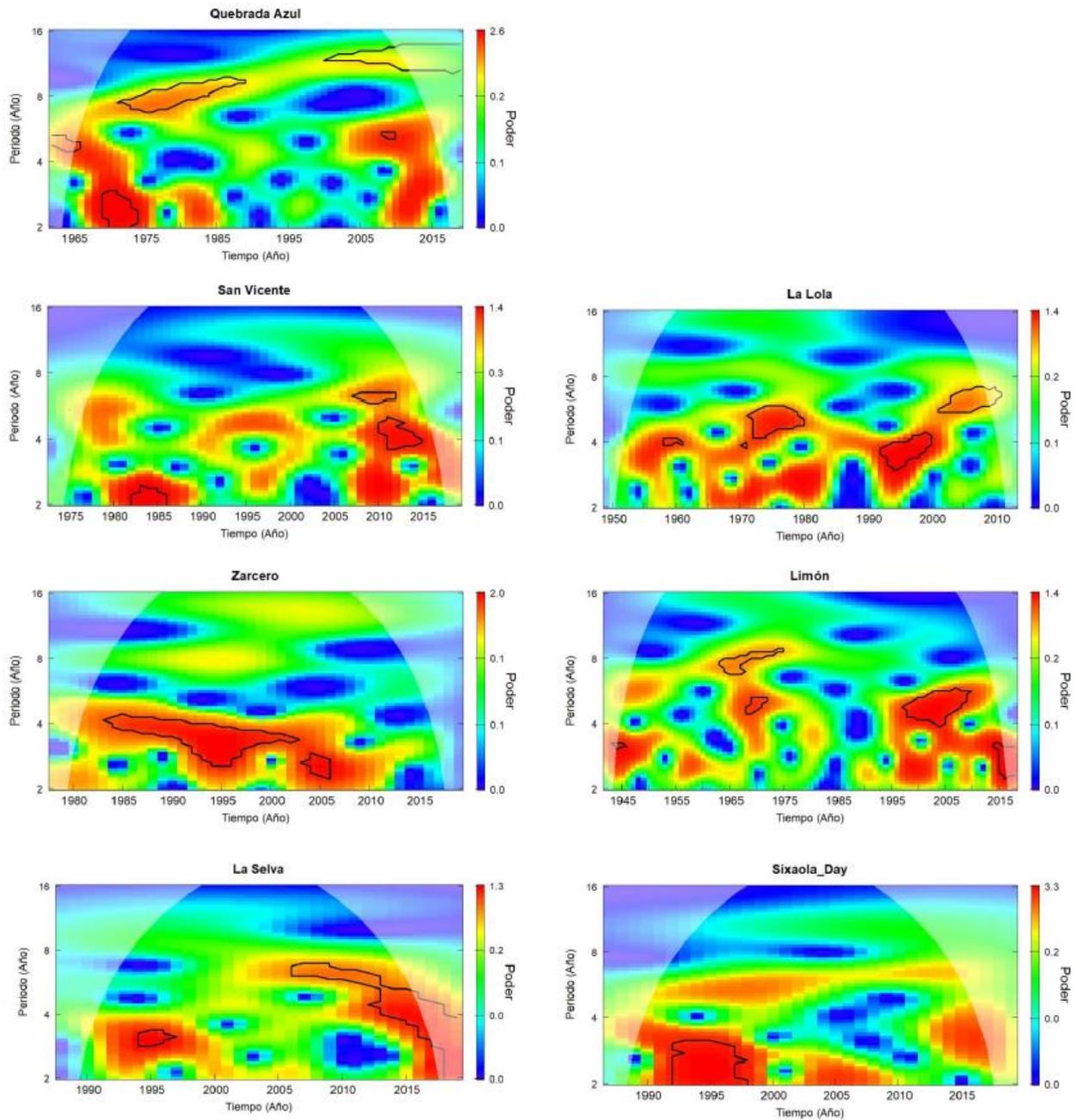
Las variabilidades en torno a los 2-4 años se observa en Quebrada Azul, Zarcero, La Selva, La Lola y Sixaola Day alrededor del 2005.



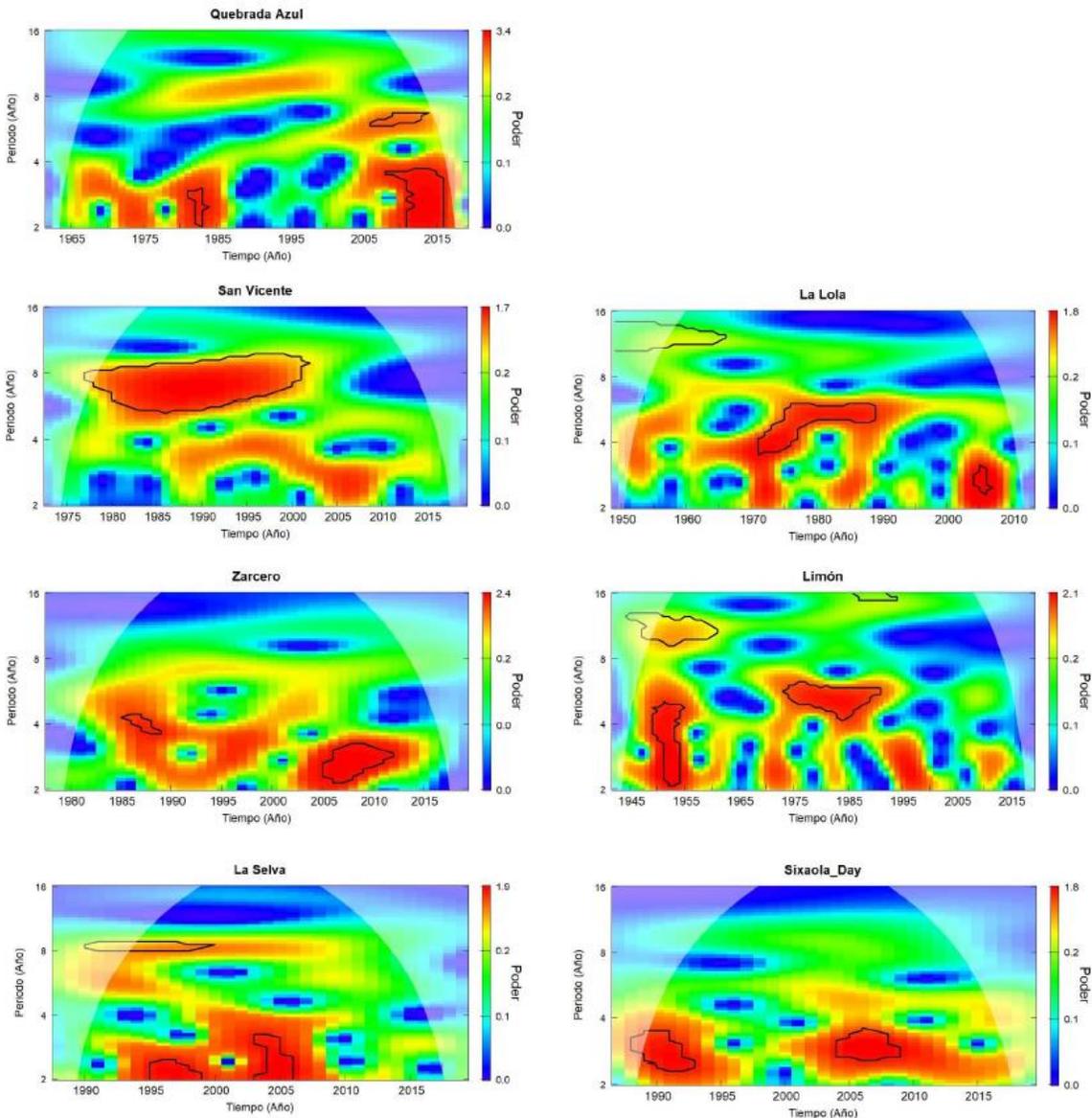
**Figura 3.21.** Transformada de Wavelet de la precipitación en DEF en las estaciones seleccionadas. El contorno grueso, en negro, encierra regiones con una confianza superior al 95%. Las regiones sombreadas con transparencia, en ambos extremos indican el cono de influencia. El eje x no es igual en cada caso ya que depende del periodo de datos de las estaciones.



**Figura 3.22.** Transformada de Wavelet de la precipitación en MA en las estaciones seleccionadas. El contorno grueso, en negro, encierra regiones con una confianza superior al 95%. Las regiones sombreadas con transparencia, en ambos extremos indican el cono de influencia. El eje x no es igual en cada caso ya que depende del periodo de datos de las estaciones.



**Figura 3.23.** Transformada de Wavelet de la precipitación en JJA en las estaciones seleccionadas. El contorno grueso, en negro, encierra regiones con una confianza superior al 95%. Las regiones sombreadas con transparencia, en ambos extremos indican el cono de influencia. El eje x no es igual en cada caso ya que depende del periodo de datos de las estaciones.



**Figura 3.24.** Transformada de Wavelet de la precipitación en SO en las estaciones seleccionadas. El contorno grueso, en negro, encierra regiones con una confianza superior al 95%. Las regiones sombreadas con transparencia, en ambos extremos indican el cono de influencia. El eje x no es igual en cada caso ya que depende del periodo de datos de las estaciones.

En síntesis, estacionalmente existe un comportamiento muy parecido en cuanto a las variabilidades, donde sobresale la interanual, siendo más importante la que se presenta alrededor de los 2-4 años en todas las estaciones con algunas particularidades alrededor de los 6-8 años en MA y SO. Solo algunas pocas estaciones muestran indicios de variabilidad interdecadal, principalmente en DEF, MA y SO, donde la estación Quebrada Azul sobresale como la que posee mayor cantidad de casos con este comportamiento.

### 3.4. Discusión y conclusiones

A diferencia de la VP, la información meteorológica en la VC de Costa Rica es escasa y existen pocos estudios disponibles. Este estudio pretende aportar información climática actualizada de la variabilidad de la precipitación en la RTHC de Costa Rica, llenando el vacío de estudios en la región del Caribe de Costa Rica y Centroamérica en general.

El objetivo de este capítulo es contribuir a una mejor comprensión de la variabilidad temporal y el comportamiento espacial de la precipitación en la VC, utilizando series de alta calidad de 28 estaciones en 2 periodos 1985-2009 y 1997-2019.

Los principales resultados revelan que los regímenes de precipitación son variables tanto en el tiempo como en el espacio a lo largo del año en la RTHC ([Alfaro 2002](#); [Maldonado et al. 2021](#)), donde el total medio anual ronda los 4000mm. La distribución espacial del ciclo anual de lluvias se repite en enero y febrero, con máximos (entre 500 y 600mm) en la cordillera al suroeste y valores mínimos al noroeste en la frontera con Nicaragua (menos de 100mm). Estos resultados concuerdan con estudios previos analizados en otros períodos ([Fernández et al. 1996](#); [Alfaro, 2002](#); [Pérez-Briceño et al. 2017](#)).

Los valores mínimos de precipitación mensual se producen en el oeste (principalmente en la subregión NO) durante los 4 primeros meses del año (enero-abril), siendo marzo el mes con menor precipitación de toda la región (con valores inferiores a 100mm y no superiores a 400mm). En los 2 últimos meses del año (noviembre-diciembre) se observan valores máximos de precipitación entre 500mm y 750mm por mes y valores mínimos entre 200mm y 400mm en el este, sobre las llanuras costeras (particularmente la subregión CN). En julio y diciembre se desarrolla una franja suroeste-noreste con abundantes precipitaciones mensuales (entre 500 y 700 mm) que conecta la cordillera con el norte de la costa caribeña. Estos resultados concuerdan con los de [Alfaro \(2002\)](#) para el periodo 1950-1994, [Amador et al. \(2013\)](#) para 1960-2011 y [Maldonado et al. \(2021\)](#) para 1976-2015. En síntesis, regionalmente los meses con mayores precipitaciones son junio, julio agosto, noviembre y diciembre. La característica principal es: máximos en la zona central y hacia la cordillera y mínimos hacia el noroeste.

Estacionalmente, aunque la cantidad de precipitación en JJA es mayor que en DEF, el patrón espacial en ambos trimestres es similar; mientras que en SO el patrón cambia, mostrando un gradiente cordillera-costa. Al evaluar cuánto representa el total estacional sobre el total anual, el patrón de precipitación en JJA es superior al 30% y en regiones del noroeste cercano al 50%. En concordancia con [Sáenz y Amador \(2016\)](#) en su estudio de 20 estaciones en el periodo 2006-2011, y [Villalobos y Rojas \(2016\)](#) en el periodo 1941-2016 que analizaron solo la estación Limón, encontraron resultados similares -JJA explica la mayor concentración de la precipitación anual -38 %- seguido de DEF -32,5 %-.

Algunas de las estaciones ubicadas al extremo suroeste sobre la cordillera, al límite con la VP como Zarcero y Piedades Sur, presentan un comportamiento opuesto al resto del dominio, ya que concentran el 40% de la precipitación anual en SO, y menos del 10% en DEF. Dicho comportamiento podría explicarse por su cercanía a la VP, ya que su ciclo anual es similar al régimen climático del Pacífico ([Maldonado et al. 2021](#)).

Estos resultados resaltan el contraste entre los regímenes de precipitación en la VP y la VC de Costa Rica, cuyos ciclos anuales tienen comportamientos opuestos. Por un lado, julio y agosto se destacan por bajos montos de precipitación en el Pacífico ([Magaña et al. 1999](#); [Hidalgo et al. 2015](#); [Maldonado et al. 2021](#)), mientras que en el Caribe se dan máximos en los mismos meses. Además, el régimen de lluvias del Pacífico presenta el pico más intenso durante el SO ([Maldonado et al. 2021](#)), mientras que en el Caribe se observa una disminución durante dichos 2 meses.

En cuanto al comportamiento espacial de los valores extremos (percentiles 25 y 75). En general, JJA presenta los mayores valores; SO, los menores; y se observa un comportamiento desigual en DEF (máximos en el este y sobre la costa en las subregiones CN y CS; y mínimos en el norte de la subregión NO). En SO, las menores cantidades (por debajo de 400mm) se concentran en la costa Caribe (zonas de cultivo de banano), y las mayores en las montañas (1600mm). Durante DEF, los valores máximos (entre 1600 y 2000mm) se extienden en dirección sureste-noreste (montañas-litoral norte), lo que podría afectar a los cultivos de banano y piña de la subregión CN (ver ubicación de cultivos en [Figura 3.1](#)).

Los primeros 4 meses del año (enero-abril) son los más críticos para la piña, cuando la precipitación en el percentil 25 oscila entre 20-100mm mensuales. Las subregiones NE y NO son las más afectadas ([Figura 3.7](#)). Para el banano, la mayor amenaza de déficit hídrico ocurre en febrero-marzo y SO, donde el percentil 25 muestra cantidades de lluvia inferiores a 200mm sobre el litoral norte. Los extremos húmedos y su impacto agrícola son mayores en JJA para ambos cultivos, y en DEF para las plantaciones de banano.

El análisis de tendencias se realizó en 2 periodos comunes: 1985-2009 y 1997-2019. En el primero las tendencias anuales son positivas en la RTHC, y estadísticamente significativas en la cordillera. Sin embargo, el comportamiento mensual es bastante desigual. Se observa un patrón decreciente de agosto a octubre, con tendencias significativas en septiembre.

Las tendencias estacionales, en ambos periodos, presentan un comportamiento desigual. Para el periodo 1985-2009 el resultado más sobresaliente es la tendencia positiva y significativa en DEF en toda la RTHC y las tendencias de SO son negativas y significativas en las estaciones ubicadas en las planicies costeras de las subregiones CN y CS. Un hecho interesante es que las tendencias positivas y negativas (anuales, mensuales y estacionales) no fueron significativas en los últimos 23 años (1997-2019). Otros autores han analizado tendencias mensuales o anuales en la región estudiada. Sin embargo, estos resultados pueden diferir porque utilizaron periodos diferentes. Por ejemplo, [Maldonado et al. \(2021\)](#), indica que la VC presenta un aumento de las precipitaciones en julio y una disminución significativa en septiembre (periodo 1976-2015). [Alfaro-Córdoba et al. \(2020\)](#), para el periodo 1970-1999, centran el análisis en las tendencias de aridez en la VP. [Hidalgo et al. \(2017\)](#), en su estudio para el periodo 1970-1999 sugiere tendencias positivas en la costa CS de Costa Rica, lo cual es consistente con el presente estudio en términos anuales. [Hannah et al. \(2017\)](#) muestra resultados interesantes enfocados en el sector agrícola para el periodo 1960-2017, indicando que las tendencias de la precipitación en la región son muy variables espacialmente, lo cual es consistente con esta investigación, no obstante, sin perder de vista, que esto depende también del conjunto de datos que se utilice.

Las tendencias en la contribución porcentual de la lluvia estacional al ciclo anual, muestran montos decrecientes en JJA y SO, que son significativos en las llanuras de las subregiones NE

y CN durante JJA y sobre toda la RTHC durante SO. En consecuencia, hay 5 meses consecutivos (junio a octubre) en los que la contribución de las lluvias al ciclo anual es decreciente, siendo el período más evidente el SO. Por el contrario, la contribución de la DEF al ciclo anual estaría aumentando, particularmente en la región NE y en algunas de CN y CS.

Estos resultados implican una alerta para los fruticultores, principalmente en SO, ya que las precipitaciones durante estos 2 meses se sitúan entre 200 y 300mm en toda la costa caribeña. Además, la tendencia para SO es negativa y significativa sobre las planicies de las subregiones CN y CS, y en adición, la tendencia de la contribución porcentual de la precipitación de SO al ciclo anual es también negativa y significativa en toda la RTHC. Estos resultados resaltan la necesidad del monitoreo climático para los cultivos de piña y banano en Costa Rica, el cual inicia anualmente en septiembre y continúa hasta mayo del año siguiente. Los meses más críticos son SO por posible déficit hídrico y DEF por exceso hídrico, ya que en este último periodo se registra en promedio el 32.5% de la precipitación anual (Sáenz y Amador, 2016; Villalobos y Rojas, 2016). Dado que DEF se encuentra entre 2 periodos de baja pluviosidad -SO y MA (del año siguiente)- tiene una gran importancia en la distribución de las precipitaciones. Una menor precipitación en este trimestre podría tener impactos negativos en los cultivos dado que le sigue un periodo de baja pluviosidad.

El análisis de la media móvil y de la transformada de Wavelet evidencia que las localidades seleccionadas, presentan un comportamiento dispar según la subregión climática. Por un lado las estaciones de la subregión NE presentan comportamientos heterogéneos entre sí, pero las estaciones de las llanuras del Caribe, ubicadas en las subregiones del CN y del CS, presentan un comportamiento más homogéneo. Las variabilidades interanuales son más importantes y visibles que las interdecadales (la mayoría de las localidades presentan variabilidades por debajo de los 7 años). El análisis anterior pone de manifiesto la complejidad de la variabilidad interanual, estacional e interdecadal de las precipitaciones en la región de estudio, razón por la cual, los efectos de distintos forzantes y su interacción con la topografía de la región, representan solo un par de variables de otras más complejas y variadas que interfieren con los patrones espaciales y temporales de la lluvia en la VC (Alvarado y Fernández, 2001; Maldonado et al. 2013; Zhao et al. 2023).

## Capítulo 4

# Mecanismos físicos y variabilidad de la precipitación mensual

### Resumen

La ocurrencia de las precipitaciones en Centroamérica y en la RTHC muestran la complejidad de la variabilidad interanual, interestacional e interdecadal en la región. En este capítulo se estudian algunos forzantes que interfieren con los patrones espaciales y temporales de la lluvia: El Niño Oscilación del Sur (ENSO), la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) y el Dipolo del Océano Índico (IOD). La selección de estos se basa en las interacciones océano-atmósfera de las 3 cuencas oceánicas más importantes: Pacífico (ENSO), Atlántico (NAO) e Índico (IOD). El análisis del IOD se realizó de manera exploratoria, ya que no se encontraron estudios específicos previos para la región. Los resultados indican que el ENSO muestra una relación más clara con la precipitación en la RTHC, pero posee gran variabilidad mensual y estacional. Durante la fase El Niño (La Niña), las lluvias son mayores (menores) en la región, pero algunos meses muestran el efecto inverso. Estos resultados ponen en evidencia la relevancia de identificar los meses donde se da lo expresado anteriormente. La señal de la NAO fue más importante en los meses del invierno boreal (DEF) cuando ejerce mayor control sobre los vientos alisios. El IOD presentó un comportamiento considerable en julio, que podría estar relacionado a su desarrollo de aparición temprana o a su fase negativa, ambos con máximas correlaciones durante los meses del verano (JJA). Se sugieren análisis más detallados a futuro para comprender las relaciones entre los 3 forzantes.

## 4.1. Introducción

La región Centroamericana está estratégicamente situada entre 2 masas de agua -el océano Pacífico tropical, al Oeste, y el mar Caribe, al Este-, que tienen gran influencia en las variables climáticas. Esta región recibe alta radiación solar y sus aguas actúan como un reservorio de energía, transfiriéndola posteriormente a la atmósfera (Maldonado et al. 2018). Más aún, esta interacción océano-atmósfera en los trópicos, es responsable de gran parte de la variabilidad climática. El océano Pacífico, en su parte ecuatorial, cubre casi la mitad de la circunferencia terrestre, por lo que cualquier perturbación de su intercambio con la atmósfera tiene repercusiones sobre el clima. Adicionalmente, los patrones de circulación de gran escala y escala regional, junto con la compleja topografía del istmo centroamericano generan una interacción importante que modula su clima.

La distribución regional de las precipitaciones en Centroamérica está definida por los vientos alisios del noreste, el transporte de humedad, la migración de la ITCZ, el paso de las ondas del este, los ciclones tropicales, el desarrollo de sistemas convectivos de mesoescala y las interacciones de masas de aire frío de las latitudes medias (Taylor y Alfaro, 2005; Hidalgo et al. 2015; Maldonado et al. 2016; 2018; Durán-Quesada et al. 2020).

En particular, enfocándose en Costa Rica, su clima tropical -cálido y húmedo- es modificado por diferentes factores locales como el relieve (disposición de las montañas y llanuras) y su ubicación respecto al continente (condición ístmica). La distribución de las precipitaciones en la vertiente del Pacífico (VP) presenta 2 máximos: uno en mayo-junio y el otro en septiembre-octubre; separados por el veranillo en julio-agosto y una marcada estación seca entre diciembre-marzo (Durán-Quesada et al. 2020; Alfaro e Hidalgo, 2021). Mientras que, como se describió en el [Capítulo 3](#), el régimen de precipitación de la vertiente del Caribe (VC) no presenta una estación seca definida, aunque posee 2 periodos con disminución de las lluvias (entre 100 y 200mm), el primero entre marzo-abril y el segundo entre septiembre-octubre (Alfaro et al. 2024). Los máximos se registran entre diciembre-febrero y junio-agosto. Las principales diferencias entre los tipos del ciclo anual de la precipitación en las 2 vertientes se explican por la compleja topografía del istmo asociada a las condiciones de

circulación locales, por la posición a sotavento o barlovento de las estaciones según los vientos alisios, y por la elevación de la estación en su respectiva vertiente (Fernández et al. 1996; Muñoz et al. 2002; Taylor y Alfaro, 2005; Sáenz y Amador, 2016; Sáenz et al. 2022).

Esta combinación de procesos y características regionales y a gran escala, definen las fuertes precipitaciones de la región. Retana (2012), indica que los 3 fenómenos océano-atmosféricos que causan mayor impacto en las lluvias en Costa Rica son los sistemas de bajas presiones (ITCZ, ondas tropicales, sistemas convectivos de mesoescala), el impacto indirecto de los huracanes del Caribe y el avance de masas de aire frío que penetran profundamente en los trópicos y producen fuertes vientos durante el invierno boreal (DEF) (Alfaro y Pérez-Briceño, 2014). Adicionalmente, las corrientes en chorro de capas bajas – del Caribe y del Chocó- tienen un rol importante en la modulación de los patrones de precipitación (Poveda y Mesa, 2000; Amador, 2008; Cook y Vizy, 2010), así como su conectividad con la ITCZ (Hidalgo et al. 2015).

Dentro de las características climáticas de la circulación de gran escala se puede mencionar la Oscilación del Atlántico norte (NAO, por sus siglas en inglés), modo de variabilidad más importante de la circulación atmosférica del hemisferio norte (Barnston y Livezey, 1987). Según Taylor y Alfaro, (2005); Amador et al. (2006) y (2016), esta oscilación condiciona la actividad sinóptica dominante en la región, y se asocia con la intensidad de los vientos alisios, los cuales, en combinación con la ITCZ, desempeñan un rol relevante en el clima regional, ya que modulan el intercambio de masas, la retroalimentación energética, el transporte de humedad, el desarrollo ciclónico y la actividad convectiva (Maldonado et al. 2018; Durán-Quesada et al. 2020).

Las anomalías de la temperatura de la superficie de los océanos tropicales impactan en diferentes aspectos en la circulación a escala planetaria, y en particular en las anomalías de la precipitación. Particularmente, en la región de interés, los gradientes de temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés) entre el Caribe y el Pacífico tropical desempeñan un papel en la distribución de las precipitaciones (Enfield y Alfaro, 1999). En particular El Niño–Oscilación del Sur (ENSO, por siglas en inglés) es el responsable de los principales modos de variabilidad de la circulación atmosférica en escala interanual e

interdecadal, siendo el principal forzante de la variabilidad de las precipitaciones en Centroamérica ([Hidalgo et al. 2015](#); [Trenberth, 2021](#)).

Las variaciones en las lluvias en la región centroamericana, son una respuesta a la modulación del transporte de humedad desde el Caribe y a los cambios en la posición meridional de la ITCZ forzados por el ENSO ([Durán-Quesada et al. 2017](#)). Durante el verano y otoño boreal, los eventos fuertes de El Niño se asocian con condiciones más secas de lo normal en el sur y centro de México y la VP de Centroamérica, mientras que se reportan condiciones más húmedas debido a lluvias por encima de lo normal a lo largo de la costa caribeña ([Maldonado et al. 2013](#); [2016](#)).

Adicionalmente, el ENSO afecta la génesis, las trayectorias, la intensidad y el tiempo de vida de los ciclones tropicales en el Pacífico y el Atlántico ([Tang y Neelin, 2004](#); [Krishnamurthy et al. 2016](#)). Los eventos El Niño no favorecen la formación de ciclones tropicales ([Camargo et al. 2007](#); [Maldonado et al. 2018](#)). Por el contrario, durante La Niña, los ciclones tropicales se intensifican cuando alcanzan la costa caribeña de Centroamérica ([Durán-Quesada et al. 2020](#)). En Costa Rica, los impactos generados por el ENSO van desde déficits de precipitaciones, con potenciales sequías en la VP, durante la fase cálida; hasta excedentes de precipitación, con alto riesgo de inundaciones en la VC, y viceversa para la fase fría ([Waylen et al. 1996](#); [Retana y Villalobos, 2000](#); [Sánchez-Murillo et al. 2017](#); [Maldonado et al. 2018](#)).

Con respecto al océano Atlántico, el gradiente meridional entre las SST del Atlántico norte y sur -modo meridional Atlántico (AMM-[Chiang y Vimont, 2004](#)), influye en la actividad de los ciclones tropicales ([Vimont y Kossin, 2007](#); [Durán-Quesada et al. 2020](#)). Las fases fuertes del ENSO y del AMM pueden amplificar o amortiguar la influencia mutua sobre los ciclones ([Wallace y Gutzler, 1981](#); [Patricola et al. 2014](#); [Lim et al. 2016](#)).

Otro modo de variabilidad es el Dipolo del Océano Indico (IOD, por sus siglas en inglés). Este forzante y su variabilidad interanual en la región Indo-Pacífica inducen alteraciones en las lluvias de la RTHC. [Saji y Yamagata \(2003\)](#), indicaron que la lluvia disminuye de forma anómala en las regiones tropicales durante eventos IOD positivos. Para Centroamérica, los

mismos autores encontraron que las correlaciones con las anomalías de lluvia son negativas y significativas en el trimestre de octubre a diciembre.

Existen otras variabilidades que juegan un rol importante en el clima de la VC, como la oscilación Madden-Julian (escala intraestacional). Esta oscilación modula la temporada de huracanes en el Atlántico norte y la actividad lluviosa convectiva en los trópicos (Klotzbach, 2010; Poleo et al. 2014). A escala decadal y multidecadal, el rol de la oscilación decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés) y la oscilación multidecadal del Atlántico (AMO, por sus siglas en inglés) (Delworth y Mann, 2000; Ribera et al. 2020) interfieren en las variaciones de las precipitaciones en la VC.

Esta síntesis de la circulación y la variabilidad del sistema climático, pone en evidencia la importancia del tiempo y el clima. Además, trata de explicar las principales características climáticas de Centroamérica y de la RTHC de Costa Rica a través de la comprensión de la variabilidad y del contexto regional en el que se ubica la región (para mayor detalle, el Anexo 1 muestra diagramas de los principales patrones de circulación en la región).

El presente capítulo tiene como objetivo: analizar los mecanismos físicos responsables de la variabilidad espacio-temporal de la precipitación mensual en la RTHC de Costa Rica, a partir de 3 forzantes climáticos: el ENSO, la NAO y el IOD. La selección se basó en las interacciones océano-atmósfera de las 3 cuencas oceánicas más importantes: Pacífico (ENSO), Atlántico (NAO) e Índico (IOD), asegurando un forzante desarrollado en cada océano y las teleconexiones atmosféricas de estos, que tienen un amplio impacto en el clima y en los fenómenos meteorológicos locales (Yeh et al. 2018).

## 4.2. Metodología

Para llevar a cabo este objetivo, se utilizaron datos pluviométricos mensuales procedentes de las 28 estaciones meteorológicas seleccionadas en el [Capítulo 2](#) ([Tabla 2.1](#) y [Figura 2.6](#)). Partiendo de esta base de datos, se realizaron análisis específicos para cada uno de los 3 mecanismos físicos seleccionados (ENSO, NAO, IOD), utilizando índices climáticos: índice oceánico de El Niño-ONI, índice de la oscilación del Atlántico norte-NAOI, índice del modo dipolar del Índico-DMI, a escala mensual (explicados previamente en el [Capítulo 2](#)).

Con el fin de evaluar la relación entre los forzantes climáticos y las precipitaciones mensuales, se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson con un nivel de significancia de 95, 97.5 y 99% ([Panofsky et al. 1958](#); [Wilks, 2006](#); [Chen et al. 2023](#)). Se realizó un análisis diagnóstico (por ejemplo: el índice-ONI, NAOI, DMI de marzo con precipitación de marzo) y un desfase de hasta 2 meses hacia atrás (lag-2, por ejemplo: la precipitación de marzo con el índice -ONI, NAOI, DMI de febrero y de enero).

Dado que el ENSO resultó ser uno de los mecanismos físicos que más influye en el clima de la región ([Waylen et al. 1996](#); [Retana y Villalobos, 2000](#); [Sánchez-Murillo et al. 2017](#); [Maldonado et al. 2018](#)) se realizó un análisis más detallado mediante composiciones o “composites” (más detalle de la metodología de composites en [Anexo 2](#)). Una vez que se identificaron los composites mensuales del comportamiento espacial de la lluvia bajo condiciones neutras y bajo efectos de los eventos El Niño o La Niña según el ONI, se construyeron composites de anomalías mensuales de precipitación. Este análisis permitió evaluar, qué tanto difieren las lluvias típicas de un mes determinado en condiciones neutras, respecto a las lluvias de dicho mes bajo condiciones de El Niño o La Niña. Tanto para los composites mensuales como para los de anomalías se utilizaron los periodos 1985-2009 y 1997-2019

La [Figura 4.1](#) hace una síntesis del proceso metodológico aplicado en este capítulo.

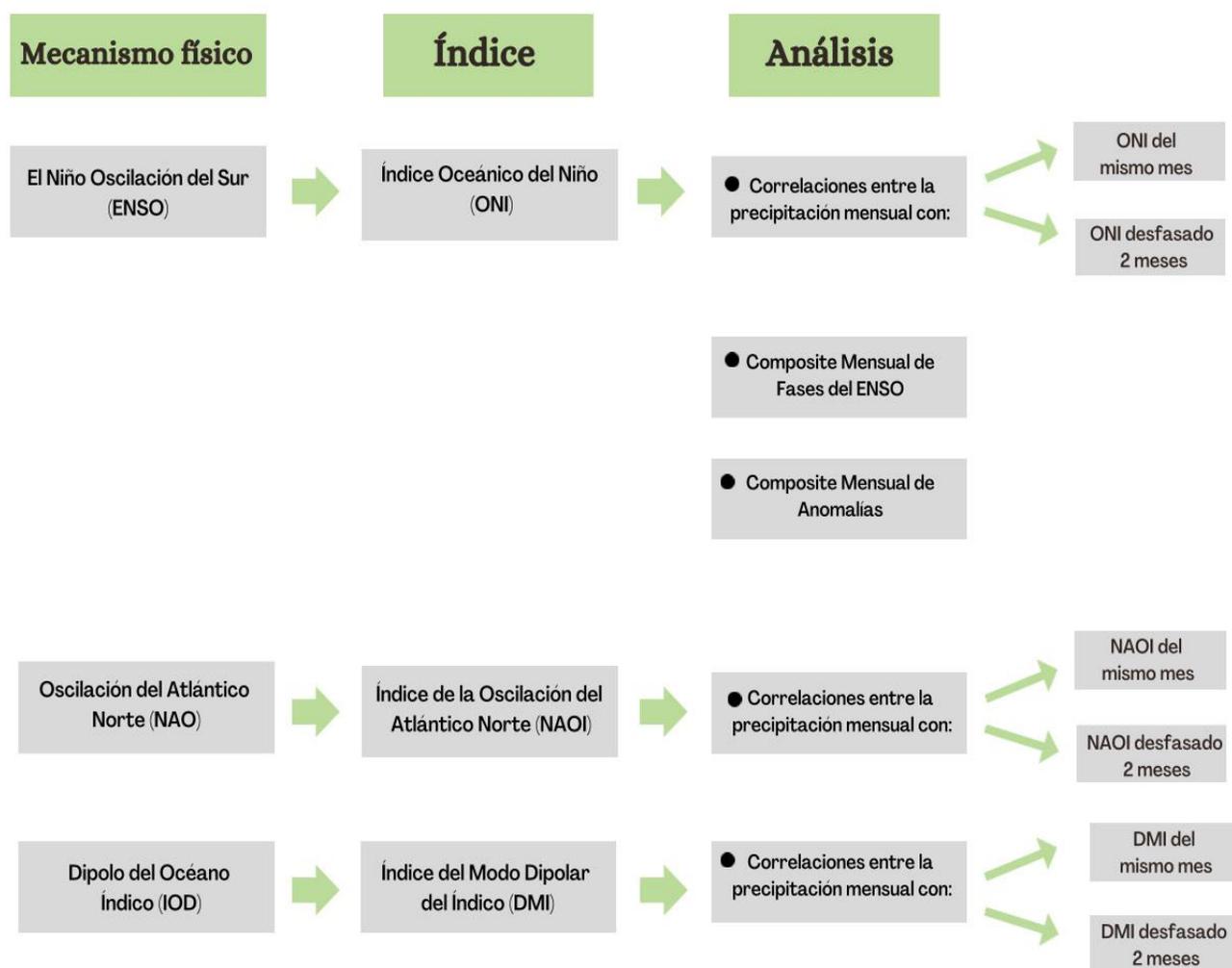


Figura 4.1. Síntesis del proceso metodológico para el análisis de mecanismos físicos.

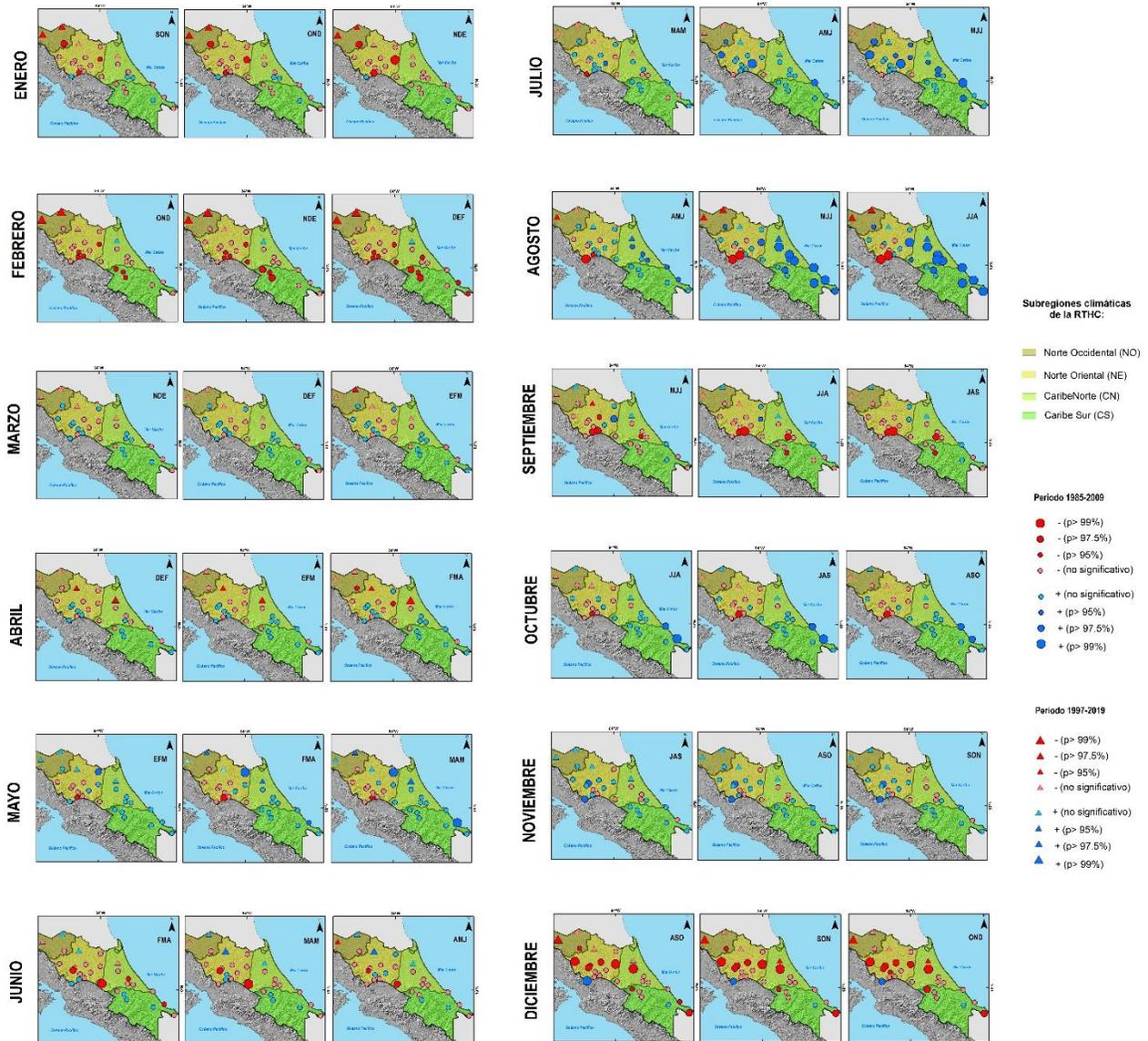
### 4.3. Resultados

Los resultados se dividen en 3 apartados. El primero se enfoca en los análisis de las correlaciones de la precipitación mensual con cada mecanismo físico (se identifican los meses donde existe mayor señal). La segunda muestra meses/periodos coincidentes entre mecanismos, es decir, donde los 3 mecanismos muestran señales importantes en simultáneo. La tercera, se enfoca en el ENSO y en sus fases de manera desagregada, con el fin de analizar el comportamiento de las lluvias mensuales según las fases del ENSO por medio de composites.

### 4.3.1. Correlaciones entre índices y precipitaciones mensuales

#### ENSO

La señal del ENSO en la RTHC muestra comportamientos dispares por mes (Figura 4.2).



**Figura 4.2.** Correlaciones mensuales entre las series de precipitación y el ONI, para análisis diagnóstico (mismo mes) y desfase de hasta 2 meses. Las filas corresponden a las precipitaciones por mes y las columnas corresponden (de derecha a izquierda) al índice ONI del mismo mes y al índice ONI desfasado 2 meses previos. Círculos (periodo 1985-2009), triángulos (periodo 1997-2019). El color azul (rojo) representa las correlaciones positivas (negativas). Se muestran las 4 subregiones climáticas de la RTHC en sentido noroeste-sureste.

Con base en la [Figura 4.2](#), al analizar las correlaciones del ONI de un mes con la precipitación del mismo mes, se observan señales interesantes en algunos meses, ya sea porque mantienen un mismo patrón de signos o porque tienen resultados significativos. En este contexto, sobresalen los resultados encontrados en enero, febrero, mayo, julio, agosto, septiembre, octubre y diciembre. Haciendo foco en estos meses, e iniciando con diciembre (para seguir con el mismo análisis detallado en el [Capítulo 3](#)), se muestran las correlaciones encontradas entre el ONI-OND con la precipitación de diciembre. Es interesante observar el patrón de correlaciones negativas para toda la región, siendo significativas principalmente las del primer periodo (1985-2009) ubicadas en las subregiones Norte Oriental (NE), 1 en el Caribe Norte (CN-La Mola) y 2 en el Caribe Sur (CS-Guayabo y Sixaola Day). En este mes resalta una estación con signo positivo y significativa (Piedades Sur) ubicada sobre la cordillera al límite con la VP. Siguiendo con la precipitación de enero, el resultado de su correlación con el ONI-NDE, muestra que se mantiene el campo de correlaciones negativas en toda la región, pero en menor intensidad comparado con diciembre, siendo significativas las ubicadas en la subregión del Noroeste (NO) y 2 ubicadas en la subregión del Noreste (NE-La Selva y Zarcero). Para el análisis de las correlaciones de precipitación de febrero con el ONI-DEF, se resalta el mismo patrón de correlaciones negativas en toda la región, pero con un aumento en la cantidad de estaciones significativas, principalmente en la NE y en la subregión del Caribe Sur (CS).

En marzo y abril no se visualiza un patrón espacial importante, ni significancia. En el caso de las precipitaciones de mayo con el ONI-MAM, se observa una regionalización entre las estaciones ubicadas en la subregión NE más cercanas a la cordillera (correlaciones negativas) y las demás (correlaciones positivas). En este último, son significativas 2 del periodo 1997-2019 (Comando Los Chiles y Cantagallo) y 2 del periodo 1985-2009 (El Bum y Puerto Vargas). En julio y agosto (ONI-MJJ y JJA, respectivamente), sobresale un patrón de correlaciones positivas en casi toda la región, siendo más homogéneo en julio. Para este mes, las estaciones significativas son las del primer periodo y las ubicadas en las subregiones NE, CN y CS principalmente. En agosto, aumenta la significancia de las correlaciones, concentrada en las subregiones del CN y CS, siguiendo un patrón en sentido noroeste-sureste y siendo mayor la significancia cuanto más cercano a la costa del Caribe. En este mes se

observa una regionalización, ya que resaltan estaciones con signo negativo y significativas en el otro extremo de la RTHC: 2 del periodo 1997-2019 (1985-2009) en NO (NE).

En el campo de correlaciones entre los totales de septiembre-ONI-JAS y totales de octubre-ONI-ASO, lo que más sobresale es el cambio abrupto de la señal entre un mes y el otro, pasando de una señal negativa en septiembre a una positiva en octubre. Adicionalmente, en octubre empieza a visualizarse un comportamiento regional inverso entre las regiones del Caribe (CN y CS) y las del Norte (NE y NO). En noviembre, las correlaciones entre el ONI-SON y la precipitación de este mes, son en su mayoría positivas, y algunas ubicadas sobre el CN negativas (Figura 4.2).

Con el fin de observar cómo es la señal del ENSO en meses previos, se realizó el mismo análisis anterior, pero se desfasó el ONI con hasta 2 meses de antelación, entonces, en continuidad con el análisis anterior (Figura 4.2). En diciembre, se observa un comportamiento similar al observado en las correlaciones con el mismo mes. Las correlaciones negativas son generalizadas para la región desde el lag-2. Para la precipitación de enero con su desfase de hasta 2 meses, el comportamiento es similar al visto anteriormente, aunque tanto para su relación con el ONI-OND, como con el ONI-SON, aparecen unas pocas estaciones (4) con signo positivo para el periodo 1985-2009. Para febrero se mantiene el campo de correlaciones negativas para toda la región, concentrando la significancia en las 2 estaciones del segundo periodo de la subregión NO (Upala y Comando Los Chiles) y en las que se encuentran sobre la cordillera para el primer periodo en las subregiones NE y CS. En marzo y abril, no hay resultados significativos.

En mayo, ambos desfases (ONI-FMA y EFM) muestran la regionalización encontrada con el ONI-MAM, donde las correlaciones negativas se ubican en las estaciones cercanas a la cordillera del NE, aunque este patrón se reduce con el mes de antelación. A su vez, la significancia de las estaciones con signo positivo también disminuye en los meses previos. En junio, el primer desfase (ONI-MAM) muestra mayor presencia de correlaciones negativas que las vistas en ONI-AMJ, y a su vez aumenta el signo negativo para el lag-2 (ONI-FMA) y aumenta la significancia en 4 estaciones, 2 sobre la cordillera y 2 cercanas a la costa.

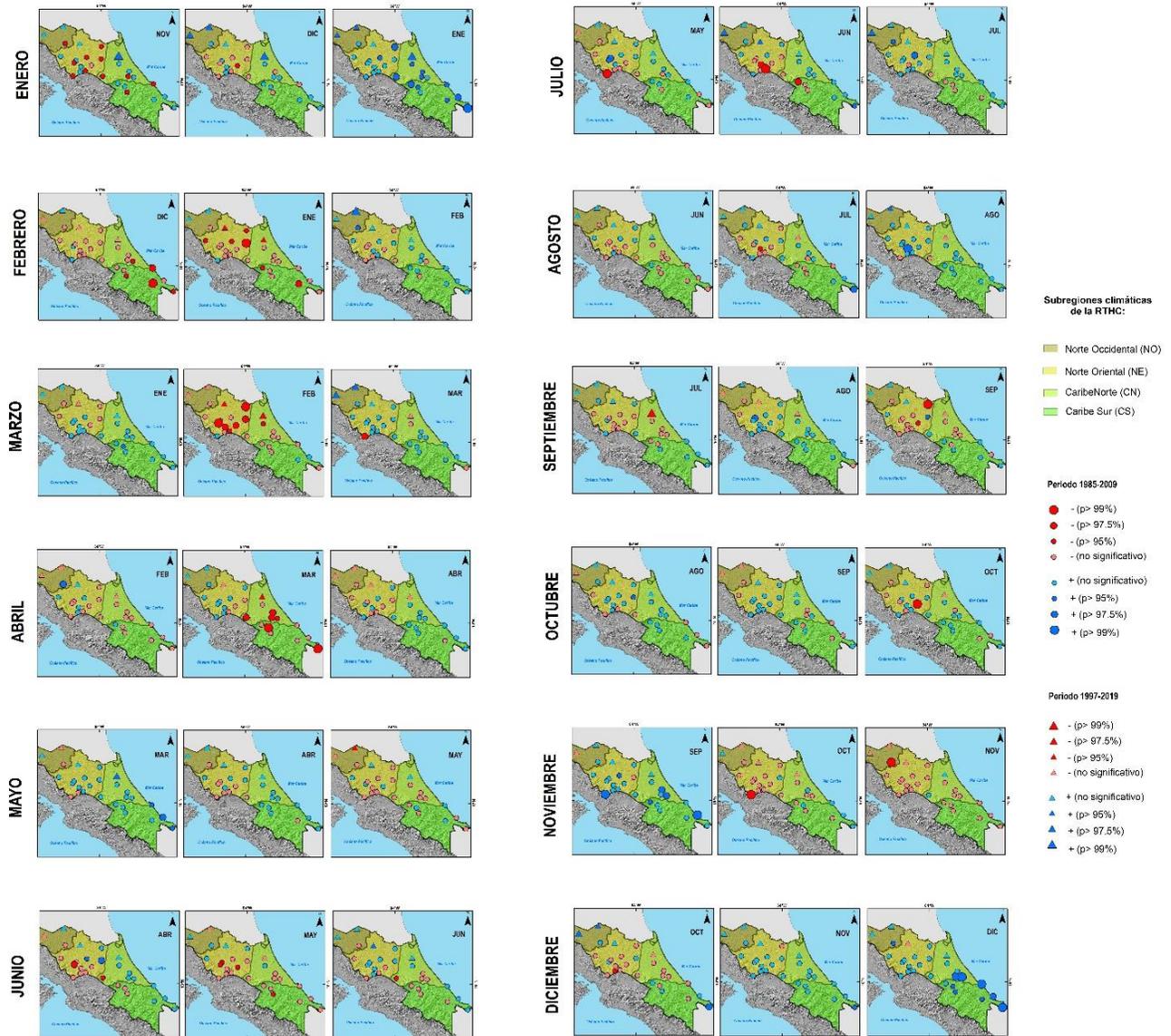
Para julio y agosto, se observa que el patrón visto en ONI-MJJ de correlaciones positivas disminuye para los desfases así como la significancia. Para el ONI-AMJ, el patrón espacial es similar al encontrado en MJJ, pero la cantidad de estaciones significativas disminuye considerablemente. Por su parte en septiembre, los desfases guardan similitud con el ONI-JAS, resaltando que la estación La Selva en la subregión NE, es significativa para el ONI-JJA y aumenta para el ONI-MJJ. Asimismo, la significancia en las correlaciones negativas disminuye en los meses previos. En octubre se visualiza el mismo patrón regional presentado con el ONI-ASO y en noviembre no hay cambios evidentes ([Figura 4.2](#)).

## NAO

La señal de la NAO en la RTHC supone comportamientos heterogéneos según la época del año, ya que de un mes a otro cambia la señal, lo cual es llamativo según los resultados de la [Figura 4.3](#). Las correlaciones entre el NAOI de un mes con la precipitación del mismo mes, muestran señales interesantes en algunos meses. En este contexto, sobresalen los resultados encontrados en enero, marzo, abril, mayo, julio, agosto, noviembre y diciembre.

Haciendo énfasis en estos meses, e iniciando con diciembre, es posible observar correlaciones positivas, siendo significativas las ubicadas cercanas a la costa del Caribe en las subregiones CN y CS. Enero sigue el mismo patrón anterior, y aumentan la cantidad de estaciones significativas en todas las subregiones. En febrero no se encuentra un patrón característico ni resultados significativos. Estos resultados ponen de relevancia lo mencionado por [Osborn \(2011\)](#) al indicar que durante el invierno boreal (DEF) es cuando la NAO se encuentra más activa, y ejerce un fuerte control sobre el clima del hemisferio norte.

El campo de correlación entre el NAOI de marzo con la precipitación del mismo mes, revela resultados positivos para casi toda la región, a excepción de 4 estaciones, siendo más relevante la estación Piedades Sur, sobre la cordillera, la cual es negativa y significativa. Abril se destaca por una regionalización, con prevalencia de correlaciones negativas (positivas) en las subregiones NE y NO (CN y CS). Mayo y junio no presentan correlaciones significativas.



**Figura 4.3.** Correlaciones mensuales entre las series de precipitación y el NAOI. Las filas corresponden a las precipitaciones por mes y las columnas corresponden (de derecha a izquierda) al NAOI del mismo mes y al NAOI desfasado 2 meses previos. Círculos (periodo 1985-2009), triángulos (periodo 1997-2019). El color azul (rojo) representa las correlaciones positivas (negativas).

En julio, llama la atención una regionalización entre las estaciones sobre la cordillera (correlaciones negativas) y las ubicadas hacia el norte de la región y la costa (correlaciones positivas). Siendo significativas 1 estación en la subregión NE (Pital) y 2 en la NO (San Jorge y Upala-periodo 1997-2019). El NAOI de agosto con la lluvia del mismo mes muestra un campo de correlación positivo en toda la RTHC, a excepción de 2 estaciones ubicadas sobre

la cordillera (Piedades Sur y La Montura). Se observa que tanto julio como agosto, presentan correlaciones positivas aunque no significativas. Esta situación cambia en septiembre, prevalecen las correlaciones negativas, luego en octubre casi todas las estaciones cambian de signo (positivo) y en noviembre vuelve el patrón correlacional negativo en toda la región.

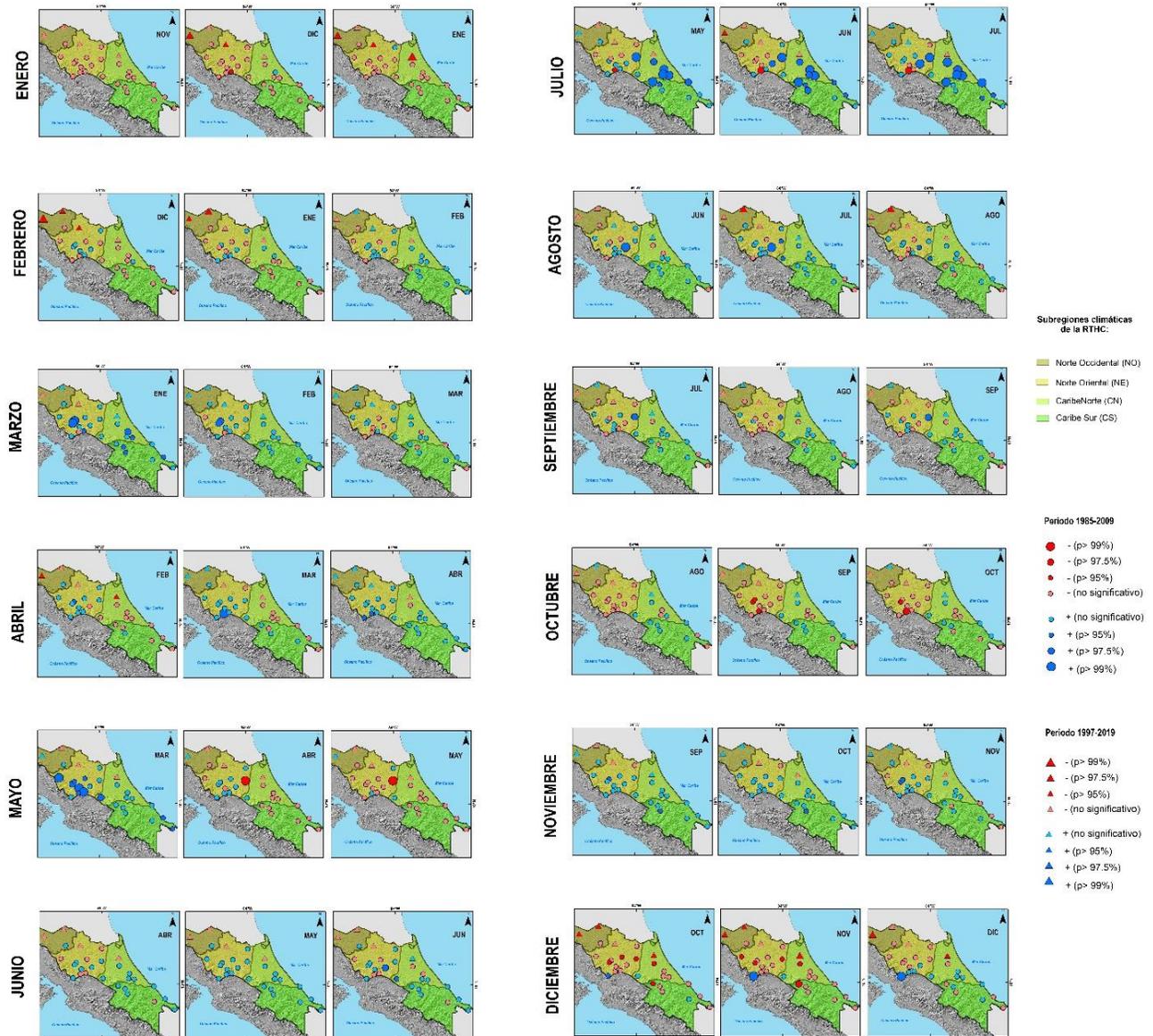
Siguiendo el mismo análisis aplicado para el ENSO, se desfasó el NAOI con hasta 2 meses de antelación ([Figura 4.3](#)). En términos generales, el campo de correlación en los meses previos se conserva sin ser significativos. Los meses con señal significativa en algunas estaciones se observan en las precipitaciones de febrero con NAOI-enero y con NAOI-diciembre; también en las precipitaciones de Marzo con el NAOI-febrero (subregión NE, ya que 7 estaciones presentan significancia con signo negativo); y en la precipitación de abril con el NAOI-marzo, ya que presenta correlaciones negativas y significativas, en las subregiones CN y CS.

En julio sobresale una regionalización, sin ser significativas, en el gradiente montaña-costa (correlaciones negativas a positivas), en ambos desfases, aunque es más evidente en el primero (NAOI-junio con lluvia de julio). Las correlaciones de las precipitaciones de noviembre dependen del mes previo: correlaciones entre NAOI-octubre con lluvias de noviembre y el segundo (NAOI-septiembre), donde los signos de las correlaciones son completamente contrarios, inclusive algunas estaciones ubicadas cercanas a la costa en el CN y CS muestran correlaciones positivas y significativas en el lag-2. El primer desfase guarda similitud con lo encontrado en el NAOI-noviembre, ya que ambos casos prevalece el campo de correlaciones negativas ([Figura 4.3](#)).

## IOD

La señal del IOD en la RTHC muestra algunos resultados interesantes, aunque evidentemente la señal encontrada es mucho menor a lo observado con la NAO y aún más con el ENSO. De acuerdo con lo expuesto en la [Figura 4.4](#), el mes que presenta la mayor señal (significativa) es para la precipitación de julio conservándose el signo de la correlación con el DMI del mismo mes y los meses previos (junio y mayo). El patrón de las correlaciones de las precipitaciones de enero, marzo y diciembre con el DMI del mismo mes y los meses previos

se conserva, aunque no son significativas las correlaciones. Es interesante observar los resultados del mes de mayo, en donde las correlaciones con el IOD del mismo mes y el mes anterior son negativas y no significativas, el campo de correlación cambia de signo para el DMI de marzo, con significancia en las estaciones ubicadas cercanas a la cordillera en el NE y CN (Figura 4.4).



**Figura 4.4.** Correlaciones mensuales entre las series de precipitación y el DMI. Las filas corresponden a las precipitaciones por mes y las columnas corresponden (de derecha a izquierda) al índice DMI del mismo mes y al índice DMI desfasado 2 meses previos. El color azul (rojo) representa las correlaciones positivas (negativas).

El mes de julio, probablemente sea el que posee la mayor señal con el IOD, dado que las correlaciones de las lluvias de este mes con el DMI-julio son positivas en su mayoría y significativas en las estaciones del CN, CS y un par de la NE. Lo que más llama la atención es la regionalización de estas correlaciones positivas-significativas en las llanuras del NE y CN. Por otro lado, solo 5 estaciones presentaron el signo negativo mayoritariamente en el NE. Por lo tanto, es posible establecer una relación directa de la lluvia de julio con el IOD. Los meses de agosto a octubre no presentan patrones claros en la señal con el IOD. Para el caso de las precipitaciones de noviembre y su correlación con el DMI-noviembre, se encontró un campo de correlaciones positivas en su mayoría para la región, destacando que las 3 estaciones ubicadas en la costa del CS presentan signo contrario (Figura 4.4).

El análisis con el desfase de los 2 meses (DMI con 2 meses de antelación), mostró para diciembre en ambos desfases (lag-1-correlación DMI-noviembre con la precipitación de diciembre, y lag-2-correlación DMI-octubre con la precipitación de diciembre), un patrón de correlaciones negativas más homogéneo que lo encontrado con el DMI-diciembre (Figura 4.4). Los meses siguientes presentan patrones heterogéneos y poca significancia estadística.

#### 4.3.2. Señales mensuales coincidentes entre mecanismos

Los 3 mecanismos analizados anteriormente, presentan distintas señales a lo largo del ciclo anual de la precipitación de la RTHC, pero algunos meses mostraron señales fuertes de los 3 forzantes en simultáneo. Esto fue observado en diciembre, enero y julio.

En la Figura 4.5 se presentan las correlaciones entre las precipitaciones de diciembre (enero) y los 3 forzantes en el mismo mes y 2 meses previos (izquierda y derecha, respectivamente).

Iniciando con diciembre, el ENSO presenta correlaciones negativas significativas, en la zona llana (llanuras) de las subregiones NE y CN; mientras la NAO presenta correlaciones positivas en toda la región, siendo significativas en las subregiones CN y CS. La señal del IOD no es significativa, sin embargo, podría reforzar la señal del ENSO.

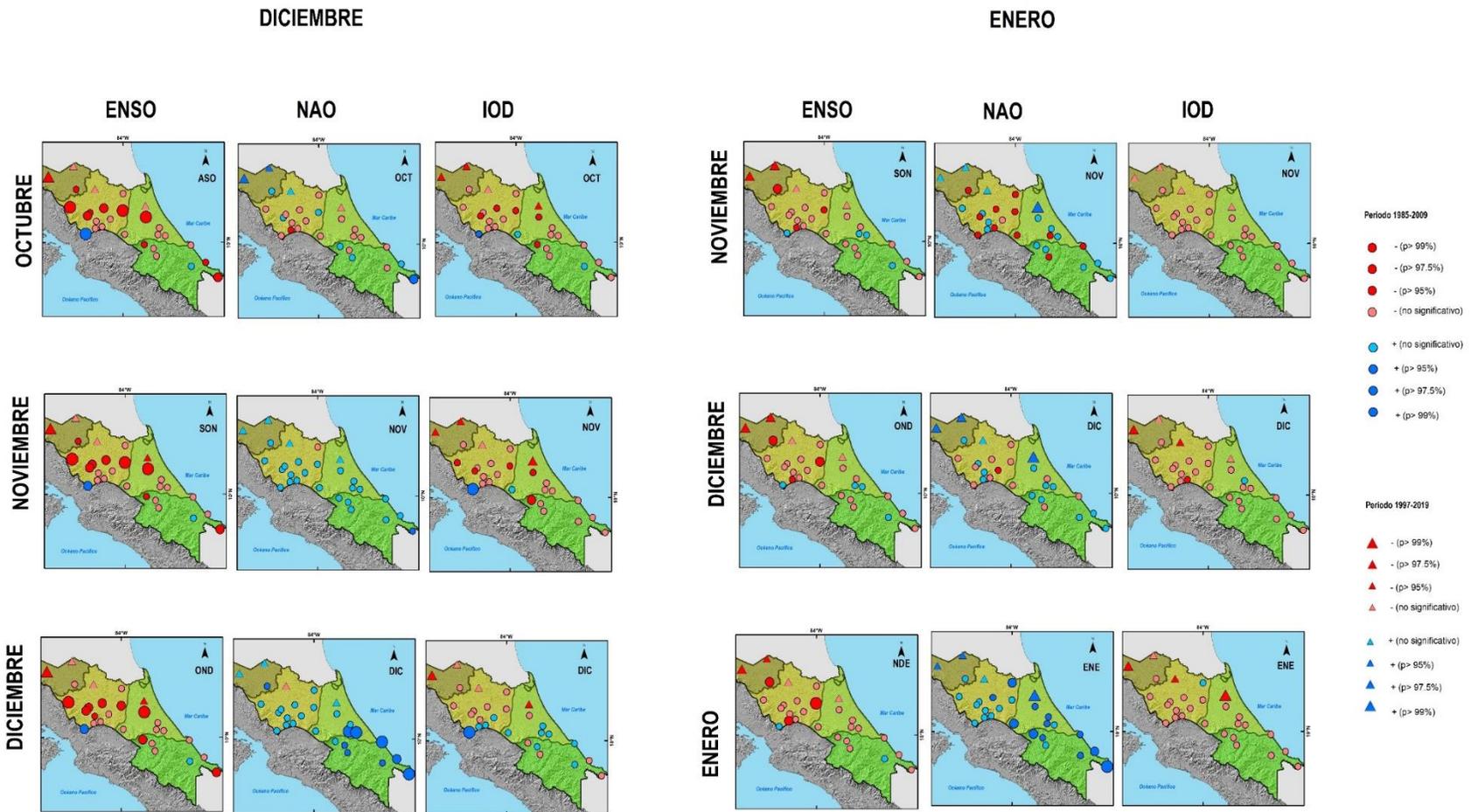
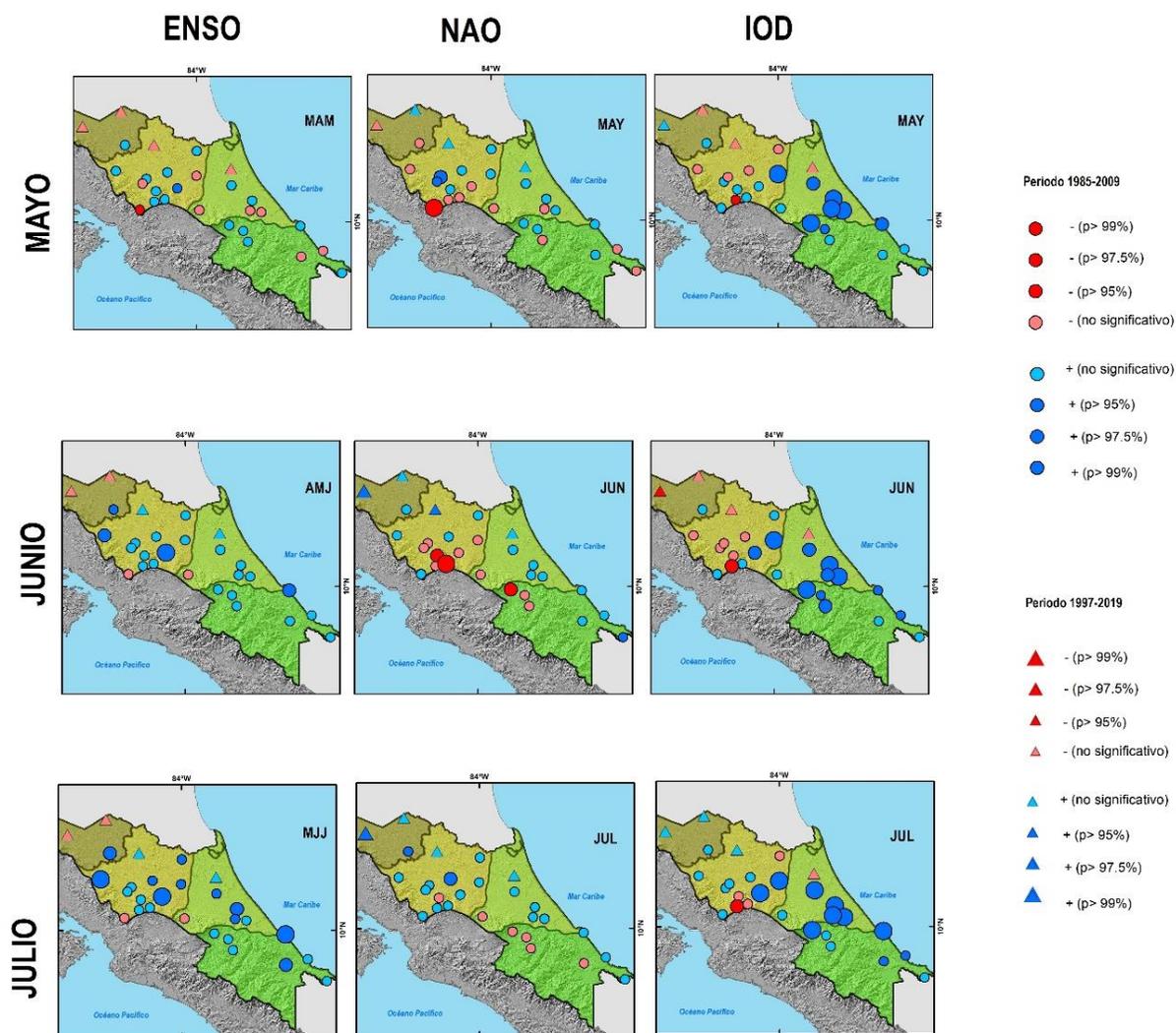


Figura 4.5. Correlaciones de diciembre y enero entre las series de precipitación y los 3 forzantes seleccionados, para análisis diagnóstico (mismo mes) y desfase de 2 meses. El color azul (rojo) representa las correlaciones positivas (negativas).

Siguiendo con las precipitaciones de enero, el análisis de las correlaciones entre los índices de enero con la lluvia de este mes, destaca una señal clara para los 3 forzantes, siendo el ENSO y el IOD consecuentes en su patrón de correlaciones negativas para toda la región, con significancia principalmente en las subregiones NE y NO. Lo más interesante se muestra con la NAO, donde toda la región muestra correlaciones positivas, siendo significativas las más cercanas a las llanuras y costa del Caribe en el CN y CS. Los campos de correlaciones para los forzantes en los meses previos tienden a conservarse ([Figura 4.5 derecha](#)).

Al analizar las correlaciones entre las precipitaciones de julio y los 3 forzantes (en el mismo mes y meses previos) ([Figura 4.6](#)), es interesante observar que la señal tiende a ser positiva, siendo la señal más alta con el IOD y con el ENSO. La NAO presenta una regionalización en el sentido sureste de la cordillera-llanura y costa norte de la RTHC, siendo negativa y significativa en la región montañosa. La regionalización observada con la NAO aduce a una relación con la entrada de los vientos alisios al país ([Amador, 1998; 2008](#)), ya que cuanto más cerca de la costa-noreste, la señal es positiva, mientras más cercano a la cordillera-sureste, la señal es negativa, siguiendo la trayectoria de los alisios ([Alfaro, 2002](#)).

Además, puede evidenciarse que julio es el único mes donde los 3 forzantes presentan de manera general la misma señal positiva ([Figura 4.6](#)), por lo que un ONI, NAOI y DMI positivos en julio, estarían relacionados con aumentos de lluvias durante julio, principalmente en las subregiones NE y CN, mostrando una relación directa.



**Figura 4.6.** Correlaciones entre las series de precipitación de julio y los 3 forzantes seleccionados, por análisis diagnóstico (mismo mes) y desfase de hasta 2 meses. El color azul (rojo) representa las correlaciones positivas (negativas).

### 4.3.3. Composites de las anomalías de precipitación mensual según fases del ENSO

#### Composites de la precipitación mensual según fases del ENSO

Dado que el ENSO presentó la señal más generalizada en la RTHC, se realizó un análisis más detallado para este, desagregando según las fases del ENSO de manera mensual. Los resultados de los composite mensuales se presentan en el [Anexo 4](#).

#### Composites de las anomalías de precipitación mensual y fases del ENSO

Con el fin de analizar la señal de las fases del ENSO, en la [Figura 4.7](#) se presentan los composites de las anomalías de las precipitaciones mensuales en donde se observan comportamientos distintos entre los meses y muy variables en su distribución en la RTHC.

En el cuatrimestre enero-abril, el resultado más llamativo se da en febrero, ya que las anomalías durante los eventos El Niño son prácticamente negativas en toda la RTHC y las de La Niña son positivas. En enero, no se observan grandes diferencias entre ambos eventos: anomalías positivas concentradas en el CN. En marzo, para ambas fases las anomalías son mayormente negativas, observándose la mayor reducción en La Niña en el CS, con disminuciones de entre 100 y 150 mm.

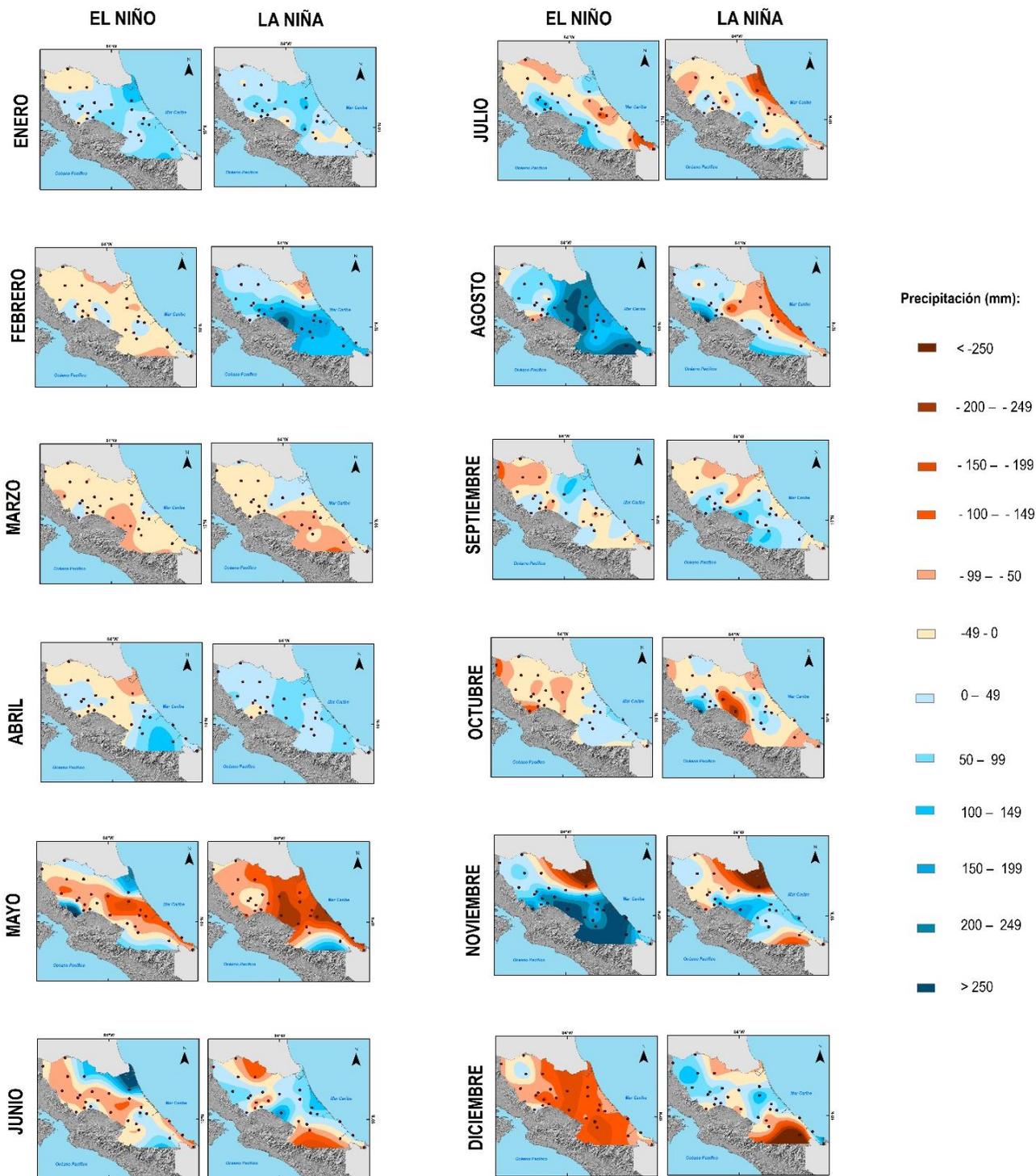
En mayo la señal es muy fuerte con La Niña (reducciones de precipitación entre los 200-250mm en el CN y costa del CS, mientras entre 100-200mm en el resto de la región). Durante los eventos El Niño, las anomalías son positivas en el extremo norte de la RTHC y partes del área montañosa, y negativas en una franja entre la costa y la montaña con valores hasta -250mm. En junio durante El Niño, se observan anomalías positivas mayores a 250mm en el extremo norte del CN (estación Cantagallo). La Niña presenta anomalías positivas (menores a 100mm) y negativas cerca de la frontera con Nicaragua y en el CS en el área montañosa.

El mes de Julio presenta una regionalización con un gradiente cordillera-costa, pero que se distingue mayormente en los años El Niño, presentando anomalías positivas en la montaña y negativas hacia la llanura y la costa. Durante los eventos La Niña, las anomalías negativas se hacen más fuertes en toda la línea costera con reducciones de entre 100-250mm. Agosto

es uno de los meses con los contrastes más fuertes en las anomalías durante los años El Niño o La Niña, ya que cuando se presenta el primero, las anomalías superan los 250mm en el CN y prácticamente toda la región experimenta aumentos de 100-200mm, mientras que con La Niña, las reducciones se ubican sobre la llanura caribeña y la costa (bajas entre 50-200mm).

En septiembre lo más llamativo se da en eventos La Niña, el gradiente cordillera-costa es evidente, con anomalías positivas sobre la cordillera (50-150mm), mientras las reducciones aparecen hacia la costa del CN y el norte de NO y NE alrededor de -100mm. En octubre, el comportamiento es heterogéneo para ambas fases. Se destacan anomalías negativas en toda la región con El Niño (excepto el CS). Con La Niña, la mayor reducción se da en el área montañosa entre 150-250mm.

Noviembre tiende a presentar un patrón de anomalías negativas en el norte de la costa del Caribe y en el NE, en ambos eventos. No obstante, El Niño, presenta un comportamiento antagónico al anterior en el CS, con anomalías positivas superiores a 250mm en casi toda la región, lo que deja un gradiente de ascenso entre el CN al CS. Al darse La Niña, el comportamiento anterior entre el CN y CS es similar. En diciembre, durante El Niño, prácticamente toda la región presenta reducciones, concentrándose las mayores en la subregión NE y CN. Con La Niña, las mayores reducciones (mayores a 250mm) se dan al sur del CS en la montaña, pero se destaca una franja de anomalías positivas menores a 100mm en todas las llanuras del norte y CN que va desde el extremo oeste en la NO, pasando por la NE y CN hasta la costa del Caribe cercana a la estación Limón (Figura 4.7).



**Figura 4.7.** Composites de las anomalías de precipitación mensual entre años neutros y las fases del ENSO.

#### 4.4. Discusión y conclusiones

En este capítulo se revisó la literatura sobre los principales patrones de circulación, forzantes y mecanismos físicos que influyen en la variabilidad espacial y temporal de los eventos extremos de precipitación en la RTHC y Centroamérica, para diferentes escalas. El marco climático regional presentado, evidencia la variedad de componentes climáticos regionales presentes en Centroamérica. Con las influencias detalladas anteriormente, muchos de los mecanismos físicos y su interacción con el clima regional aún no se comprenden del todo ([Amador, 2008](#); [Maldonado et al. 2018](#)). Por ello, este estudio pretende aportar información actualizada de la variabilidad de la precipitación en la región y su relación con 3 forzantes, el ENSO, la NAO y el IOD: interacciones océano-atmósfera de las 3 cuencas oceánicas más importantes, Pacífico (ENSO), Atlántico (NAO) e Índico (IOD).

Los principales resultados revelan el comportamiento heterogéneo de la precipitación influenciada por los forzantes analizados a lo largo del ciclo anual en la región, dejando en evidencia la alta variabilidad de la lluvia tanto en el tiempo como en el espacio. Este resultado general concuerda con lo expuesto por [Zhao et al. \(2023\)](#), quienes exponen que la precipitación sobre la VC es más compleja en términos de variabilidad espacial y temporal que en la VP, y demuestra una estrecha conexión con diferentes forzantes.

El análisis de las correlaciones de la precipitación mensual con los forzantes seleccionados, demuestra que el ENSO es el mecanismo físico más influyente sobre la región ([Taylor y Alfaro, 2005](#); [Hidalgo et al. 2015](#); [Sánchez-Murillo et al. 2017](#); [Durán-Quesada et al. 2020](#)), aunque su interacción con otros patrones de circulación puede variar el transporte de humedad que llega a la RTHC ([Alvarado y Fernández, 2001](#); [Durán-Quesada et al. 2017](#)). No obstante, para determinar dichas interacciones, se requieren estudios más amplios que involucren estas relaciones, lo cual no se desarrolló en esta tesis.

Aunque el ENSO demostró una influencia más sostenida en el ciclo anual, la NAO y el IOD también mostraron resultados notables en algunos meses, lo que afirma su influencia sobre la precipitación en la región, siendo más fuerte en diciembre y en enero para la NAO, y en julio para el IOD. Estos 3 meses mostraron correlaciones significativas con los 3 forzantes.

El ENSO presentó un comportamiento inverso entre la lluvia de diciembre-febrero y el ONI de dichos meses, indicando que un ONI positivo (negativo) se relacionaría con una reducción (aumento) de lluvias durante este trimestre en la región, visualizándose con una antelación de hasta 2 meses. Las correlaciones presentadas entre julio-agosto muestran un comportamiento antagónico al observado entre diciembre-febrero: el comportamiento de la precipitación relacionado con el ENSO es inverso entre los meses del verano (positivo) y del invierno boreal (negativo) (Amador, 2008). Esto fue identificado por Alvarado y Fernández (2001), aunque añadieron la SST del Atlántico norte tropical a su análisis, ya que otros autores (Enfield, 1996; Enfield y Alfaro, 1999) identificaron que los excesos en el Caribe centroamericano, están mayormente asociados con anomalías de la SST en el Atlántico que con las del Pacífico, aunque esto depende de la época del año en estudio.

El ENSO mostró resultados importantes en septiembre y octubre (cambio abrupto de signo entre un mes y el otro). En septiembre las correlaciones negativas son más importantes.

La NAO es uno de los forzantes que más influye en la precipitación en la RTHC y Centroamérica, principalmente en el trimestre invernal (DEF), cuando se encuentra más activo (Osborn, 2011). Esto pudo constatarse en los resultados obtenidos en este estudio, ya que se encontró que los meses con mayor señal corresponden a diciembre y enero, con predominancia de correlaciones positivas y significativas en la costa caribeña. Esto es consistente con lo estudiado por Giannini et al. (2001), que encontraron correlaciones positivas a lo largo de la VC de Costa Rica durante diciembre y enero. Por su parte marzo y abril muestran señales negativas y significativas, al igual que julio y noviembre (Figura 4.5).

La característica tan marcada en los meses invernales se asocia a la relación de la NAO con el anticiclón del Atlántico norte, el cual, influye sobre Centroamérica con los vientos alisios (Amador, 2008; Zárate-Hernández, 2013; Hidalgo et al. 2015; Chinchilla et al. 2017). Entonces, una fase positiva de la NAO se asocia con un anticiclón más fuerte que la media durante el invierno, lo que se traduce en alisios más fuertes en su flanco ecuatorial (Cayan, 1992; Seager et al. 2000; Giannini et al. 2001). Las correlaciones positivas y significativas encontradas en la RTHC durante diciembre y enero indican relaciones directas entre la NAO y la lluvia de ambos meses, no obstante, Jury et al. (2007) y Durán-Quesada et al. (2020)

indican que la NAO se correlaciona negativamente con la lluvia en el Caribe, aunque se toman en cuenta otras variables que influyen en esta ocurrencia de precipitaciones como la SST del Atlántico norte y las fase del ENSO.

En julio y agosto, se observó una regionalización donde las estaciones ubicadas sobre el sureste de la cordillera presentan correlaciones negativas, mientras las ubicadas en las llanuras y costa del caribe se correlacionan positivamente aunque de forma no significativa (Figura 4.3). Tomando en consideración la relación de la NAO con la intensidad de los vientos alisios, la señal más importante ocurre en la parte norte de la NE y NO, en la llanura, que coincide con el paso característico de entrada de los alisios al país (Amador 1998; 2008), por tanto, puede decirse que cuanto más cercano al norte y a la costa, la NAO tendrá mayor influencia en la precipitación, que estando cercano a la cordillera. Las afirmaciones anteriores, fueron corroboradas por estudios previos como el de Waylen et al. (1996) quienes concluyeron que la NAO y la precipitación mensual en la VC de Costa Rica revelan una correlación positiva dominante durante el verano boreal (JJA).

En el contexto anterior, Hastenrath (1976) detalló que durante estos meses (julio-agosto) siguientes a una NAO invernal en fase positiva (diciembre-enero), las anomalías de precipitación podrían ser positivas. De acuerdo con Knaff (1997), esto sucede porque la NAO positiva durante DEF, deja una SST más fría en el Atlántico norte que se prolongaría hasta el verano, acentuando mayores precipitaciones en la VC. Además, Taylor y Alfaro (2005) y Poveda et al. (2014), indicaron en sus investigaciones que durante julio ocurre un breve retroceso del anticiclón del Atlántico norte hacia la zona continental, por lo que podría estar relacionado a la intensidad de los alisios durante el verano boreal. Otras conexiones de la NAO durante DEF o JJA que alteran los patrones pluviométricos, revelan la complejidad de atribuir la ocurrencia de eventos extremos de precipitación a un solo forzante. Amador (2008) indicó que se ha observado que el anticiclón del Atlántico norte varía en fase con la NAO y el CLLJ. Un anticiclón fuerte (débil) está asociado a un fortalecimiento (debilitamiento) de la NAO y del CLLJ (Wang et al. 2008; Rodríguez-Vera et al. 2019).

Por su parte el IOD, aunque se encuentra muy poco estudiado para la región centroamericana y del Caribe, y no se encontraron estudios específicos para Costa Rica, los resultados más

relevantes indican que en diciembre y enero, sobresale un patrón de correlaciones negativas, más en enero que en diciembre. Luego en abril y mayo es posible observar señales importantes. En julio se da la mayor señal (correlaciones positivas y significativas). Lo más sobresaliente ocurre en julio, por su comportamiento inverso al de enero, en las subregiones del NE y CN, siguiendo una línea desde oeste hacia la costa del Caribe, evidenciando que cuanto más cercano a la costa, los valores de las correlaciones son más altos.

En síntesis, el análisis exploratorio arrojó resultados llamativos, por lo que es un primer paso y un insumo para una línea base de investigaciones futuras que ahonden en la relación del IOD con las lluvias en la RTHC. Uno de los futuros análisis, iría en el sentido de realizar composites mensuales desagregados con las fases del IOD, de tal forma que pueda distinguirse mes a mes cómo se comportó la precipitación mensual según cada fase, y determinar si las correlaciones encontradas hacen una asociación correcta de lo indicado. Por ejemplo, de acuerdo con [Hong et al. \(2008\)](#), en el modo de IOD independiente, en julio (octubre) se da el pico de la fase negativa (positiva) y termina en enero del año siguiente (diciembre). Por otro lado, algunos autores ([Sun et al. 2015](#); [Yang et al. 2015](#)) coinciden en que el IOD alcanza su punto máximo en el otoño boreal (SON), mientras que el IOD de aparición temprana, suele alcanzar su punto máximo en JJA (antes de la temporada alta habitual en SON) ([McKenna et al. 2020](#)). Viendo esta relación del IOD en su fase negativa y de aparición temprana, con máximos alrededor de JJA, podría irse estableciendo alguna relación con lo encontrado en los resultados de la presente investigación, ya que podrían asociarse las correlaciones positivas y significativas en julio (pico del IOD negativo) y las correlaciones negativas no significativas en enero (culminación del IOD negativo).

El análisis de los 3 forzantes en simultáneo, deja en evidencia que los meses del invierno (diciembre-enero) y los del verano (julio-agosto) presentaron las mayores señales, pero también la más alta complejidad en patrones de circulación que se interrelacionan. Julio es el mes más característico, dado que los 3 forzantes revelan correlaciones positivas con la lluvia, siendo significativas con el ENSO y el IOD. La NAO en julio presenta menor señal, pero sigue el mismo patrón de correlaciones positivas que los 2 forzantes previos. En síntesis, diciembre muestra que la señal del ENSO es la más fuerte de los 3 forzantes, seguido por la

NAO. Hay una concordancia de correlaciones negativas entre el ENSO y el IOD, mientras que la NAO parece influir a la inversa. Enero muestra un patrón espacial y de signos similar al visto en diciembre (Figura 4.5). En este caso, el ENSO y el IOD siguen presentando una señal más clara con 2 meses de antelación, pero la NAO, únicamente presenta una concordancia en el signo, en la fase diagnóstica, ya que en los desfases presenta bastante heterogeneidad. El ENSO sigue siendo el forzante con la señal más fuerte.

Tomando en consideración que el ENSO presentó las señales más claras, el análisis de composite arrojó una variabilidad diversa en el ciclo anual de la lluvia según la fase, ya que aunque se suelen asociar los eventos positivos del ENSO (El Niño) con aumentos en la precipitación en la RTHC y su inversa para los eventos negativos (La Niña) (Alfaro, 2002; Amador et al. 2016; Quesada y Waylen, 2020), se logró comprender que esto se observa solo para algunos meses. En términos medios, las precipitaciones son más abundantes para los composite de años El Niño entre mayo y agosto, principalmente en las subregiones del CN y NE, y en octubre y noviembre. Para los composite de años La Niña se observaron precipitaciones más abundantes en diciembre y en el trimestre de febrero a abril.

Las anomalías durante El Niño (La Niña) respecto a los años neutros resultaron positivas en enero, agosto y noviembre (febrero, abril y junio), mientras que las anomalías negativas con El Niño (La Niña) se dan en febrero, marzo, octubre y diciembre (mayo y julio). Los mayores contrastes, se dan entre mayo-agosto, y noviembre-diciembre. Se observa que estos 6 meses presentan diferencias en las anomalías de precipitación al darse El Niño o La Niña respecto a los años neutros, mientras que los otros 6 meses del año no muestran diferencias importantes (en enero, marzo y abril las anomalías apenas se ubican entre -50 y 50mm). En síntesis, diciembre presenta las anomalías negativas más importantes del ciclo anual al darse El Niño. A la inversa, agosto y noviembre presentan las anomalías positivas más importantes. En mayo con La Niña se dan las anomalías negativas más fuertes.

De acuerdo con los resultados del Capítulo 3, el trimestre DEF acumula aproximadamente entre el 30-35% del total de precipitación anual, lo que es relevante al relacionarlo con las lluvias durante El Niño, porque en este trimestre resultan menores que cuando ocurre La Niña o años neutros. Por su parte JJA, acumula entre el 35-40% del total de precipitación

anual, en este caso, las lluvias son más abundantes con El Niño. Otras investigaciones han corroborado lo anterior, al indicar que en la RTHC la señal de El Niño tiende a reflejarse en una mayor cantidad e intensidad de lluvias en el trimestre JJA (Alfaro et al. 1998; Enfield y Alfaro, 1999; Alfaro, 2000; Alvarado y Fernández, 2001). Este comportamiento es visible en los resultados, donde en JJA la ocurrencia de precipitación con El Niño es considerablemente alta en julio-agosto, en relación con otros meses. En el contexto anterior, resalta el evento extremo de exceso de precipitación ocurrido en julio del 2015, bajo influencia de El Niño, dejando pérdidas que oscilaron los ₡ 91.016.579.007,75 en la RTHC (CNE, 2015).

En DEF, investigaciones previas como la de Waylen et al. (1996), indican que bajo efectos de El Niño, la costa del Caribe recibe menor cantidad de precipitación durante el invierno. Esto es consistente con lo encontrado en la presente investigación. Por ejemplo, más recientemente, durante DEF 2018-2019 con fase El Niño, se presentaron lluvias muy por debajo de lo normal en la VC, no presentándose un enero tan deficitario desde 1969, lo que se reportó como una mezcla entre El Niño y las SST del Atlántico norte tropical (IMN, 2019). Esto conlleva a concluir que la relación entre eventos El Niño con otros forzantes, juega un papel importante en la ocurrencia de lluvias en la RTHC.

El análisis anterior pone de manifiesto la complejidad de la variabilidad interanual y estacional de las precipitaciones en la región de estudio, y los resultados encontrados representan algunas variables de otras más complejas y variadas que interfieren con los patrones espaciales y temporales de la lluvia en la RTHC (Fernández y Ramírez, 1991; Waylen et al. 1996; Alfaro, 2000; Alvarado y Fernández, 2001; Maldonado et al. 2013; Zhao et al. 2023). Este estudio brinda un aporte para mejorar el conocimiento de la precipitación en la VC de Costa Rica y su relación con algunos forzantes. Se hace hincapié en que lo presentado refuerza lo investigado por otros autores, y colabora en marcar la pauta de estudios futuros que involucren otras variables para determinar mayores patrones de relación e influencia y para comprender de una manera más clara cómo las relaciones entre forzantes y otras variables se confabulan en los eventos extremos de precipitación.

## Capítulo 5

# Impactos de los eventos extremos de precipitación en el sector agrícola: énfasis en plantaciones de banano

### Resumen

Las características climáticas y de suelo en la región tropical húmeda del Caribe de Costa Rica-RTHC, le confieren condiciones ideales para la producción de banano, primer producto agrícola de exportación. Un estudio determinó que la agricultura en la RTHC es vulnerable a los cambios climáticos. El objetivo de este capítulo es evaluar el impacto de los eventos extremos de precipitación en el sector agrícola de la RTHC (aplicado al cultivo de banano) y su relación con las fases de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO). El estudio se basó en series de precipitación mensual de 11 estaciones meteorológicas en el período 1981-2019, ubicadas en la Región Bananera (RB). Los requerimientos hídricos mensuales del cultivo varían entre 200-500mm. Se analizó la variabilidad temporal por medio de péntadas (5 años) para determinar las probabilidades de eventos fuera de los umbrales requeridos. En términos generales, se encontró que la probabilidad de lluvias deficitarias (60%) es mayor que la de exceso (40%). Mensualmente, septiembre presenta las mayores probabilidades de lluvias por debajo de 200mm y noviembre para lluvias que excedan los 500mm. En diciembre, las probabilidades de déficit son menores al 30%, y las de exceso rondan el 40%, pudiendo ser perjudicial para el cultivo. Se analizó la influencia del ENSO a partir del Oceanic Niño Index (ONI) en las precipitaciones de los meses mencionados. Los resultados indican que las mayores probabilidades de lluvias por debajo de 200mm, en septiembre y diciembre, ocurren en años El Niño, mientras que en los excesos, las mayores probabilidades se dan en noviembre en eventos El Niño y en diciembre en eventos La Niña.

## 5.1. Introducción

La Región Tropical Húmeda del Caribe (RTHC) de Costa Rica posee un clima húmedo durante todo el año, sin una estación seca definida. Las lluvias presentan acumulaciones típicas de entre 200-500mm por mes, con máximos en Julio (entre 400 y más de 700mm) y en noviembre-diciembre (entre 400-600mm), como se observó en el [Capítulo 3](#). Aunque la región carece de una estación seca definida, existen 2 periodos de disminución significativa de las precipitaciones: uno en marzo-abril (150mm en promedio) y el otro en septiembre-octubre (300mm en promedio) ([Alfaro et al. 2024](#)). Estas características climáticas, sumadas a la topografía plana en las llanuras del Norte y en la costa del Caribe, le confieren a esta región condiciones ideales para la producción agrícola.

De acuerdo con la Encuesta Nacional Agropecuaria 2021 ([INEC, 2022](#)), la producción agrícola de la RTHC se basa en el cultivo de frutas y tubérculos, siendo el 51 y 65% respectivamente del total del área cultivada a nivel nacional. En los tubérculos sobresalen la yuca, el ñame y el ñampí, que componen el 83, el 80 y el 65% del total nacional, respectivamente. Por su parte, las frutas prevalecen en cuanto a su representatividad cultivada en la región (del total nacional), el banano (90%), el coco (88%), la piña (80%), el cacao (78%), la papaya (73%) y el plátano (72%). Este panorama muestra la importancia del sector agrícola en la región, que además representa aproximadamente el 40% de empleo en la RTHC ([INEC, 2015; Hall et al. 2020](#)).

Sumado a lo anterior, de acuerdo con [SEPSA \(2023\)](#), el sector agrícola de Costa Rica representó el segundo en importancia (22%) de las exportaciones nacionales en 2022, generando un total de US\$ 5,816.1 millones, y constituyó el 42% del total exportado del país en 2022. En cuanto a los principales productos agrícolas exportados sobresalieron, en orden de divisas generadas, el banano (US\$ 1,031.4 millones), la piña (US\$ 1,021.3 millones), el café (US\$ 370.7 millones), y la yuca (US\$ 97.8 millones); conformando el 57% de las exportaciones agropecuarias ([PROCOMER, 2022; SEPSA, 2023](#)). Productos como el banano (*Musa spp.*), la piña (*Ananas comosus*) y la yuca (*Manihot esculenta*) desarrollados casi en su totalidad en la RTHC constituyeron el 8, 7 y 1% de estas exportaciones, concentrando el

16% del total exportado del sector. Adicionalmente, según [TradeMap \(2022\)](#), Costa Rica se ubicó como el principal exportador de piña fresca del mundo, y el cuarto exportador de banano. Esto pone de manifiesto que los productos agrícolas de Costa Rica son reconocidos a nivel mundial y ocupan un lugar importante en el comercio internacional.

Tomando en cuenta que un porcentaje elevado de las exportaciones nacionales dependen de la actividad agrícola desarrollada en la RTHC, y que, según [Bouroncle et al. \(2015\)](#), el sector agrícola de esta región es el más vulnerable a los cambios climáticos, surge la importancia de analizar la variabilidad climática en la región y su repercusión en la producción agrícola. Esta variabilidad crea condiciones que pueden exceder la capacidad de adaptación de las actividades que dependen de ella, lo que puede generar vulnerabilidad social y pérdidas económicas. El Sexto Informe de Evaluación (AR6) del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) ([IPCC, 2023](#)) menciona que el cambio climático ya está afectando a los fenómenos meteorológicos y climáticos, principalmente a los extremos. Entre ellos, el aumento de la frecuencia e intensidad de los eventos extremos de precipitación (excesos/déficit).

Siendo el banano el producto agrícola de exportación que más genera ganancias en Costa Rica, y que su producción se concentra en la RTHC, este trabajo hace énfasis en éste. Las plantaciones bananeras a nivel nacional alcanzaron las 42 512 hectáreas de producción en el 2021, de las cuales 41 622 hectáreas se desarrollan en la RTHC (98% del área bananera total) ([CORBANA, 2022](#)), cubriendo un 2% del área de estudio.

El banano se cultiva durante todo el año y requiere un suministro constante y amplio de agua para proporcionar las condiciones óptimas a su sistema radicular poco profundo y vegetación verde permanente ([Salvación, 2020](#)). Tomando en cuenta el origen de la planta, su morfología (hojas anchas, gran cantidad de estomas foliares para la transpiración) y su estructura botánica, ésta requiere de una gran disponibilidad de humedad permanente en los suelos. A partir de ello, para obtener cosechas económicamente rentables, su cultivo debería efectuarse en regiones con 2000mm mínimo de precipitación anual, y un promedio mensual de 100 a 200mm ([Ortiz-Vega et al. 1999](#)). [Robinson y Galán-Saúco \(2010\)](#),

estimaron que el cultivo requiere en promedio 50mm de agua semanalmente y lluvias distribuidas uniformemente a lo largo del año (Soto, 2014). La Corporación Bananera Nacional de Costa Rica (CORBANA), indica que para la vertiente del Caribe (VC), los requerimientos hídricos mensuales varían entre 200 y 500mm (Guzmán y González, 2021).

A partir de lo expuesto, el banano requiere abundantes precipitaciones, por lo que el suelo debería estar siempre provisto de agua, con un contenido máximo a capacidad de campo pero sin saturarse (Champion, 1968). El estrés por déficit hídrico en el banano se ha reportado en varias regiones y las predicciones del cambio climático indican una demanda creciente, pero un suministro incierto de agua (Ramírez et al. 2011; Machovina y Feeley, 2013; Adhikari et al. 2015; Calberto et al. 2015). La resistencia del banano a los déficits de agua es limitada, los aportes menores de precipitación pueden reducir y paralizar la emisión de hojas (Galán-Saúco y Robinson, 2013). Las deficiencias temporales de agua producen 2 consecuencias graves, primero el cierre de los estomas durante el día, lo que retrasa el ciclo vegetativo, y segundo, una desecación de las hojas antiguas, haciendo que la planta tenga 2 o 3 hojas menos que una planta con humedad óptima (Soto, 2014). Frente a estas condiciones, la instalación de riego es prioritaria (Robinson y Galán-Saúco, 2010).

Por el contrario, los excesos hídricos también generan problemáticas a la planta. Los excesos de agua se acumulan en las raíces, causando la muerte de estas y el amarillento de las hojas (Robinson y Galán-Saúco, 2010). El exceso de agua en el suelo produce una considerable reducción o eliminación del oxígeno disponible para las plantas, generando problemas en el crecimiento, cantidad y distribución de raíces, problemas de maduración prematura del fruto, desarrollo de enfermedades y, por consiguiente, una reducción en la producción (Stover y Simmonds, 1987). La presencia de raíces superficiales, plantas pequeñas con frutos muy pobres, y una decoloración del follaje hacia un verde claro o amarillento, son indicativos de la existencia de mal drenaje (Stover y Simmonds, 1987; Soto-Quirós, 2000).

Altos valores de precipitación, en combinación con una alta humedad y un mal drenaje, tienden a favorecer el desarrollo de enfermedades en el cultivo de banano (Soto-Quirós, 2000). Marín et al. (2003) indicaron que condiciones de bajas tasas de evaporación o de alta

humedad relativa, son factores importantes para la germinación de esporas y el desarrollo de las infecciones de la enfermedad conocida como Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis*), los ataques de la bacteria *Erwinia spp.*, y del picudo negro (*Cosmopolites sordidus*) (Soto-Quirós, 2000; Robinson y Galán-Saúco, 2010). Para mayor detalle de los ciclos de producción del banano y de sus afectaciones por déficits o excesos hídricos, ver Anexo 3.

En este contexto, y según los resultados del Capítulo 3, la RTHC cumple con los requerimientos hídricos para el cultivo, presentando una precipitación media anual de 4000mm y un promedio mensual de entre 200-400mm en los meses con menor cantidad de lluvia (marzo y septiembre) y entre 400-700mm en los mayores (julio, noviembre y diciembre), teniendo una buena distribución a lo largo del año.

Por otro lado, en función de los resultados obtenidos en el Capítulo 4, y dado que el ENSO se ha identificado como uno de los más influyentes en el comportamiento de la lluvia en la región, resulta interesante relacionar los eventos extremos de precipitación con las fases del ENSO, y con ello identificar los principales impactos en el cultivo de banano. Por ejemplo, Bolaños (2019) indica que los efectos en las precipitaciones debido a la influencia del ENSO en las plantaciones bananeras de la RTHC, afectan de forma directa la producción en las plantaciones, tanto en las fases cálidas (El Niño) como en las frías (La Niña). Adicionalmente, ha registrado disminuciones de la productividad de un 9% entre junio-julio del 2015 en el caso de El Niño y de un 14% entre noviembre del 2008 y febrero del 2009 en caso de La Niña. Además, en estos eventos se observaron afectaciones indirectas: infraestructura en las fincas, los caminos y las viviendas (Bolaños, 2010).

Dado lo anterior, el objetivo de este capítulo es evaluar el impacto de los eventos extremos de precipitación en el sector agrícola de la RTHC de Costa Rica, aplicado a las plantaciones de banano y su relación con las fases del ENSO.

## 5.2. Metodología

En este capítulo se realizó una delimitación de la RTHC con énfasis en la ubicación de las plantaciones de banano, la cual se denominó Región Bananera (RB). Ésta se ubica en las subregiones climáticas del Caribe norte y sur (CN y CS), en tierras planas de la llanura costera, con altitudes entre 0-100msnm (Figura 5.1). Partiendo de esta nueva delimitación, se realizaron análisis tanto para la variabilidad espacial como la variabilidad temporal de la precipitación mensual y de los eventos extremos, basada en umbrales fijos para el cultivo de banano en 11 estaciones meteorológicas ubicadas en la RB para el periodo máximo 1981-2019 (Tabla 5.1 y Figura 5.1). Debido a que no todas las series de precipitación presentan el mismo periodo con datos completos, se realizó un análisis por péntadas (5 años).

A partir de lo determinado por CORBANA, en este capítulo se trabajó con los umbrales fijos de precipitación: entre 200 y 500mm mensuales (Guzmán y González, 2021). Se consideró déficit hídrico, cuando la precipitación se da por debajo de los 200mm, y como exceso hídrico cuando ocurre por encima de los 500mm:

$$\text{Déficit hídrico} = \text{precipitación} < 200 \text{ mm} \quad (1)$$

$$\text{Exceso hídrico} = \text{precipitación} > 500 \text{ mm} \quad (2)$$

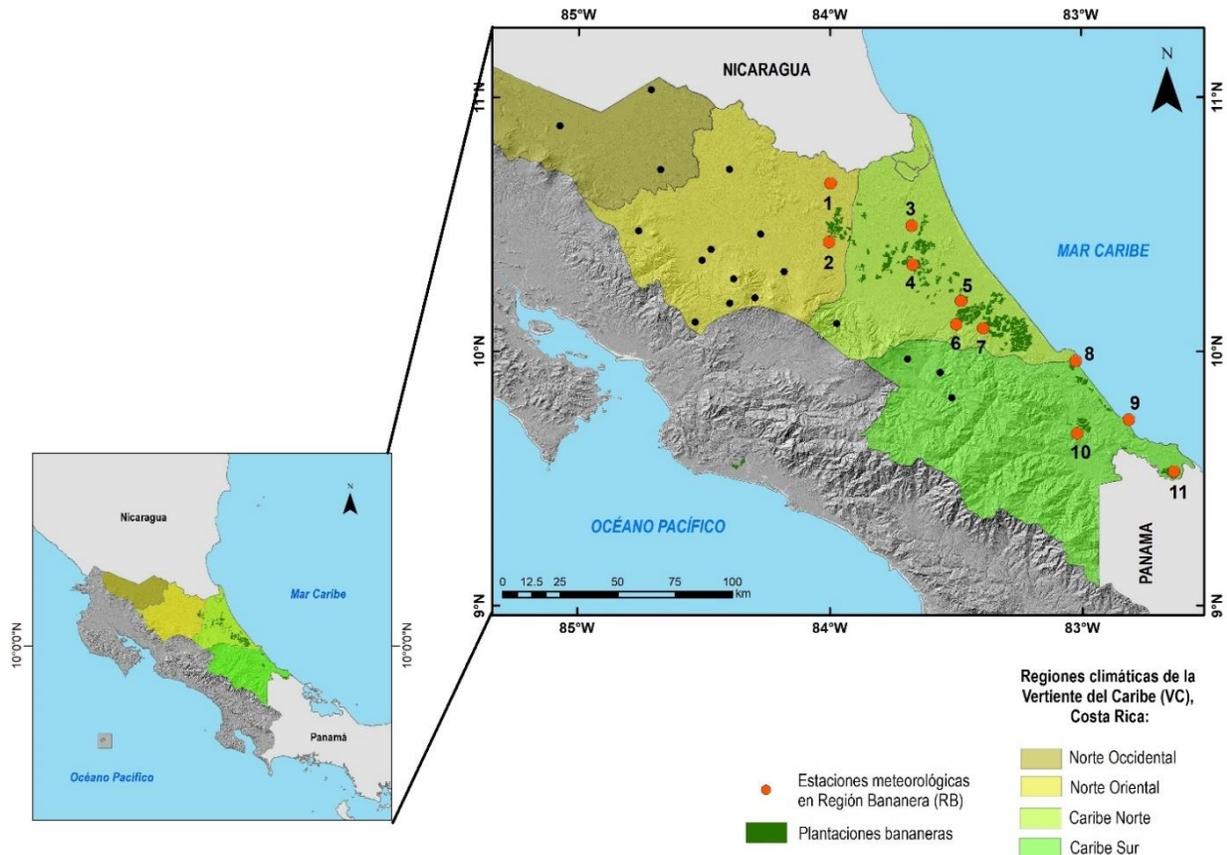
Con estos umbrales fijos, se llevaron a cabo 2 estudios: el primero fue un análisis mensual de la probabilidad de obtener lluvias por abajo (arriba) de 200mm (500mm). El segundo consistió en identificar la cantidad de eventos de precipitación fuera de los umbrales fijos definidos por cada mes, por cada estación y por péntada.

**Tabla 5.1.** Nombre, localización, altitud, y periodo de las estaciones meteorológicas en la RB.

<i>Número</i>	<i>Nombre de la estación</i>	<i>Latitud (° N)</i>	<i>Longitud (° O)</i>	<i>Altitud (msnm)</i>	<i>Periodo</i>
1	El Bum	10.66	-84.00	59	1985-2018
2	La Selva	10.43	-84.00	40	1971-2019
3	Cantagallo	10.50	-83.67	20	1996-2019
4	La Mola	10.34	-83.67	70	1980-2010
5	Hacienda El Carmen	10.20	-83.48	15	1972-2013
6	Siquirres	10.11	-83.50	68	1985-2018

7	La Lola	10.09	-83.39	40	1949-2013
8	Limón	9.96	-83.03	5	1942-2019
9	Puerto Vargas	9.73	-82.82	11	1977-2015
10	Hitoy Cerere	9.68	-83.02	100	1982-2019
11	Sixaola Day	9.53	-82.64	10	1985-2019

\*La Figura 5.1 muestra la ubicación de las estaciones según el número (#) en la RB.



**Figura 5.1.** Localización de las estaciones meteorológicas analizadas: círculos anaranjados (11 estaciones en la RB – la información de las estaciones se detalla en la Tabla 5.1 según el número-), círculos negros (17 estaciones en la RTHC). Los polígonos en verde son las plantaciones de banano.

Posteriormente, se analizó la relación con los eventos ENSO. Para cada fase, se calculó la probabilidad de obtener lluvias por debajo (200mm) o encima (500mm) de los umbrales establecidos. Finalmente, se realizó una síntesis de los impactos generados por eventos de precipitación extrema, con énfasis en los meses críticos, para las plantaciones de banano. Esto se realizó por medio de la información suministrada por CORBANA (Bolaños, 2019; Guzmán y González, 2021) y la base de datos de efectos de desastres DesInventar (UNDRR, 2023), que recopila, almacena y analiza datos sobre pérdidas por desastres a nivel regional y local a través de su representación espacial y temporal (Orozco-Montoya et al. 2022).

## 5.3. Resultados

### 5.3.1. Probabilidades mensuales de precipitación según umbrales fijos

#### 5.3.1.a. Región bananera

Con base en los umbrales recomendados por CORBANA, se analizó la variabilidad temporal, en péntadas, de las probabilidades mensuales de presentar lluvias fuera de los umbrales (Tablas 5.2 y 5.3).

Como se observa en la Tabla 5.2, las probabilidades de tener precipitaciones por debajo de 200mm son altas (arriba del 70%), registrándose en la péntada 1991-1995 en los meses de enero y febrero, y en la péntada 1996-2000 en septiembre. Otras péntadas en orden de importancia presentaron valores por arriba del 60% en 2 o 3 meses: 1991-1995 (enero-abril), 1981-1985 (marzo y abril), 2001-2005 (marzo y septiembre), 2011-2015 (febrero y abril). Con respecto a las péntadas y meses que presentan bajas probabilidades se puede observar que en 2006-2010 la mayoría de las probabilidades se encuentran por debajo del 50% (excepto septiembre). En 1986-1990 todas las probabilidades están por debajo del 45% (excepto febrero).

Respecto al análisis de las probabilidades de superar los 500mm por péntada (Tabla 5.3), ningún mes ni péntada supera al 55%. Las péntadas con mayores probabilidades de exceso se presentaron en diciembre en 1996-2000 (54%) y noviembre en el 2001-2005 (55%). Puede observarse que en el periodo 2001-2019 (4 péntadas), julio y noviembre presentan probabilidades mayores al 20%, mientras que diciembre lo presenta de 1996 al 2015 (4 péntadas). Las menores probabilidades en todo el periodo se observan en la péntada 2016-2019, donde 5 meses no poseen probabilidades de exceso (0%). Adicionalmente, en las péntadas 1981-1985, 1990-1995 y 2011-2015, las probabilidades son menores al 10% en los meses de enero a abril y en septiembre y octubre.

Tabla 5.2. Probabilidad mensual de ocurrencia (%) de precipitación inferior a 200 mm, por péntada.

	1981-1985	1986-1990	1991-1995	1996-2000	2001-2005	2006-2010	2011-2015	2016-2019
<b>Ene</b>	43	14	73	48	22	11	40	37
<b>Feb</b>	34	58	71	30	55	53	60	60
<b>Mar</b>	69	42	64	64	69	38	52	57
<b>Abr</b>	66	42	60	58	31	51	64	51
<b>May</b>	34	12	20	8	25	33	26	11
<b>Jun</b>	20	22	24	12	31	38	28	23
<b>Jul</b>	20	14	4	8	4	22	2	9
<b>Ago</b>	6	20	31	24	9	27	48	29
<b>Sep</b>	57	40	20	72	67	65	56	51
<b>Oct</b>	34	12	31	26	33	45	52	17
<b>Nov</b>	23	18	31	12	7	22	24	9
<b>Dic</b>	6	20	20	2	24	11	16	17

Tabla 5.3. Probabilidad mensual de ocurrencia (%) de precipitación superior a 500 mm, por péntada.

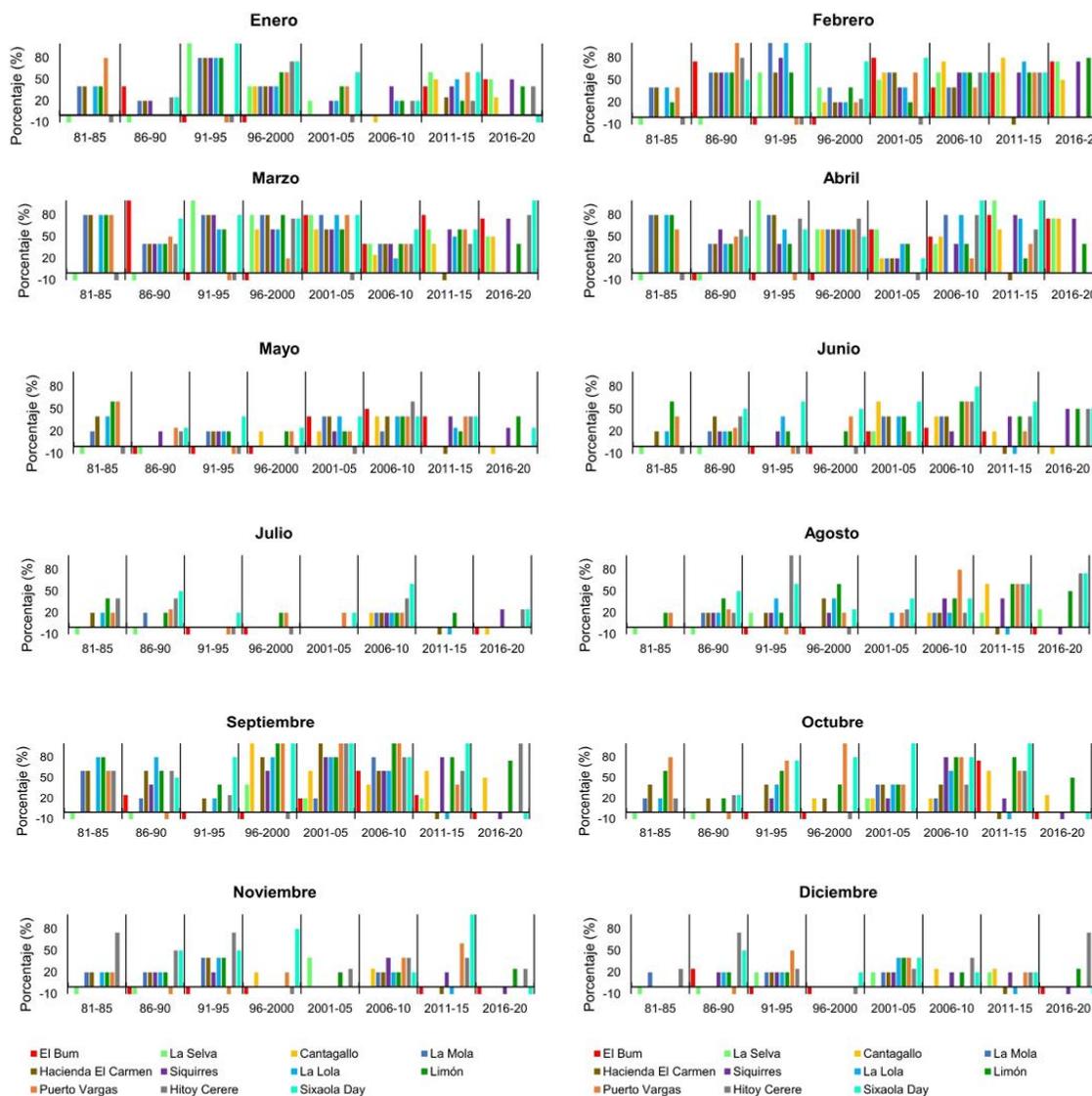
	1981-1985	1986-1990	1991-1995	1996-2000	2001-2005	2006-2010	2011-2015	2016-2019
<b>Ene</b>	6	12	0	18	18	18	16	17
<b>Feb</b>	0	0	0	26	0	22	0	0
<b>Mar</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Abr</b>	0	4	0	2	9	0	0	0
<b>May</b>	17	12	13	32	42	4	14	9
<b>Jun</b>	9	10	2	18	24	4	18	17
<b>Jul</b>	20	6	38	16	24	25	44	31
<b>Ago</b>	14	16	13	16	25	13	6	6
<b>Sep</b>	0	2	2	0	0	0	0	0
<b>Oct</b>	9	12	2	4	5	4	2	0
<b>Nov</b>	11	2	16	18	55	44	26	23
<b>Dic</b>	6	6	18	54	42	36	22	11

### 5.3.1.b. Por estación

Tomando como base los resultados anteriores, se repitió el cálculo por estación. Visualmente, en las Figuras 5.2 y 5.3, las barras representan las estaciones, donde las ubicadas hacia la izquierda, se localizan al norte de la RB (El Bum, La Selva, Cantagallo y La Mola). A partir de la estación Hacienda El Carmen, hacia la derecha (Siquirres, La Lola, Limón, Puerto Vargas, Hitoy Cerere y Sixaola Day) se localizan cercanas a la costa (costeras y al sur).

Las estaciones ubicadas hacia el sur de la RB son las que presentaron los mayores porcentajes de déficit en el cuatrimestre enero-abril y el bimestre septiembre-octubre (Figura 5.2). Sobresalen los meses de marzo y septiembre, aunque espacialmente se comportan de manera distinta, ya que la regionalización observada se invierte. Por ejemplo en septiembre la ocurrencia de lluvias por debajo de 200mm se da más en las estaciones ubicadas hacia la costa del Caribe (subregiones CN y CS) mientras que en marzo esto ocurre en las estaciones ubicadas hacia el norte y menos hacia la costa.

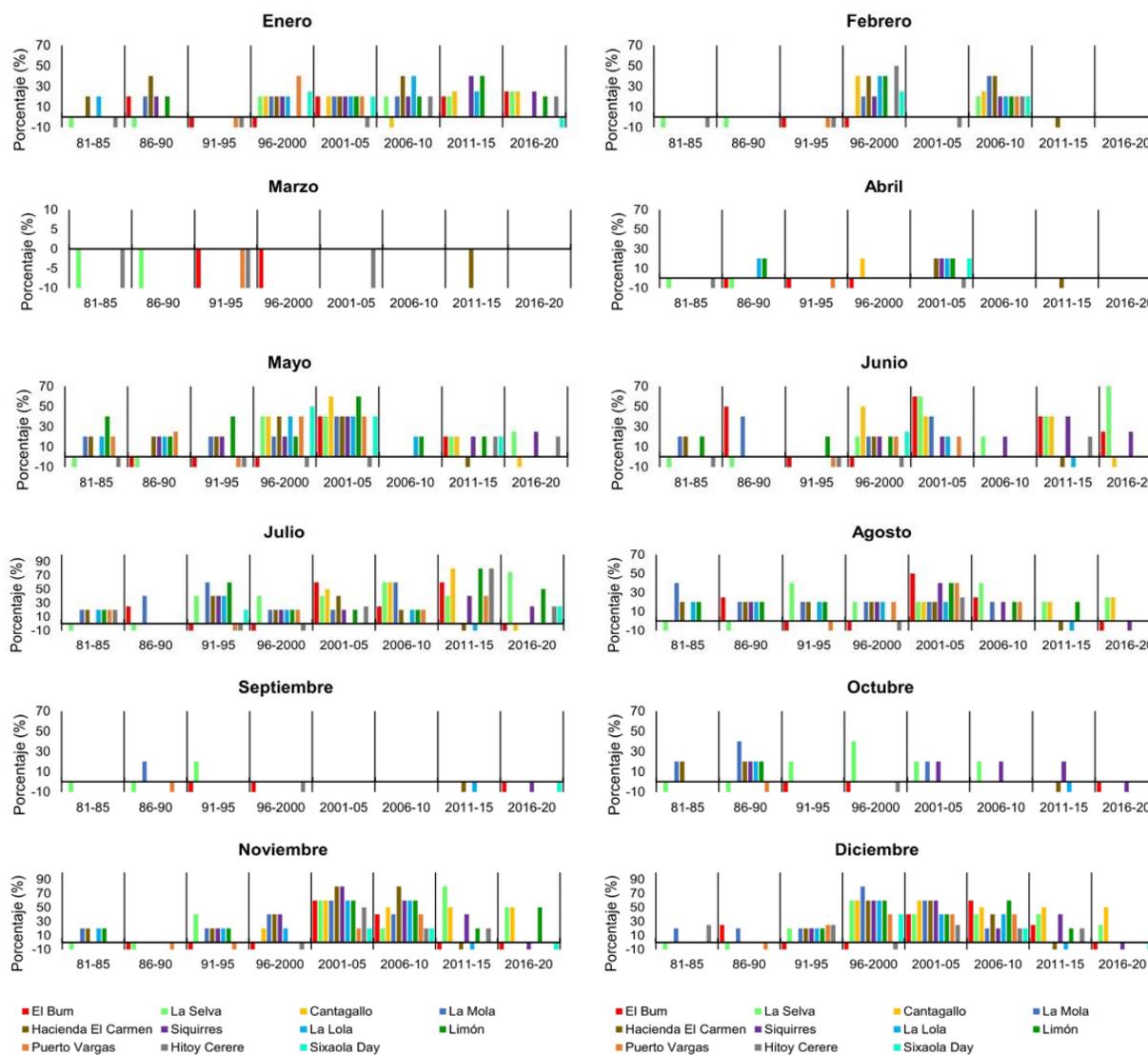
Los déficits presentados en enero y febrero también son importantes, principalmente en este último mes. En enero, las péntadas 1996-2000 y 2001-2005 sobresalen porque las estaciones costeras mostraron las mayores probabilidades de lluvias por debajo del umbral, mientras en la péntada 1991-1995 fue generalizado para toda la región. En febrero, los valores más altos se registraron en las péntadas 1986-1990 y 1991-1995 para toda la región (arriba del 60%), principalmente las estaciones costeras (Siquirres, La Lola y Sixaola Day) presentaron porcentajes cercanos al 100%, así como La Mola en el norte. En el periodo 2001-2019, todas las estaciones costeras ubicadas más hacia el sur (Hitoy Cerere, Puerto Vargas y Sixaola Day) presentaron los mayores déficits (alrededor del 80%), mientras las del norte (con excepción de Cantagallo) fue del 40-50%.



**Figura 5.2.** Porcentaje mensual de eventos de precipitación menores a 200mm, por péntadas y estación. Porcentajes negativos corresponden a estaciones sin datos para esa péntada.

En marzo el comportamiento en las estaciones es más homogéneo, sin embargo, se observan algunas probabilidades superiores al 50% en las estaciones del norte: El Bum (1986-1990; 2001-2005; desde 2011-2019), La Selva (1991-2005), Cantagallo (desde 1996 a 2005 y 2016-2019) y La Mola (1981-1985, desde 1991 a 2005). Sobresalen las pñtadas 1986-1990 y 2006-2010, donde todas las estaciones (excepto Sixaola Day) presentaron las más bajas probabilidades de lluvias deficitarias (alrededor del 30%). En abril, algunas pñtadas (1991-1995; 2011-2015 y 2016-2019) muestran mayores probabilidades de déficits en las estaciones del norte que en las costeras. Por otro lado, en 1981-1985, 1986-1990 y 1996-2000 el comportamiento es similar en toda la región. El cuatrimestre mayo-agosto, no presenta probabilidades de déficits superiores al 50%. Las estaciones costeras del CS (Puerto Vargas y Sixaola Day) sobresalen en algunas pñtadas con probabilidades que rondan el 60% en agosto. En septiembre, es más factible encontrar una regionalización entre ambas áreas en algunas pñtadas (1986-2019: 7 pñtadas), se muestra un comportamiento de mayores porcentajes de déficit en las estaciones costeras. El mismo patrón se observa en octubre, aunque en menor magnitud. En noviembre y diciembre las probabilidades de déficits son menores, aunque en noviembre, las estaciones costeras (Puerto Vargas, Hitoy Cerere y Sixaola Day) muestran valores más elevados (Figura 5.2).

En el caso de los excesos de precipitación para el cultivo de banano (Figura 5.3), el primer cuatrimestre del año (enero-abril) tiene las más bajas probabilidades de lluvias en exceso, así como septiembre y octubre. En el mes de mayo sobresalen las pñtadas entre 1996-2005, con las probabilidades más altas (40-60%), siendo llamativas en la pñtada 2001-2005 las estaciones Cantagallo (norte) y Limón (costera) con probabilidades alrededor del 60% (las más altas en todo el periodo). En junio, lo más destacable son las probabilidades mayores de las estaciones del norte respecto a las costeras en las pñtadas 1986-1990, 2001-2005 y 2016-2019. También se presentaron algunos casos aislados, de estaciones del norte como La selva con probabilidades de excesos del 75% (siendo la más alta del periodo) en la pñtada 2016-2019 y Cantagallo en la pñtada (1996-2000) con probabilidad del 50%.



**Figura 5.3.** Porcentaje mensual de la cantidad de eventos de precipitación mayores a 500mm, por péntadas y estación. Porcentajes negativos corresponden a estaciones sin datos para esa péntada.

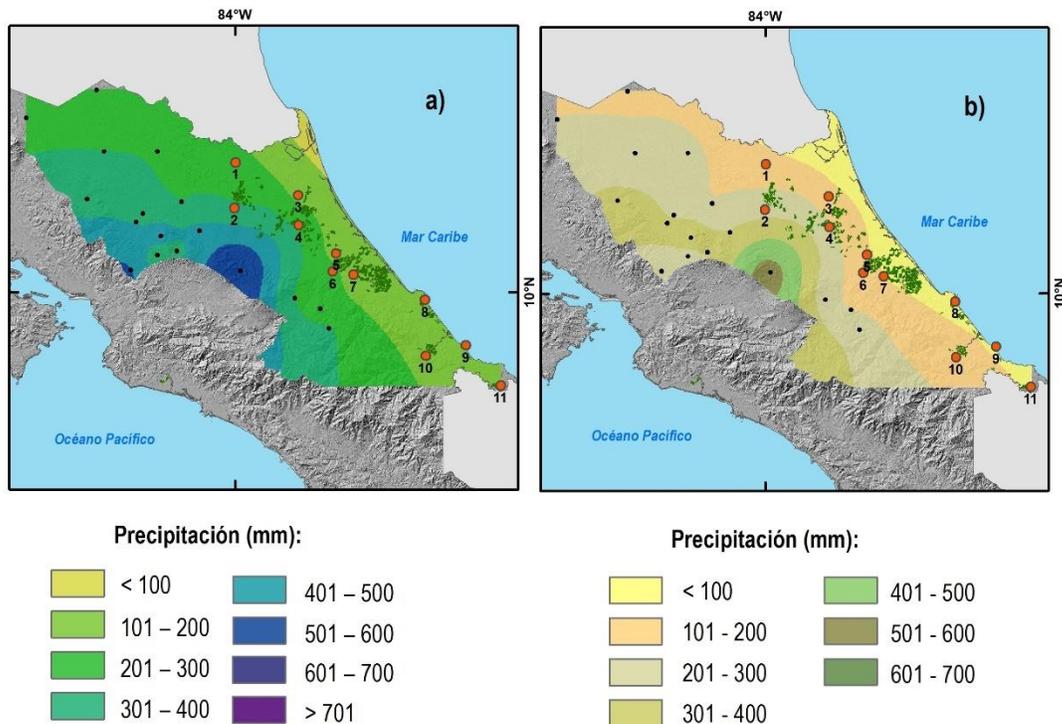
En julio y agosto las probabilidades son más generalizadas. En julio se destacan las pñtadas 1991-1995, 2001-2005 y 2006-2010. La pñntada 2011-2015 presenta un comportamiento heterogéneo, ya que las altas probabilidades se distribuyen en estaciones tanto al norte como en la costa. En agosto, las estaciones que presentaron altas probabilidades corresponden a La Mola en 1981-1985, La Selva en 1991-1995 y 2006-2010, y El Bum en 2001-2005. En septiembre y octubre las probabilidades de excesos son bajas (menos del 20%).

El bimestre noviembre-diciembre, es el de mayor importancia en cuanto a excesos. En estos meses, las probabilidades más altas de todo el periodo se observan en las pñntadas del periodo 2001-2015 (3 pñntadas) principalmente en las estaciones costeras (Hacienda El Carmen, Siquirres y La Lola). En diciembre el comportamiento es homogéneo en las pñntadas 1991-1995 y 1996-2000. Las probabilidades más bajas tanto en noviembre como en diciembre se observan en las 2 pñntadas iniciales del periodo (1981-1985 y 1986-1990).

### **5.3.2. Comportamiento espacial de los eventos extremos de precipitación en meses críticos**

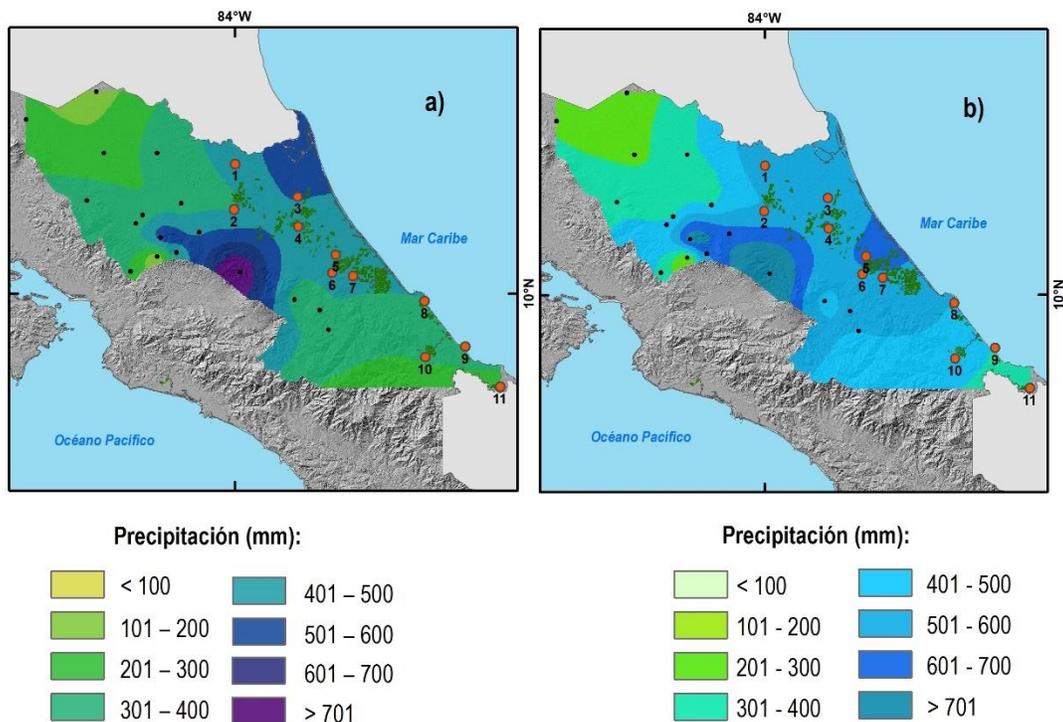
Con base en los resultados anteriores, se eligieron los meses de septiembre, noviembre y diciembre, que presentaron las probabilidades más altas de precipitaciones no óptimas para el cultivo de banano. Septiembre resalta como el mes con la mayor probabilidad de lluvias por debajo de 200mm, mientras que noviembre y diciembre son los meses que presentan mayores probabilidades de lluvias por arriba de 500mm. Con respecto a diciembre, el análisis se realizó para ambos eventos extremos, dado que en este mes se observó una ocurrencia tanto de eventos de déficits (entre 5-25%) como de excesos (entre 5-55%).

En la [Figura 5.4](#) se presenta para el mes de septiembre el total de precipitación (a) y el percentil 25 (b). Estos resultados se presentaron y detallaron en el [Capítulo 3](#). A partir de los resultados obtenidos previamente, en esta oportunidad el análisis se lo asociará al cultivo del banano. La RB se encuentra en áreas de precipitación que oscilan entre 100-300mm, recibiendo la menor precipitación en las áreas costeras. El percentil 25 muestra el gradiente cordillera-costa ([Figura 5.4b](#)), con lluvias entre 100-200mm. En las plantaciones cercanas a la costa, el 25% de las lluvias son menores a 100mm (La Lola, Limón, Puerto Vargas y Sixaola Day, no cumpliendo el requerimiento hídrico mensual mínimo del cultivo-200mm).



**Figura 5.4.** Precipitación de septiembre: a) mensual (mm) y b) Percentil 25. Círculos anaranjados 11 estaciones en la RB, círculos negros estaciones en la RTHC. Polígonos verdes: plantaciones de banano.

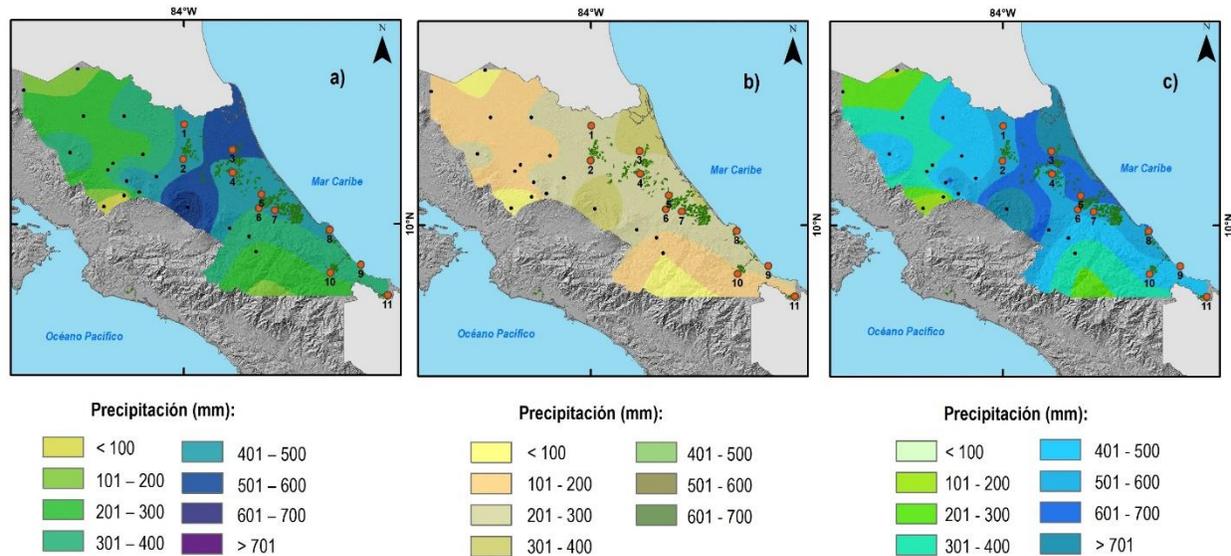
Para noviembre, se analizó el comportamiento de los eventos extremos de exceso para el cultivo (superior a 500mm). La [Figura 5.5](#) presenta para el mes de noviembre el total de precipitación (a) y el percentil 75 (b). En términos medios, en la RB se da una regionalización, encontrando valores de precipitación entre 400-500mm en la parte norte y valores entre 300-400mm en la zona sur. De esta forma se cumplen los requerimientos del cultivo. Sin embargo, al observar la distribución espacial del percentil 75 ([Figura 5.5b](#)), las mayores lluvias (por arriba del umbral fijo) ocurren cerca de la costa, entre las estaciones Hacienda El Carmen, Siquirres y La Lola (con valores entre 600-700mm). Una segunda regionalización la ocupan las estaciones El Bum, La Selva, Cantagallo y La Mola con lluvias entre 500-600mm. Mientras que las estaciones de la parte sur (Limón, Puerto Vargas, Hitoy Cerere y Sixaola Day) registran valores dentro de los umbrales requeridos.



**Figura 5.5.** Precipitación de diciembre: a) mensual (mm) y b) Percentil 75. Círculos anaranjados 11 estaciones en la RB, círculos negros estaciones en la RTHC. Polígonos verdes: plantaciones de banano.

Para el mes de diciembre, además del valor medio de precipitación [Figura 5.6.\(a\)](#) se muestran los percentiles 25 [\(b\)](#) y 75 [\(c\)](#). En la RB se presenta una franja característica con lluvias entre 500-600mm que conecta el noreste de la costa caribeña con la cordillera en el suroeste, muy cerca de las estaciones Cantagallo y La Mola ([Figura 5.6a](#)). El percentil 25 ([Figura 5.6b](#)) indica valores entre 200-300mm para prácticamente toda la región, cumpliendo con el requerimiento mínimo.

En cuanto al percentil 75 ([Figura 5.6c](#)), se dan montos por arriba de 500mm en casi toda la RB, a excepción de la parte sur, donde los valores se ubican entre 400-500mm (Puerto Vargas, Hitoy Cerere y Sixaola\_Day). En este mes, la región cultivada de banano más afectada por excesos de lluvia es el área costera norte con montos entre 600-700mm cercano a las estaciones La Mola y Hacienda El Carmen. Es posible observar que las plantaciones de banano cercanas a la estación Cantagallo presentan lluvias mayores a 700mm para este mes.

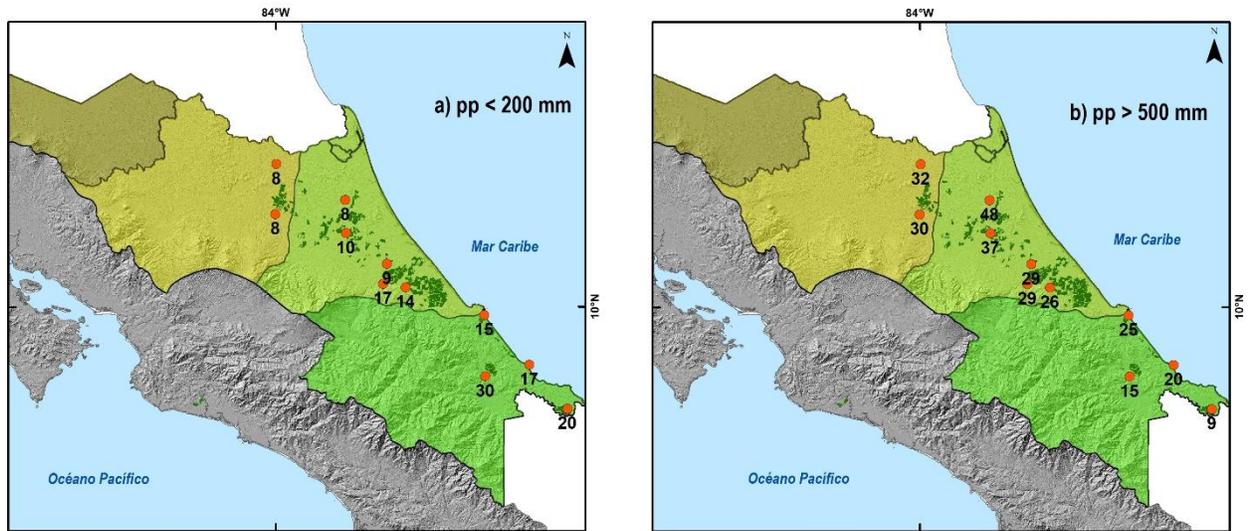


**Figura 5.6.** Precipitación de diciembre: a) mensual (mm), b) Percentil 25 y c) Percentil 75. Círculos anaranjados 11 estaciones en la RB, círculos negros estaciones en la RTHC. Polígonos verdes: plantaciones de banano.

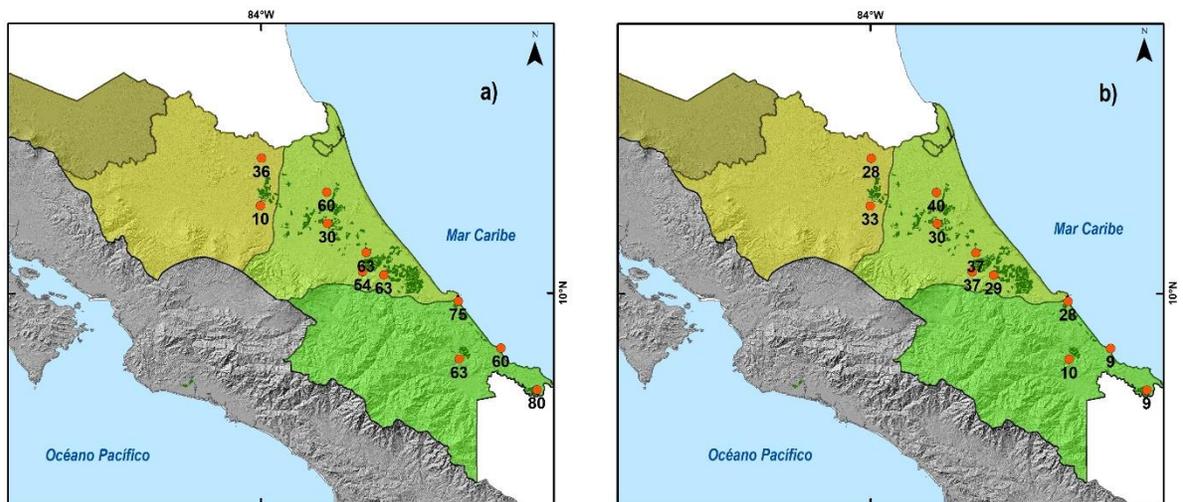
### 5.3.3. Distribución espacial de las probabilidades de precipitación óptimas

Completando el análisis, se analizaron las probabilidades de lluvias por debajo de 200mm para septiembre (Figura 5.7a) y superiores a 500mm en noviembre (Figura 5.7b). Si bien las probabilidades de tener precipitaciones por debajo de los 200mm, en términos generales, es alta, aumentan hacia la parte sur de la RB con valores entre 60 y 80%. Por el contrario, las probabilidades de lluvias por arriba de 500mm en noviembre, varían entre 9-40%, concentrándose los mayores valores en la subregión climática del Caribe norte (CN), mientras que los valores más bajos (alrededor del 10%) se ubican en el Caribe sur (CS).

El mes de diciembre presenta una regionalización similar a la observada en noviembre, pudiendo decir que la región norte de la RB (NE y CN) se comporta de manera inversa a la región sur (CS) tanto para lluvias por debajo de 200mm como por arriba de 500mm (Figura 5.8 a y b). Las probabilidades más altas de lluvias deficitarias se dan al sur de la RB (entre 15-30%) (Figura 5.8a). Al contrario, las probabilidades de lluvias en exceso, son mayores en el CN (entre 25-48%) y menores en el CS (entre 9-20%) (Figura 5.8b).



**Figura 5.7.** Distribución espacial de la probabilidad (%) de precipitación a) por abajo de 200mm en septiembre y b) por arriba de 500mm en noviembre, RB, Costa Rica. Círculos anaranjados 11 estaciones en la RB. Polígonos verdes: plantaciones de banano.



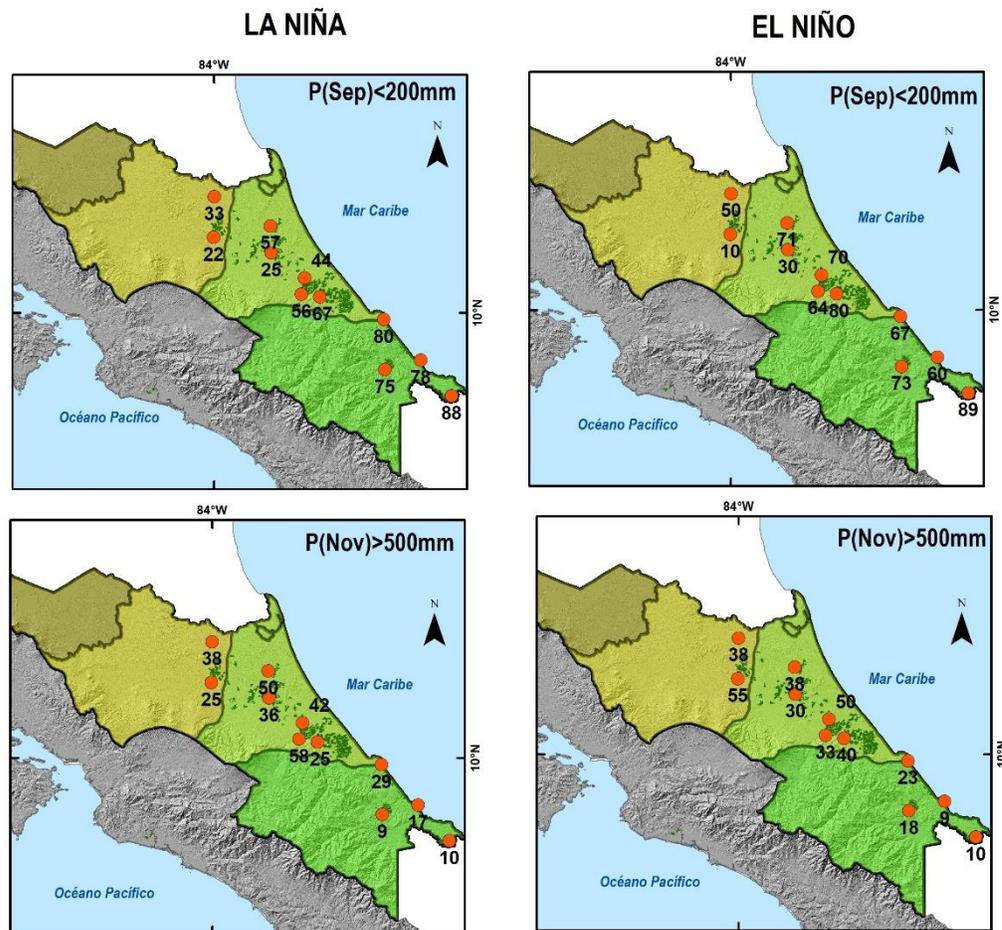
**Figura 5.8.** Distribución espacial de la probabilidad (%) de precipitación a) por abajo de 200mm y b) por arriba de 500mm, para diciembre, RB, Costa Rica. Círculos anaranjados (11 estaciones en la RB). Polígonos verdes: plantaciones de banano.

#### 5.3.4. Probabilidad de eventos extremos de precipitación según las fases del ENSO

Dado que el ENSO resultó el forzante con mayor influencia sobre la RTHC ([Capítulo 4](#)), en esta sección se analiza su influencia asociado a los umbrales de precipitación relacionados con el cultivo del banano. De este modo, la [Figura 5.9](#) muestra la probabilidad de tener precipitaciones por debajo de los 200mm en septiembre (panel superior) para cada fase del ENSO. En este mes, tanto en eventos La Niña como El Niño, las probabilidades de lluvias deficitarias son altas principalmente hacia el CS (mayores al 60%), pero son aún más en eventos La Niña, donde las estaciones del CS presentan probabilidades de lluvias por debajo del umbral en el orden del 75-88%. Mientras que esta probabilidad va disminuyendo hacia el norte, siendo valores entre el 25-50% en el CN y valores más bajos en las estaciones del NE (El Bum- 33% y La Selva- 22%). En años El Niño, el comportamiento es más generalizado en toda la región, con probabilidades altas (mayor al 50%) en casi todas las estaciones (a excepción de La Selva-10% y La Mola-30 % en el NE) ([Figura 5.9, superior](#)).

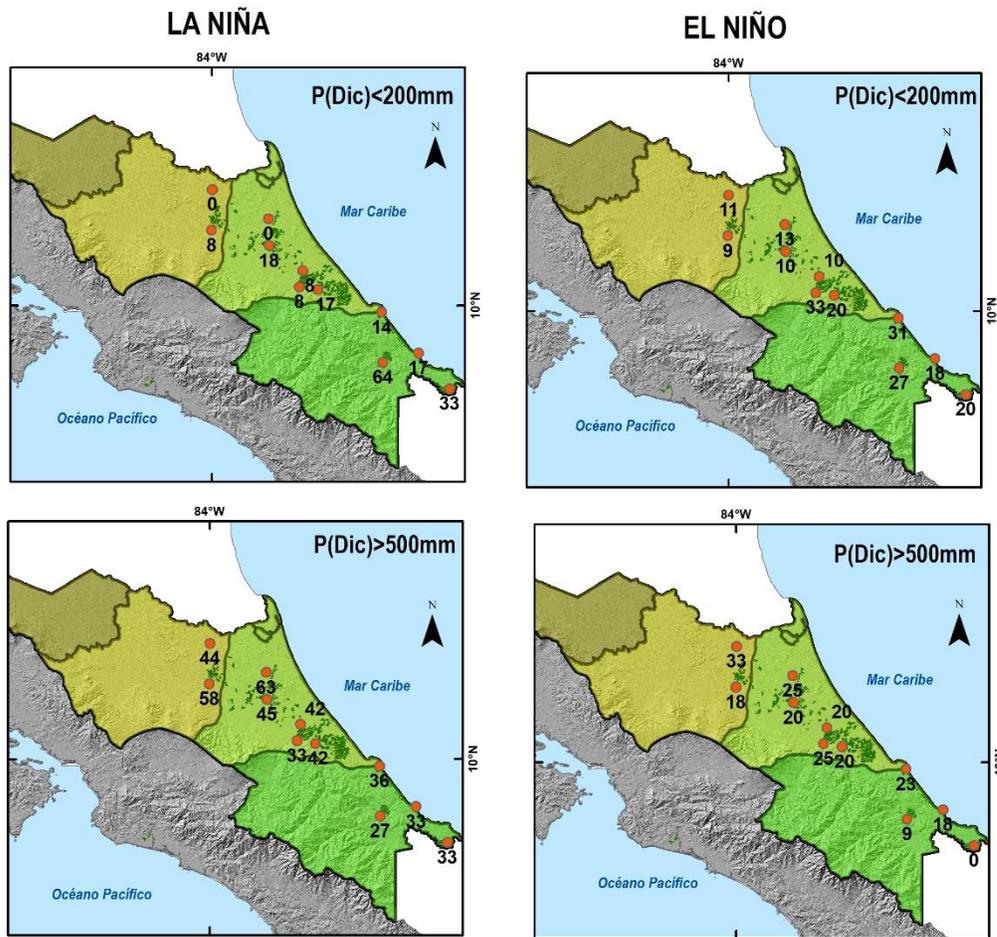
En noviembre ([Figura 5.9, inferior](#)), es interesante observar que tanto para eventos El Niño como La Niña, la región presenta un comportamiento similar, concentrando las mayores probabilidades de lluvias excedidas del umbral en el norte de la RB (CN y NE), mientras que en el CS, para ambas fases del ENSO, las probabilidades se ubican entre el 10-30%. Durante El Niño, las probabilidades tienden a ser levemente mayor en el CN y NE (superiores al 50%).

Para diciembre, la probabilidad de lluvias deficitarias ([Figura 5.10, superior](#)) es mayor durante los eventos El Niño. En eventos La Niña, la subregión del CS presenta las mayores probabilidades de lluvias deficitarias ([Figura 5.10, izquierda, superior](#)). La subregión CN presenta muy bajas probabilidades de lluvias por debajo del umbral en los eventos La Niña (algunas son cero). Mientras que en eventos El Niño, la probabilidad aumenta en el CN, concentrando los mayores valores las estaciones Siquirres y Limón (alrededor del 30%). Para las lluvias por arriba del umbral en diciembre ([Figura 5.10, inferior](#)), el área más al norte de la RB, compartida por las subregiones CN y NE, presenta las más altas probabilidades, con algunas estaciones mayores al 50% en eventos La Niña: Cantagallo (63%), La Selva (58%), La Mola (45%) y El Bum (44%) ([Figura 5.10, izquierda, inferior](#)). Se observa que en el CS las probabilidades son menores al 35% durante los eventos La Niña.



**Figura 5.9.** Distribución espacial de la probabilidad (%) de precipitación inferior a 200mm en septiembre (panel superior) y superior a 500mm en noviembre (panel inferior) bajo condiciones La Niña (izquierda) y El Niño (derecha). RB, Costa Rica. Círculos anaranjados 11 estaciones en la RB. Polígonos verdes: plantaciones de banano.

Para los eventos El Niño, en diciembre, se obtuvo que las probabilidades de lluvias que superan los 500mm son en general más bajas (35%) que al presentarse La Niña (60%). En los eventos de El Niño, las estaciones en el CN tienen probabilidades entre el 20-25%, siendo aún más bajas en el CS (nula en la estación Sixaola Day) (Figura 5.10, derecha, inferior). La probabilidad más alta de exceder el umbral se observa en la estación El Bum (33%). En síntesis, en diciembre, las probabilidades de lluvias por encima del umbral se dan mayormente con La Niña, y por debajo del umbral hay un comportamiento inverso al presentarse La Niña entre la RB al norte y al sur, mientras que al presentarse El Niño las probabilidades son más homogéneas.



**Figura 5.10.** Distribución espacial de la probabilidad (%) de precipitación en diciembre inferior a 200mm (panel superior) y superior a 500mm (panel inferior) bajo condiciones La Niña (izquierda) y (derecha) El Niño. RB, Costa Rica. Círculos anaranjados (11 estaciones en la RB). Polígonos verdes: plantaciones de banano.

### 5.3.5. Sistematización de impactos registrados en las plantaciones de banano y fases del ENSO 1970-2021

A partir de la base de datos DesInventar-Costa Rica (DI), entre 1970 y 2021 ([UNDRR, 2023](#)) se contabilizaron 2 408 impactos por desastre asociados con las precipitaciones en la RTHC. De estos, el 53% corresponde a inundaciones y el 25% a lluvias intensas. Del total de impactos registrados, 77 han afectado directamente a las plantaciones de banano en el periodo 1970-2021. De este total, el 73% de los impactos en las plantaciones han sido por eventos de inundación y el 17% por lluvias intensas. Además, en los últimos 20 años (2002-2021) se reportó el 62% de los impactos por desastre en las plantaciones (48 de 77).

La [Tabla 5.4](#) muestra una síntesis de los principales impactos registrados en las plantaciones de banano en el periodo 1970-2021, basado tanto en DI ([UNDRR, 2023](#)) como en los registros de CORBANA ([Bolaños, 2010; 2019](#)) y [Guzmán y González \(2021\)](#). En total se registran 37 efectos de desastres en el periodo de análisis, de los cuales 17 se han dado bajo influencia de La Niña, 11 con El Niño y 9 en condiciones neutras. Además, solo se registran 4 eventos deficitarios que impactaron a las plantaciones bananeras, 3 de ellos bajo condiciones de La Niña y 1 con El Niño, todos registrados entre 2002-2011, 2 casos en el primer cuatrimestre del año (enero-abril) y 2 entre junio-agosto. Dejando un saldo de 33 eventos de exceso de precipitación, que ocurrieron la mayoría bajos efectos de La Niña (14), mientras que con El Niño y fase neutra los resultados son similares (10 y 9 respectivamente).

Por otro lado, del total de registros, 17 se dieron en los primeros 30 años 1970-1999 y 20 en los últimos 22 (2000-2021). Mensualmente, la mayor cantidad de impactos por excesos se registró en diciembre (13), seguido por julio (7) y noviembre, enero y febrero con 4 cada uno. Esto demuestra que la selección de meses para realizar el análisis de la distribución espacial, en este capítulo, fue adecuada.

**Tabla 5.4.** Efectos por eventos extremos de precipitación en las plantaciones bananeras, RB, para el periodo 1970-2021

Año	Mes	Evento extremo	Fase ENSO	Hectáreas afectadas	Impactos registrados
1970	Oct	Exceso	La Niña		Pérdidas en plantaciones bananeras
1970	Nov	Exceso	La Niña		Pérdidas en plantaciones bananeras
1970	Dic	Exceso	La Niña	1 800	Pérdida de 280 mil cajas de banano
1975	Dic	Exceso	La Niña	500	Pérdida mayores a 50 millones de colones
1978	Jul	Exceso	Neutro	1 875	Pérdidas cercanas a 70 millones de colones
1978	Ago	Exceso	Neutro		Pérdidas en plantaciones bananeras Declaratoria de emergencia por inundaciones N°8946-p
1984	Mar	Exceso	Neutro		Pérdidas en plantaciones bananeras
1985	May	Exceso	La Niña		Pérdidas en plantaciones bananeras Declaratoria de emergencia por inundaciones N°16287-MAG
1988	Dic	Exceso	El Niño	500	
1992	Dic	Exceso	Neutro	600	
1993	Feb	Exceso	Neutro		Pérdidas en plantaciones bananeras Desbordamiento del río La Estrella
1993	Jun	Exceso	Neutro		Pérdidas en plantaciones bananeras Desbordamiento del río La Estrella
1993	Dic	Exceso	Neutro	2 070	
1994	Dic	Exceso	El Niño		Pérdida de 4000 cajas de banano
1996	Feb	Exceso	La Niña	20 000	4000 millones de colones en pérdidas de banano. Desbordamiento río Sixaola
1997	Jul	Exceso	El Niño		Declaratoria de emergencia por inundaciones N°26245-MP-MOPT
1999	Nov-Dic	Exceso	La Niña		Declaratoria de emergencia por inundaciones N°28399-MP-MOPT
2002	May	Exceso	El Niño	5 385	Pérdidas en plantaciones bananeras Desbordamiento del río La Estrella. Declaratoria de emergencia por inundaciones N°30456-MP-MOPT
2002	Dic	Exceso	El Niño	400	
2002-2003	Dic-Feb	Déficit	El Niño		Pérdidas en plantaciones bananeras
2005	Ene	Exceso	El Niño	12 850 237 arrasadas	Pérdida de 6 millones de cajas de banano. Tiempos de inundación entre 24 y 48hrs.

					-8% de productividad (respecto de 2004). Declaratoria de emergencia por inundaciones N°32180-MP-MOPT
2005	Dic	Exceso	El Niño	13 087	Pérdidas por \$US 1 169 473.53
2007	Dic	Exceso	La Niña	6 266 55 arrasadas	Pérdida de 300 000 cajas de banano
2008	Ene-Abr	Déficit	La Niña		Pérdida de 4 millones de cajas de banano
2008	Nov	Exceso	La Niña	10 000	Pérdida de 6 millones de cajas de banano
2008	Dic	Exceso	La Niña	12 317 309 arrasadas	-10% de productividad (respecto de 2007). Declaratoria de emergencia por inundaciones N°34973-MP-MOPT
2009	Feb	Exceso	La Niña	6 383 55 arrasadas	Tiempos de inundación entre 24 y 48hrs. -8% de productividad (respecto de 2008). Declaratoria de emergencia por inundaciones N°35053-MP
2009	Dic	Exceso	La Niña	6 438	-14% de productividad (respecto de 2008)
2010	Ene	Exceso	El Niño	3 037 12 arrasadas	70% de fincas inundadas entre 12 y 24hs
2010	Jun-Ago	Déficit	La Niña		Disminución de rendimientos
2011	Jun-Ago	Déficit	La Niña		Disminución de rendimientos
2012	Jul	Exceso	Neutro	3 954	Daños en diques
2015	Jun	Exceso	El Niño		Pérdidas en plantaciones bananeras
2015	Jul	Exceso	El Niño	5 930	Pérdidas en plantaciones bananeras -9% de productividad (respecto de 2014). Declaratoria de emergencia por inundaciones N°39056-MP.
2018	Ene	Exceso	La Niña	2 125	Daños en diques
2018	Jul	Exceso	Neutro	4 124	Daños en diques
2021	Jul	Exceso	La Niña	5 223	Pérdidas por \$US 3 709 218.97

Fuente: Bolaños (2010;2019); Guzmán y González (2021); DI (UNDRR, 2023).

## 5.4. Discusión y conclusiones

El objetivo de este capítulo es evaluar el impacto de los eventos extremos de precipitación en el sector agrícola de la RTHC de Costa Rica, aplicado al cultivo de banano y su relación con las fases del ENSO, utilizando series de precipitación de 11 estaciones ubicadas en la RB en el periodo completo 1981-2019.

Siendo el banano el principal producto agrícola de exportación en Costa Rica (8% del total de exportaciones) (SEPSA, 2023), y que se produce en su mayoría en la RTHC (CORBANA, 2022), resultó de interés su análisis y relación con la variabilidad climática en la región. Aunado a lo anterior, Bouroncle et al. (2015) indicaron que la RTHC es la región agrícola más vulnerable a los efectos del cambio climático y paradójicamente es la región que concentra en un 75% los productos agrícolas que mayormente exporta el país.

Los principales resultados revelan que los regímenes de precipitación en la RB son aptos para el cultivo de banano, presentando una precipitación media anual de 4000mm y un promedio mensual de entre 200-400mm en los meses con menor cantidad de lluvia (marzo y septiembre) y entre 400-700mm en los mayores (julio, noviembre y diciembre), teniendo una buena distribución a lo largo del año. Los impactos generalmente prevalecen para los excesos hídricos y no así para los déficits. Estos resultados son consistentes con los hallados por Ortiz-Vega et al. (1999), Soto (2014) y Bolaños (2019).

Se identifica, de manera general, que existen probabilidades en todos los meses de la ocurrencia de lluvias por debajo de 200mm (Tabla 5.2), mientras que la ocurrencia de sobrepasar los 500mm, no se da en todos los meses (Tabla 5.3). Los excesos se concentraron en julio, noviembre y diciembre principalmente.

Los excesos y los déficits responden a umbrales fijos definidos para el cultivo en la RB según CORBANA. Las precipitaciones inferiores a 200mm o superiores a 500mm implican consecuencias negativas en el cultivo (Guzmán y González, 2021).

El análisis temporal por péntadas mostró mayor probabilidad de déficit y exceso de lluvia en algunos meses de manera intercalada, con probabilidades más altas en lluvias deficitarias (arriba del 60%) que en exceso (alrededor del 40%).

Para lluvias por debajo de 200mm, se identificó que el primer cuatrimestre del año (enero-marzo) y septiembre, presentan las probabilidades más elevadas de lluvias inferiores al umbral, y las péntadas con mayor afectación de manera general se dieron entre 2001-2015 (3 péntadas) para febrero; 1991-2005 (3) para marzo; 2006-2015 (2) para abril; y 1996-2010 (3) para septiembre, encontrándose los porcentajes más altos en este último.

Respecto a los excesos, las lluvias por arriba de 500mm tuvieron mayores probabilidades en el cuatrimestre mayo-agosto y el bimestre noviembre-diciembre. Las 2 péntadas entre 1996 y 2005 fueron importantes en mayo y junio. En julio se observaron mayores probabilidades entre 2011-2019 y en noviembre-diciembre se ubicaron entre 1996-2010 (3 péntadas). El análisis realizado coincide con la variación mensual del ciclo anual de lluvias, identificándose máximos en noviembre y mínimos en septiembre, que también presentaron las mayores probabilidades de lluvias por arriba (noviembre) y por debajo (septiembre) de los umbrales críticos del banano ([Serrano et al. 2008](#)), lo cual podría ser perjudicial para el cultivo.

Como síntesis del análisis temporal realizado, y tomando como base las afectaciones al cultivo según sus fases fenológicas ([Anexo 3](#)), se sugiere una época del año, donde la siembra del cultivo podría verse menos afectada por los eventos extremos de precipitación. Considerando, que el ciclo vegetativo del banano tiene una duración de 9 meses; que los eventos de déficits tienen mayores probabilidades que los de exceso (aunque estos últimos impactan mayormente al cultivo); y que las fases infantil (3 meses y medio) y juvenil (2 meses) son las que indican mayores impactos por lluvias, podría recomendarse: un ciclo de 9 meses entre febrero y octubre. Fundamentado en que la fase infantil (propensa a daños por fuertes lluvias) se ubicaría en meses donde las probabilidades de excesos son bajas (febrero-mayo), y la fase juvenil (entre junio-julio), donde las probabilidades de exceso fueron más altas (pero menores a noviembre-diciembre). La fase reproductiva (entre agosto-octubre), donde hay probabilidades altas de lluvias deficitarias entre septiembre-octubre. Esta sugerencia toma únicamente como variable la precipitación.

Basado en la selección de los meses críticos (septiembre, noviembre y diciembre), el análisis espacial de los percentiles 25 y 75, muestran que si bien se cumplen los requerimientos mínimos del cultivo, se presenta amenaza de déficit y exceso de lluvia en algunas áreas. En septiembre, la mayor problemática se da en las plantaciones de banano ubicadas al norte de la RB y en la línea costera donde las lluvias pueden descender a los 100mm. En noviembre, el percentil 75 muestra valores arriba de 500mm en todo el CN y en la subregión del NE. En diciembre, la mayor problemática se relaciona con lluvias por arriba del umbral para la llanura costera norte en CN y NE, con montos entre 600-700mm. Para diciembre los valores debajo del umbral son menos probables según el percentil 25 (valores entre 200-400mm).

Aunado a lo anterior, el análisis de las tendencias de la contribución estacional, realizado en el [Capítulo 3](#), indicó que en las estaciones JJA y SO esta es decreciente, siendo significativa en las llanuras de las subregiones NE y CN (RB) y más altas entre septiembre-octubre. Por el contrario, la contribución de la precipitación entre diciembre-febrero al ciclo anual estaría aumentando, particularmente en la región NE. Estos resultados implican una alerta para la RB, principalmente en septiembre, ya que las precipitaciones durante este mes se sitúan entre 100-200mm en toda la línea costera. Más aún, la tendencia estacional para septiembre-octubre es negativa y significativa sobre las planicies de las subregiones CN y CS. Estos resultados resaltan la necesidad del monitoreo climático para el cultivo en los meses críticos.

Las probabilidades de lluvias fuera del umbral para septiembre y noviembre muestran una marcada regionalización, con un comportamiento inverso entre la parte norte de la RB (subregiones NE y CN) y la parte sur (CS). En el mes de septiembre, la región sur es más propensa a las lluvias por debajo del umbral, mientras que en noviembre, las probabilidades más altas de sobrepasarlo se dan en el norte. En diciembre, especialmente las mayores probabilidades de exceder los 500mm se encuentran en el norte de la RB (NE y CN), mientras que las mayores probabilidades de lluvias por debajo de 200mm, se ubican en el CS.

Al incluir la señal de los eventos ENSO en los análisis, se observa que su afectación no es homogénea regional ni temporalmente. La RB en septiembre presenta un comportamiento más generalizado en eventos El Niño, con probabilidades de lluvias por debajo de 200mm alrededor del 50%. Con los eventos La Niña, hay un comportamiento espacialmente menos

homogéneo, con mayores probabilidades de déficits al sur (arriba del 70%). En noviembre, para las lluvias que exceden el umbral, el comportamiento es similar tanto en eventos El Niño como La Niña. En diciembre, las probabilidades de lluvias por debajo de 200mm en eventos La Niña, son muy bajas en el norte de la RB (cercanas a cero) aumentando hacia el sur. Pero para lluvias por arriba de 500mm, se da el efecto contrario y más generalizado, con altas probabilidades en el norte (mayores al 50%). En eventos El Niño, regionalmente hay un comportamiento más homogéneo (probabilidades entre 10-30%) para lluvias deficitarias, aunque la región sur presenta muy bajas probabilidades (menores al 20%) para lluvias arriba del umbral. La influencia del ENSO en la RB también recalca el comportamiento inverso entre la CN y la CS. Presenta distinciones importantes entre el área norte y el sur, principalmente cuando se presenta La Niña, encontrando que el área norte presenta mayores probabilidades de exceso.

De acuerdo con la literatura sobre el comportamiento general de El ENSO en la región ([Alfaro, 2002](#); [Maldonado et al. 2013](#); [Hidalgo, et al. 2015](#); [Amador et al. 2016](#); [Sánchez-Murillo et al. 2017](#); [Durán-Quesada, et al. 2020](#); [Quesada y Waylen, 2020](#); [Hidalgo, 2021](#)), se suelen asociar los eventos positivos del ENSO (El Niño) con aumentos en la precipitación en la RTHC y su inversa para los eventos negativos (La Niña). El análisis llevado a cabo en esta tesis se logró encontrar que esta afirmación es cierta solo para algunos meses.

Basado en lo anterior, investigaciones previas como la de [Waylen et al. \(1996\)](#), indican que bajo efectos de El Niño, la costa del Caribe recibe menor cantidad de precipitación durante los meses del invierno boreal (diciembre-febrero), y esto es consistente con lo encontrado en la presente investigación, al menos para diciembre. Aunque, según [Alvarado y Fernández \(2001\)](#), el mismo comportamiento se observó en inviernos que no han estado bajo la influencia de El Niño (1968, 1978 y 1988). Más recientemente, durante diciembre-enero 2018-2019 con fase El Niño, se presentaron lluvias muy por debajo de lo normal en la RTHC, no presentándose un enero tan deficitario desde 1969 según el [IMN \(2019\)](#). Esto se reportó como una mezcla entre El Niño y una NAO positiva. Por lo tanto, aunque los resultados encontrados en la presente investigación indican para diciembre mayores probabilidades de lluvias en exceso durante La Niña, se concluye que a estos resultados se le debe relacionar

con otras variables atmosféricas y oceánicas para determinar patrones e influencias en conjunto de otros forzantes que lleven a comprender mejor esta variabilidad.

El análisis de los eventos extremos asociados al cultivo del banano según la información de DesInventar ([Tabla 5.4](#)), pone de manifiesto que los eventos de excesos son probables y los que han generado mayores pérdidas, no obstante, las probabilidades de eventos deficitarios son mayores en meses como febrero-abril y septiembre-octubre, y las probabilidades deficitarias han sido más altas en las últimas 3 péntadas (2006-2019). Además las tendencias encontradas en el [Capítulo 3](#), especialmente para septiembre-octubre son negativas y significativas. Por lo que convendría la capacitación en la RB para episodios de déficits, máxime si la región no está preparada para este tipo de eventos, ya que los excesos han sido más comunes.

La metodología utilizada en este trabajo de tesis, podría replicarse en otros cultivos de importancia en el país. Estos estudios podrían tener relevancia no solo para la exportación, sino también para el dinamismo de las economías locales, el desarrollo de los pequeños y medianos productores, los medios de vida y la seguridad alimentaria. Por ende, la generación de estudios enfocados en cultivos, su región productiva, y sus requerimientos hídricos, podrían generar resultados que ayuden a la adaptación del sector agrícola costarricense, con miras a la reducción de impactos por eventos extremos de precipitación.

Los resultados encontrados, permiten comprender especialmente los eventos extremos de precipitación y evaluar mejor su forzamiento en futuras investigaciones. Además al realizar esta aplicación al sector agrícola, se vislumbra la importancia de la relación entre clima y sociedad y cómo los eventos extremos podrían afectar negativamente a las actividades productivas.

# Capítulo 6

## Proyecciones futuras de la precipitación mensual y eventos extremos

### Resumen

Los modelos climáticos regionales (RCM) simulan mejor los cambios locales de la circulación atmosférica en zonas de orografía compleja como Centroamérica. Los modelos CORDEX-CORE proporcionan un conjunto comparable de proyecciones de alta resolución (22km para Centroamérica-CAM-22). Se utilizaron 3 RCMs (RegCM4-7, REMO2015 y CRCM5) forzados por 3 Modelos Climáticos Globales (GCM) diferentes cada uno, para la precipitación en la vertiente Caribe de Costa Rica. La selección de estos RCMs se apoya en investigaciones previas que indican que estos modelos han mostrado mejoras en la representación de patrones de circulación claves en la región. Se analizaron las precipitaciones mensuales y los eventos extremos (percentil 25 y 75) en el experimento histórico (1985-2005) y el escenario RCP8.5 para 2 horizontes temporales: 2040-2069 y 2070-2099. La validación se realizó utilizando la base de datos de 28 estaciones meteorológicas seleccionadas al inicio del estudio. Los resultados se centran en 2 meses que presentaron comportamientos opuestos y significativos en el análisis de tendencias: septiembre (negativo) y diciembre (positivo). Los resultados de la validación de septiembre (diciembre) muestran, en general, una sobreestimación (subestimación) de las precipitaciones mensuales. En cuanto a los extremos, en el percentil 25 (75) en septiembre (diciembre) se encuentran sesgos más pronunciados. Para ambos meses la mayoría de los modelos proyectan aumentos de la precipitación media hacia el este-sureste, mientras que se presenta una mayor variabilidad intermodelos hacia el oeste-noroeste para el periodo futuro próximo. La señal de cambio futuro es inferior al sesgo analizado durante la etapa de validación, lo que indica la elevada incertidumbre que entrañan las proyecciones.

## 6.1. Introducción

En un escenario de cambio climático, las políticas locales de adaptación y mitigación requieren disponer de las posibles evoluciones de las variables meteorológicas vinculadas a distintos riesgos climáticos, como las precipitaciones extremas ([Beck y Mahony, 2018](#); [Magnan et al. 2020](#); [Viner et al. 2020](#); [Simpson et al. 2021](#); [Olmo et al. 2022](#)). Los análisis climáticos futuros deben de ser el pilar que soporte esas estrategias de adaptación. Para ello, se utilizan escenarios de cambio climático y se analiza la evolución futura de variables climáticas básicas como la precipitación, las temperaturas (máxima y mínima), entre otras. Además de la evaluación de esta variabilidad, es de vital importancia el análisis de sus eventos extremos. En este contexto, los estudios muestran que la ocurrencia de eventos extremos podría aumentar, reflejándose como fuertes lluvias o sequías intensas, temperaturas extremas, cambios en la frecuencia y ocurrencia de tormentas y huracanes, entre otros, todo esto en escalas de tiempo relativamente cortas ([Dittus et al. 2016](#); [Hidalgo et al. 2017](#); [Zhang et al. 2019](#); [Dereczynski et al. 2020](#); [Dunn et al. 2020](#); [IPCC, 2023](#); [Zhao et al. 2023](#)). Es por esta razón, que la investigación de estos eventos es de suma importancia, pues genera una visión más clara de lo que podría ocurrir en el futuro si se mantienen o empeoran las condiciones de emisiones ya establecidas en la atmósfera.

A pesar de los importantes avances en la simulación del clima de la Tierra mediante modelos climáticos globales (GCM, por sus siglas en inglés), las incertidumbres en las proyecciones climáticas futuras siguen siendo grandes. La comunidad científica invierte numerosos recursos en el desarrollo y la evaluación de procedimientos de modelización para mejorar la simulación de los mecanismos físicos del sistema climático. En los últimos años, estos modelos han evolucionado tanto en la complejidad de los procesos que simulan como en los componentes que participan en ellos y en sus resoluciones espaciales. En este contexto, los Proyectos de Intercomparación de Modelos Acoplados Fases 5 y 6 (CMIP5 y CMIP6, por sus siglas en inglés) proporcionan herramientas esenciales para comprender mejor los cambios climáticos derivados de la variabilidad natural o en respuesta a cambios en el forzamiento radiativo ([Eyring et al. 2016](#); [Navarro-Racines et al. 2020](#); [Almazroui et al. 2021](#); [Olmo et al. 2022](#)).

En algunas regiones, como Centroamérica y el Caribe, debido a la falta de datos de estaciones meteorológicas, hay menos certeza en la variabilidad temporal observada ([Aguilar et al. 2005](#); [Kumar et al. 2013](#); [Jones et al. 2016](#)). Además, los cambios regionales en los patrones de circulación climática no están adecuadamente representados o resueltos por los GCMs. Esto se debe principalmente a que poseen un espaciado de cuadrícula con baja resolución, especialmente en zonas con topografía compleja ([Stone et al. 2003](#); [Lynn et al. 2007](#); [Cavazos et al. 2019](#)).

Con base en esta problemática, los enfoques de reducción de escala dinámicos y estadísticos surgen como procedimientos claves para mejorar la representación de las características a escala regional y local, como las precipitaciones extremas ([Amador y Alfaro, 2009](#)). La reducción de escala dinámica en modelos climáticos regionales (RCM, por sus siglas en inglés), proporcionan información de alta resolución, mediante la simulación numérica de los procesos físicos del sistema climático ([Giorgi y Mearns, 1991](#); [Rummukainen, 2010](#)). Las iniciativas multinstitucionales de intercomparación de modelos, como el Experimento Regional Coordinado de Reducción de Escala del Clima (CORDEX, por sus siglas en inglés-[Giorgi et al. 2009](#); [Giorgi y Gutowski, 2015](#)), han demostrado la gran aplicabilidad de la reducción de escala y su valor agregado a escalas regionales y locales ([Torma et al. 2014](#)). En particular, la resolución más fina de los RCMs, tiene como objetivo mejorar la simulación de las circulaciones regionales, especialmente en zonas caracterizadas por una orografía compleja, como es el caso de Centroamérica, buscando un progreso en la representación y la variabilidad espacial de la precipitación, la temperatura y los extremos climáticos ([Nikulin et al. 2012](#); [Bukovsky et al. 2013](#); [Giorgi y Gutowski, 2015](#); [Cavazos et al. 2019](#)).

En Centroamérica, en los últimos años, se han llevado a cabo algunos estudios de evaluación de modelos. Por ejemplo, [Hidalgo et al. \(2013\)](#) analizaron las proyecciones de cambio climático de la escorrentía para el siglo XXI a partir de 30 simulaciones de GCM sobre Centroamérica, y su utilización en un modelo hidrológico de capacidad de infiltración, encontrando que la calibración para la costa caribeña no fue satisfactoria. Según los autores, la falta de datos observacionales de caudales para la calibración podría ser una de las causas de este problema. Por otro lado, [Hidalgo y Alfaro \(2015\)](#), evaluaron la capacidad de 48 GCMs

del CMIP5 para representar algunos forzantes de la región, como los patrones de teleconexión de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), la zona de convergencia intertropical (ITCZ, por sus siglas en inglés) y los ciclos estacionales de la corriente en chorro del Caribe y sus proyecciones a finales del siglo XX sobre Centroamérica. [Cavazos et al. \(2019\)](#), llevaron a cabo una intercomparación de 3 RCMs (PRECIS-HadRM3P, RCA4 y RegCM4) sobre Centroamérica, para determinar su capacidad de reproducir las tendencias observadas de temperatura y precipitación durante 1980-2010. Los autores observaron que los 3 RCM mostraron sesgos negativos (positivos) de temperatura (precipitación) sobre las montañas, donde las observaciones son más escasas. En el trabajo de [Almazroui et al. \(2021\)](#), se examinaron los cambios previstos en la temperatura y la precipitación en Norte y Centroamérica, utilizando 31 modelos del CMIP6 para 3 periodos de tiempo futuros (2021-2040, 2041-2060 y 2080-2099) en relación con el periodo de referencia (1995-2014). Los autores encontraron que para la precipitación media anual, los modelos presentaron sesgos entre -38 y 58% para la mayor parte de la región. Además, la precipitación simulada para el sur de Centroamérica (Costa Rica y Panamá) no es congruente con las observaciones. Otros trabajos que también evalúan tanto GCMs como RCMs para Centroamérica son los de [Vichot-Llano \(2014\)](#); [Hidalgo et al. \(2017\)](#); [Imbach et al. \(2018\)](#); [AlMutairi et al. \(2019\)](#); [Cabos et al. \(2019\)](#); [Depsky y Pons \(2021\)](#); [Luna-Niña et al. \(2021\)](#); entre otros.

Para Costa Rica, en particular, [Méndez et al. \(2020\)](#) evaluaron la precipitación mensual de 5 GCMs redimensionados por 2 RCMs en el periodo 1951-1995, encontrando que la reproducción del ciclo estacional de la precipitación por parte de los modelos depende de la estacionalidad y de la región climática. El IMN en su publicación sobre las proyecciones de cambio climático regionalizadas para Costa Rica ([Alvarado, 2021](#)), utilizó el modelo PRECIS ([Wilson et al. 2016](#)) con una simulación del clima del pasado en el periodo 1951-2005, destacando que en lo referente a la precipitación, PRECIS no simula adecuadamente el ciclo anual. Respecto a las proyecciones futuras de la precipitación en la vertiente del Caribe (VC), para el escenario de más altas emisiones (RCP8.5), indica que es la región de mayor variabilidad, ya que presenta cambios positivos y negativos en función de la temporada y el horizonte de tiempo.

Sumado a lo anterior, el Sexto Informe de Evaluación (AR6) del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) (IPCC, 2023), indica que para Centroamérica, los datos y los estudios son limitados. Los RCMs proyectan cambios inconsistentes en la región (Imbach et al. 2018; Kusunoki et al. 2019; Coppola et al. 2021), generando baja confianza en comparación con el pasado reciente (1995-2014) y con la época preindustrial. Estos resultados impiden una evaluación en cuanto al cambio observado en las precipitaciones intensas, y poco acuerdo con el tipo de cambio generado respecto a observaciones en sequías agrícolas y ecológicas.

En cuanto a la evaluación de las precipitaciones mensuales y sus valores extremos, específicamente en la región de estudio (región tropical húmeda del Caribe de Costa Rica-RTHC), no se encontraron trabajos específicos centrados en eventos extremos de precipitación. Los RCMs de alta resolución del reciente proyecto integrado en el marco CORDEX, el Coordinated Output for Regional Evaluation (CORE) (Gutowski et al. 2016; Giorgi et al. 2022), sobre el dominio CORDEX-CAM (Centroamérica, Caribe y México), han mostrado mejoras al incluir las interacciones océano-atmósfera que conducen a una mejor representación de los patrones de circulación clave en la región, como la ITCZ, y presentan menores sesgos de precipitación tanto en tierra como en las regiones costeras (Li y Misra, 2014; Sitz et al. 2017; Cabos et al. 2019).

A partir de lo expuesto, el objetivo de este capítulo es analizar las proyecciones futuras de la precipitación mensual y eventos extremos sobre la RTHC, utilizando 3 RCMs de CORDEX-CORE, considerando el período histórico (1985-2005) y las proyecciones futuras bajo el escenario RCP8.5 en los periodos 2040-2069 (futuro cercano) y 2070-2099 (futuro lejano).

## 6.2. Metodología

La selección de los RCMs, sus características y delimitación, se explicaron en detalle en el [Capítulo 2](#). Los RCMs fueron validados a partir de la base de datos de 28 estaciones meteorológicas seleccionadas al inicio de la investigación, detalladas en el [Capítulo 2](#). Para el

periodo de la validación entre el histórico de los modelos (1985-2005) y la base de datos de las estaciones, se utilizó el periodo completo empleado para la climatología de la precipitación media 1985-2009 y 1997-2019 (detallado en los [Capítulos 2 y 3](#)).

Los resultados de este capítulo buscan analizar el impacto de la precipitación mensual y los eventos extremos en el sector agrícola de la RTHC, con énfasis en el cultivo de banano. Por ello, se hizo foco en los meses críticos para el cultivo identificados en el [Capítulo 5](#): septiembre (déficits) y diciembre (excesos). Además, estos meses presentaron comportamientos opuestos y significativos en el análisis de tendencias realizado en el [Capítulo 3](#): septiembre (negativo) y diciembre (positivo), por lo que analizar si este comportamiento se profundiza o se debilita en el futuro es importante al momento de tomar decisiones, con el fin de minimizarlo.

Inicialmente, se calcularon los valores medios mensuales y la desviación estándar de cada uno de los modelos (3 RCMs anidados por 3 GCMs, para un total de 9), en el período 1985-2005 para septiembre y diciembre. Para los eventos extremos de precipitación, se realizó el mismo procedimiento para los percentiles 25 para septiembre, y 75 para diciembre. Seguidamente, se realizó la validación de los modelos respecto a la precipitación observada, calculando los sesgos (bias) porcentuales, tanto para la precipitación mensual y extrema (percentiles 25 y 75) de septiembre y diciembre, según la siguiente ecuación:

$$Bias (\%) = \left( \frac{100 * Modelo}{Observaciones} \right) - 100 \quad (1)$$

La señal de cambio para las proyecciones futuras: 2040-2069 (futuro cercano) y 2070-2099 (futuro lejano) en comparación con el periodo histórico (1985-2005) fue evaluada a partir de la siguiente ecuación:

$$Señal\ de\ cambio\ (\%) = \left( \frac{100 * Modelo\ Futuro}{Histórico\ Modelo} \right) - 100 \quad (2)$$

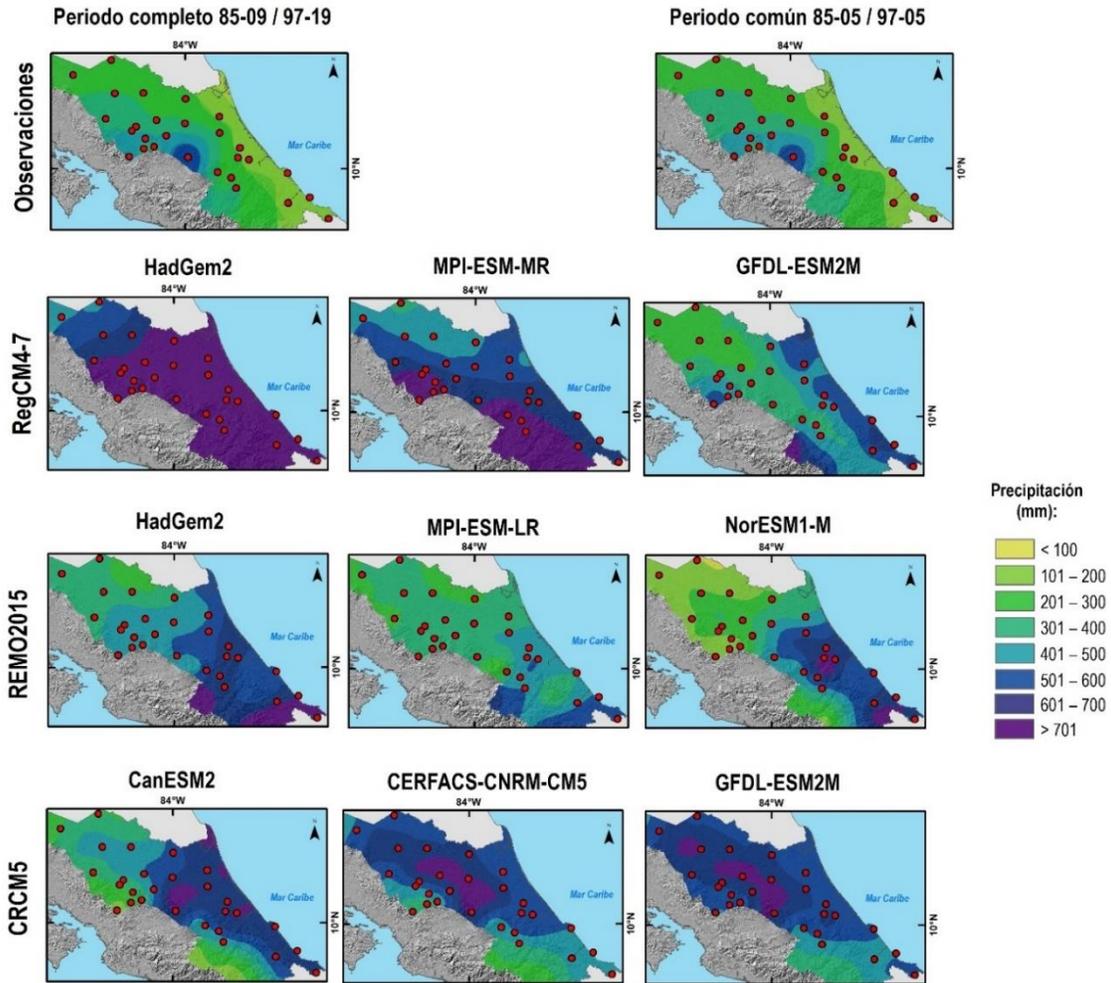
## 6.3. Resultados

### 6.3.1. Validación de los valores medios y extremos de la precipitación

#### Precipitación mensual

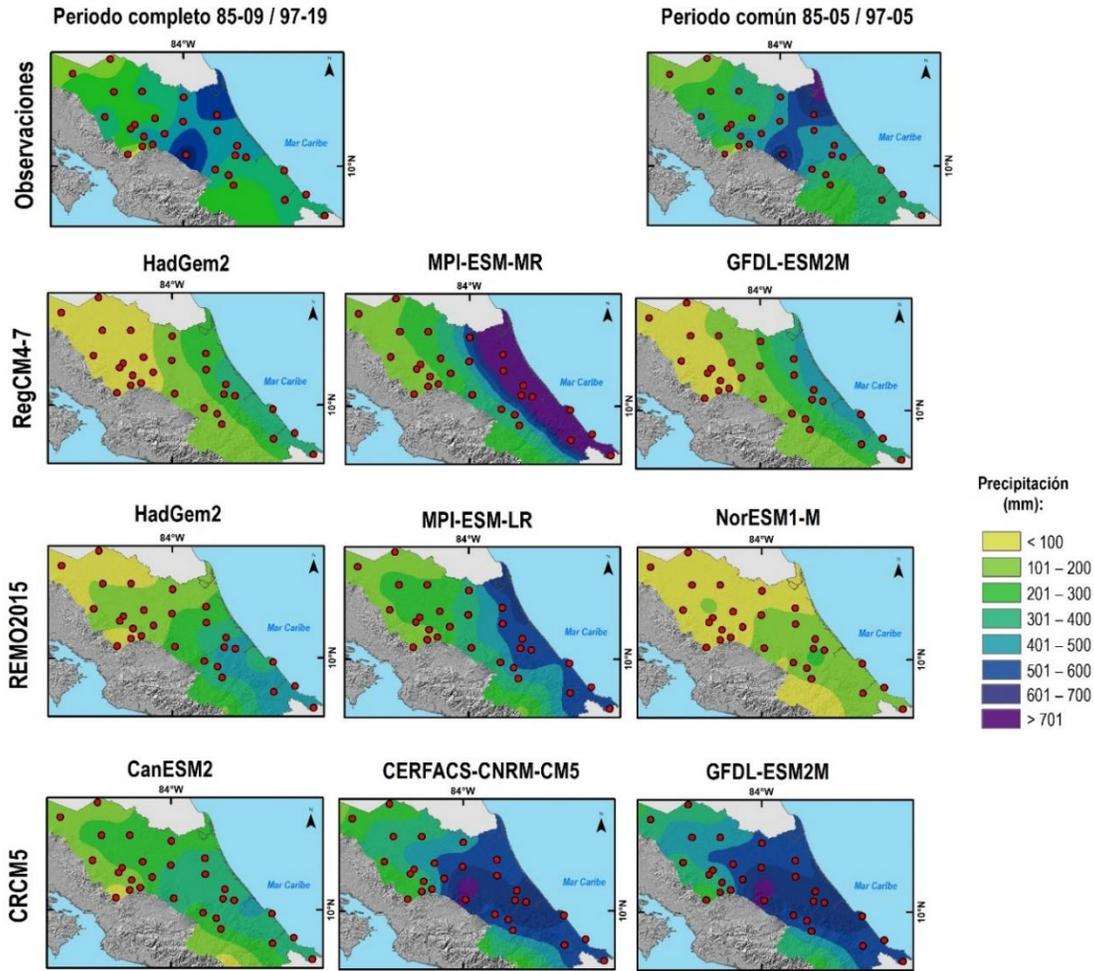
Las Figuras 6.1 y 6.2 muestran los valores medios de la precipitación para septiembre y diciembre respectivamente, para los 3 RCMs forzados por 3 GCMs, para el periodo histórico (1985-2005). Para el mes de septiembre (Figura 6.1), el modelo RegCM4-7 forzado por GFDL-ESM2M sigue un patrón espacial similar al de las observaciones (1985-2009/1997-2019). Por otro lado, los 9 modelos, en general, sobrestiman las precipitaciones en toda la RTHC para septiembre, presentando máximos por arriba de 700mm en todos los casos, mientras que en las observaciones el máximo es menor a 600mm. Desde el punto de vista de los modelos regionales, se observa un patrón de regionalización de máximos por modelo global. Por ejemplo, el modelo REMO2015 muestra los máximos hacia el sureste de la RTHC (en los 3 GCMs), centrados en la parte sur de la costa del Caribe. El CRCM5 ubica los máximos hacia el norte de la RTHC, principalmente para la costa norte del Caribe, y se amplía hacia el límite norte con Nicaragua en el caso forzado por el modelo CERFACS-CNRM-CM5 y el GFDL-ESM2M. Sin embargo, el modelo RegCM4-7 tiene un comportamiento más variable: máximos cercanos a la cordillera en el MPI-ESM-MR, sobre la costa en el GFDL-ESM2M y más homogéneo sobre la región en el HadGem2.

Para diciembre (Figura 6.2), las observaciones presentan un máximo al norte de la costa y otro en la montaña (600 a 700mm) y mínimos hacia el noroeste y suroeste (100-200mm). Todos los modelos muestran mínimos en el noroeste y máximos en la costa, solo 2 GCMs del REMO2015 (HadGem2 y MPI-ESM-LR) y 1 del CRCM5 (CanESM2), muestran un patrón levemente similar al de las observaciones, siendo este último el que más se asemeja, tanto en distribución espacial como en los valores de precipitación en la región. En detalle, los modelos RegCM4-7 (HadGem2 y GFDL) y REMO2015 (HadGem2 y NorESM1-M) subestiman las lluvias en el noroeste. En cuanto a los 2 máximos encontrados en las observaciones de entre 600-700mm los modelos no lo reproducen. El único modelo que presenta el máximo de 700mm sobre la cordillera es el CRCM5 (CERFACS y GFDL), pero con valores superiores a 500mm en toda la costa del Caribe, lo cual no representa a las observaciones.



**Figura 6.1.** Precipitación media para septiembre observada y por modelo. Las 2 figuras del panel superior, representan la precipitación observada a partir de las 28 estaciones, tanto para el periodo completo usado en la climatología: 1985-2009 / 1997-2019, como para el periodo en común del histórico: 1985-2005 / 1997-2005 (derecha).

Complementariamente, el sesgo porcentual para septiembre, evidencia que la mayoría de los modelos tienden a sobrestimar las precipitaciones (Figura 6.3). Las mayores sobrestimaciones, en general se concentran en las áreas cercanas a la costa (superior al 100%). Los modelos que más sobrestiman son el RegCM4-7 (HadGem2), el REMO2015 (HadGem2) y el CRCM5 (CERFACS y GFDL). Los modelos que subestiman son el REMO2015 (NorESM1 y el MPI-ESM) y el RegCM4-7 (GFDL). Estas subestimaciones aparecen en el orden del 25-100%, principalmente el noroeste del área de estudio.



**Figura 6.2.** Precipitación media para diciembre observada y por modelo. Las 2 figuras del panel superior, representan la precipitación observada a partir de las 28 estaciones, tanto para el periodo completo usado en la climatología: 1985-2009 / 1997-2019, como para el periodo en común del histórico: 1985-2005 / 1997-2005 (derecha).

En diciembre (Figura 6.4), el comportamiento del sesgo es contrario al observado en septiembre. La mayoría de los modelos subestiman la precipitación, excepto el modelo CRCM5 (CERFACS y GFDL), que presenta mayormente sobrestimaciones entre 0.1 y 75%. Los modelos RegCM4-7 (MPI-ESM-MR) y REMO2015 (MPI-ESM-LR), sobrestiman hacia el sureste de la RTHC (superiores al 50%). Los modelos que más subestiman (superior al 100%) son el REMO2015 (NorESM1 y HagGem2) y el RegCM4-7 (GFDL y HadGem2). El modelo con los menores sesgos (por debajo de 50%) de la precipitación de diciembre es el REMO2015 (MPI-ESM-LR). El CRCM5 (CanESM2), posee el patrón más similar a las observaciones, pero subestima entre 0.1-50% para casi toda la región y 75% en la cordillera.

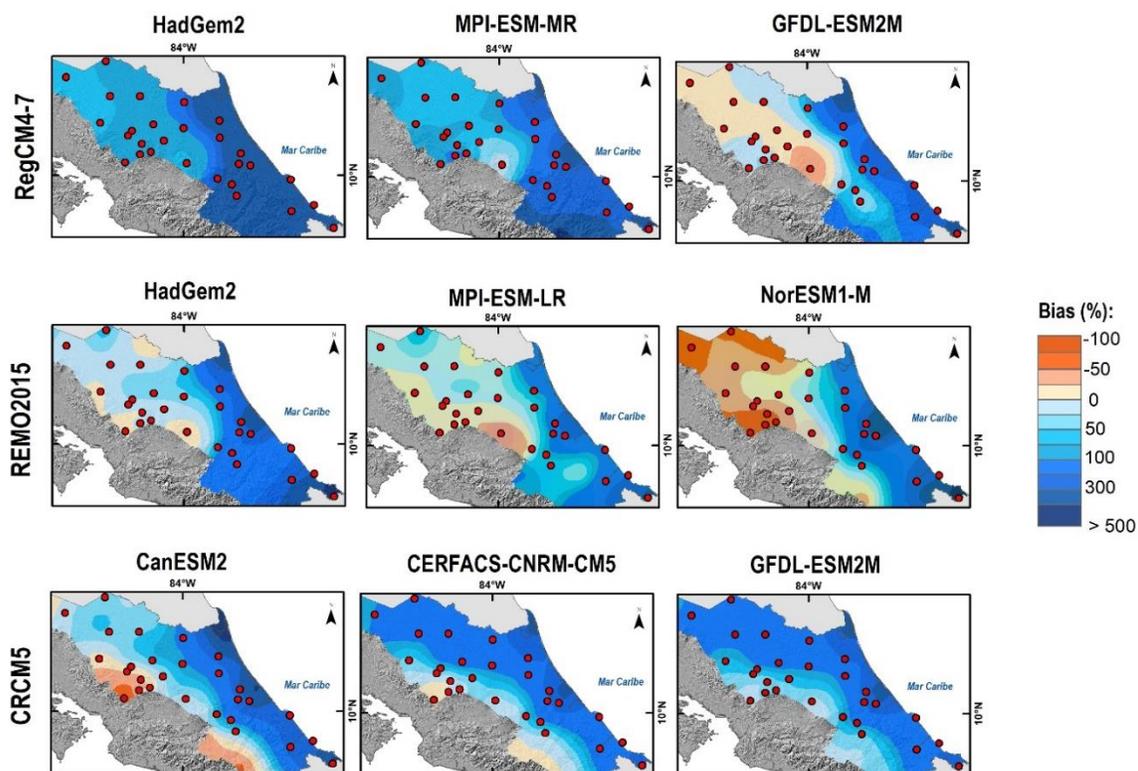


Figura 6.3. Bias porcentual (%) de la precipitación media de septiembre por RGM en la RTHC.

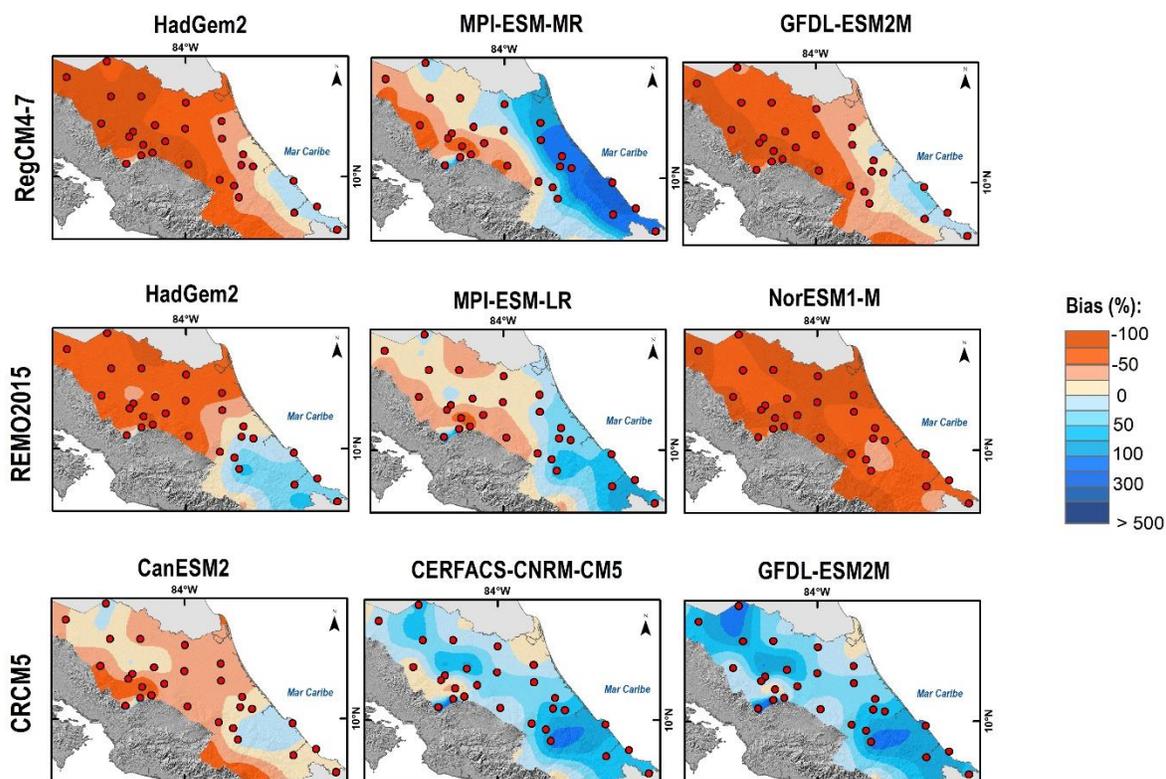
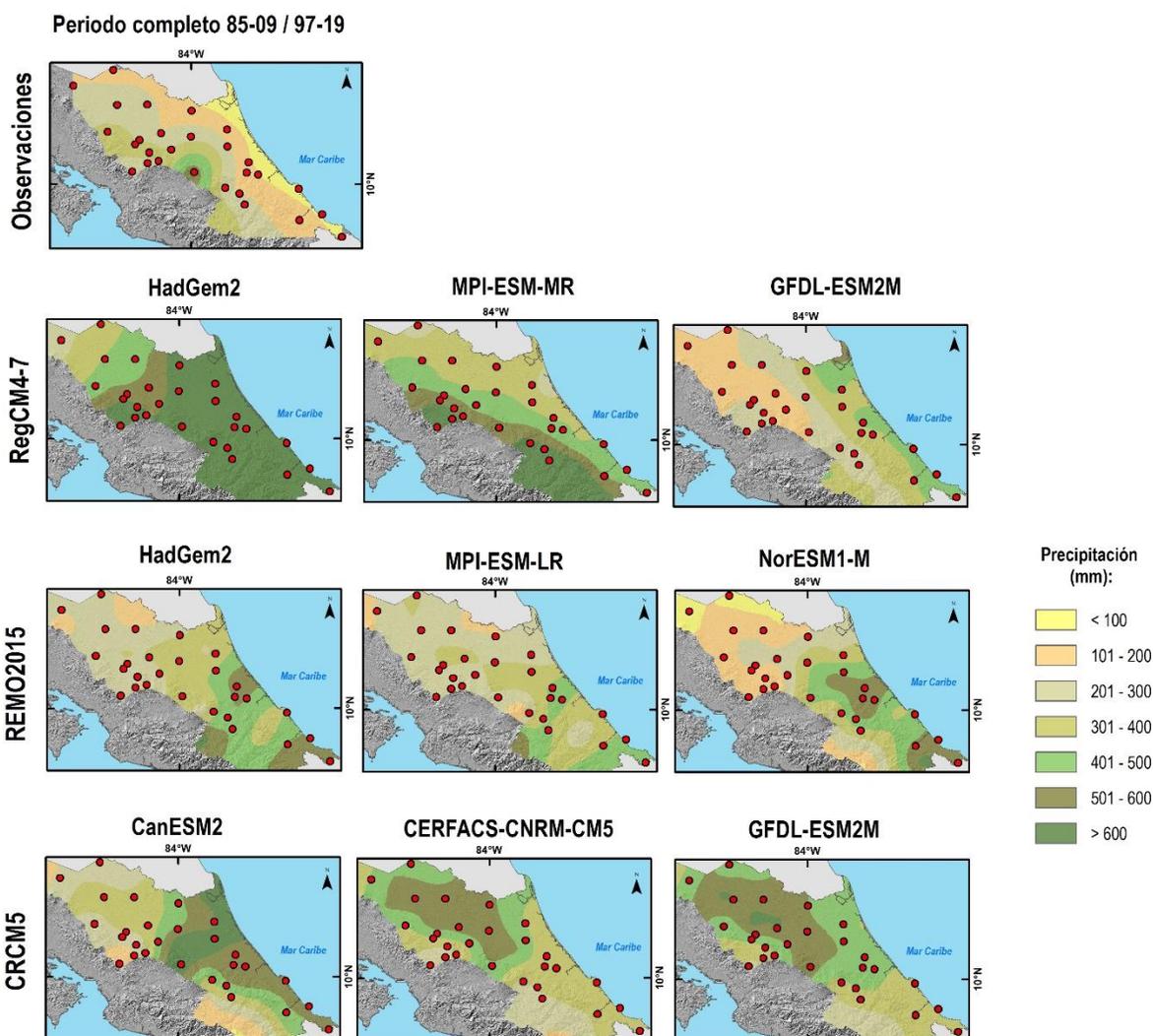


Figura 6.4. Bias porcentual (%) de la precipitación media de diciembre por RGM en la RTHC.

## Eventos extremos de precipitación

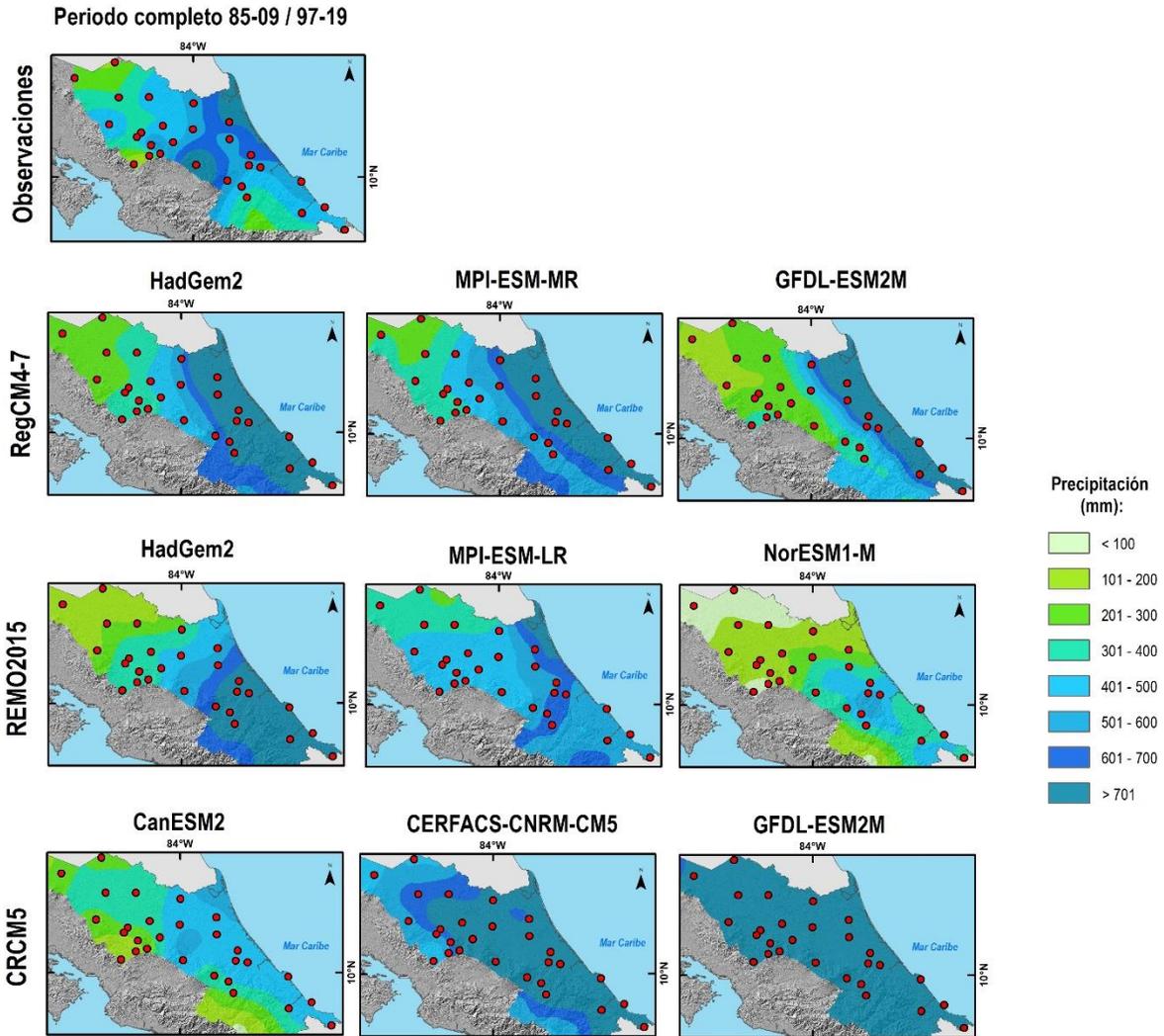
Las Figuras 6.5 y 6.6 muestran los valores del percentil 25 de la precipitación de septiembre y del percentil 75 de la precipitación de diciembre respectivamente. En el caso del percentil 25 para septiembre (Figura 6.5), puede observarse que el patrón espacial de los eventos extremos de precipitación es similar al observado en el valor medio, siendo el modelo RegCM4-7 forzado por el GFDL-ESM2M, el único que sigue un patrón espacial similar al de las observaciones (gradiente cordillera-costa). Sin embargo, al igual que para las precipitaciones medias, el modelo muestra valores inversos a los de las observaciones (mayores valores en la costa y menores en la cordillera). Todos los modelos sobrestiman los valores de lluvias, encontrando áreas con lluvias superiores a los 500mm, mientras que en las observaciones los máximos no superan este valor. Ningún modelo reproduce las lluvias menores a 100mm sobre la costa del Caribe, excepto el REMO2015 (NorESM1-M) en el noroeste. A partir de estos resultados, el REMO2015 es el RCM que en general muestra valores de precipitaciones más congruentes con los observado.

Para el percentil 75 en diciembre (Figura 6.6), es interesante observar que solo los modelos del RegCM4-7 siguen el mismo patrón espacial visto en el valor medio. Los modelos del REMO2015 y del CRCM5 cambian la distribución espacial, siendo más evidente en los GCMs del CRCM5 y sobre todo en el GFDL-ESM2M con lluvias por arriba de 700mm en toda la región. Al igual que en septiembre, en este mes el sesgo es más pronunciado que lo encontrado en el valor medio. El CRCM5 (CERFACS y GFDL) es el más distante respecto a las observaciones, tanto por su distribución espacial como por los valores de precipitación. Aunque llama la atención que el CRCM5 (CanESM2), resultó ser el más parecido a las observaciones, tanto en patrón espacial como en valores de lluvia, al igual que en el valor medio. Todos los demás modelos presentan el mínimo en el noroeste (entre 100-300mm) más cercanos a los mínimos observados (100-200mm). Ningún patrón reproduce espacialmente los máximos de las observaciones.



**Figura 6.5.** Percentil 25 de la precipitación de septiembre. La figura del panel superior (a la izquierda) representa el percentil 25 de la precipitación observada para el periodo 1985-2009/1997-2019 tomado en la validación.

La [Figura 6.7](#), muestra el bias del percentil 25 de la precipitación de septiembre. En general, los modelos sobrestimaron las precipitaciones, con algunas excepciones en el RegCM4-7 (GFDL) y el REMO2015. Además, el REMO2015 y el CRCM5 subestiman sobre la cordillera y sobrestiman hacia la costa. Las mayores sobrestimaciones (superiores a 300%) ocurren en la línea costera para todos los modelos. Al contrario, las subestimaciones (entre 0.1 y 75%) ocurren sobre la cordillera en 7 de 9 modelos. Los modelos del REMO2015 destacan porque presentan subestimaciones hacia el noroeste de la región con valores del 75% en el caso del NorESM1-M. El modelo que más subestima es el RegCM4-7 (GFDL) para la cordillera.



**Figura 6.6.** Percentil 75 de la precipitación de diciembre. La figura del panel superior (a la izquierda) representa el percentil 75 de la precipitación observada para el periodo 1985-2009/1997-2019 tomado en la validación.

En diciembre (Figura 6.8), hay un comportamiento más heterogéneo respecto a las subestimaciones y sobrestimaciones en los bias del percentil 75. Algunos muestran predominancia de subestimaciones en el noroeste y sobre la cordillera como los GCMs del REMO2015 y el CRCM5 (CanESM2), mientras que otros mayormente sobrestiman, como el CRCM5 (CERFACS y GFDL). Los GCMs del RegCM4-7 muestran más variación regional, con subestimaciones hacia el noroeste de la región, y sobrestimaciones hacia la costa y el sureste.

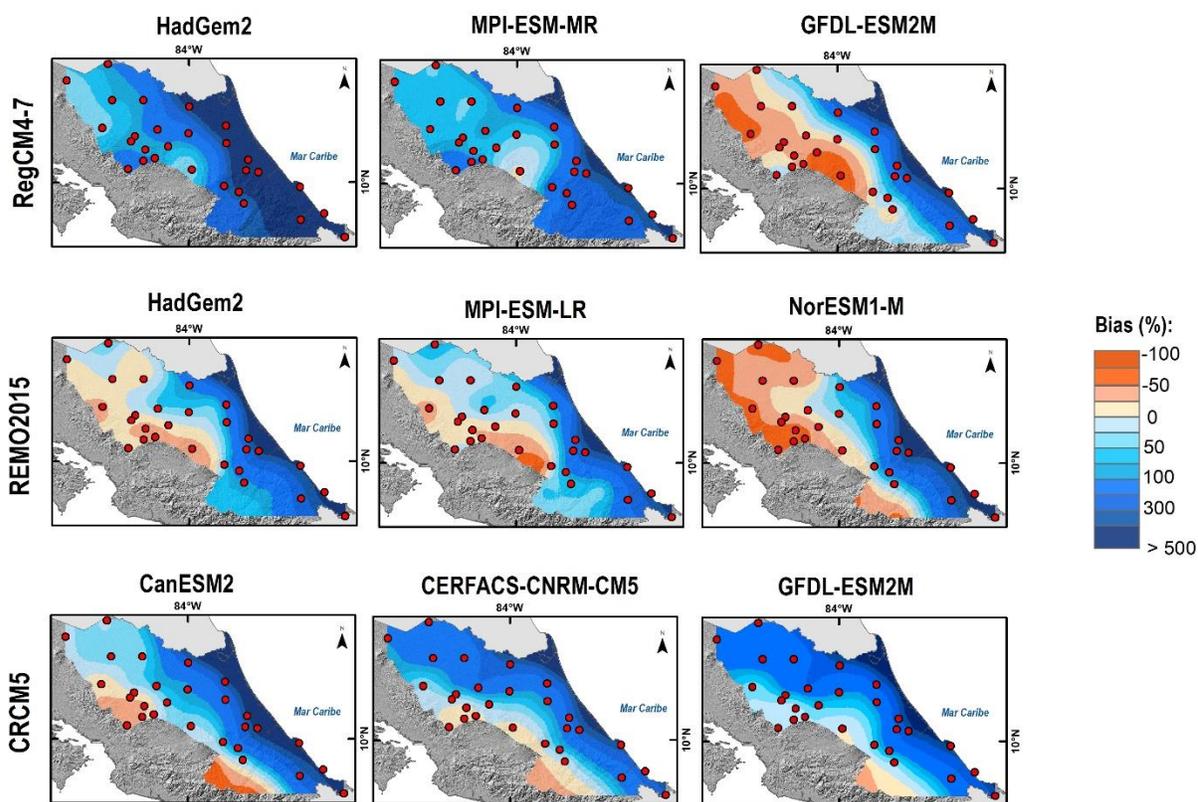


Figura 6.7. Bias porcentual (%) del percentil 25 de la precipitación de septiembre por RGM.

El modelo que más subestima es el REMO2015 (NorESM1-M), para casi toda la región (a excepción del sureste) con porcentajes por arriba del 100%. Al contrario, los que más sobrestiman (entre 25-200%) son los CRCM5 (CERFACS y GFDL). Otras sobrestimaciones altas (100%), se observan en el sureste del RegCM4-7 (HadGem2) y REMO2015 (HadGem2). El REMO2015 (MPI-ESM-LR) es el que presenta las menores (alrededor del cero) subestimaciones y sobrestimaciones para casi toda la región, con algunas excepciones sobre la cordillera.

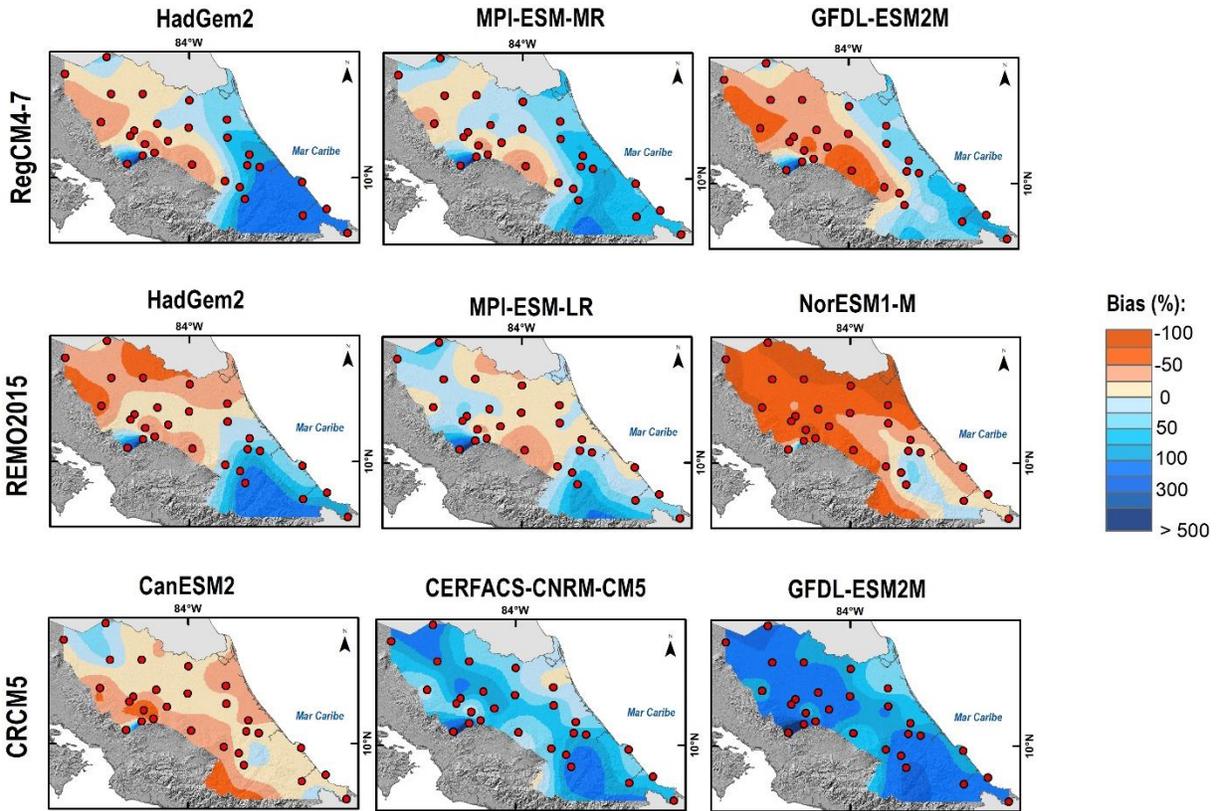


Figura 6.8. Bias porcentual (%) del percentil 75 de la precipitación de diciembre por RGM.

### 6.3.2. Proyecciones futuras de la precipitación mensual y eventos extremos según modelo

#### Precipitación mensual

A continuación se muestran la señal de cambio de la precipitación para septiembre y diciembre según los 2 horizontes de tiempo seleccionados (2040-2069 y 2070-2099). Las Figuras 6.9 y 6.10 corresponden a las proyecciones del primer y segundo periodo para septiembre, observándose que en general, la mayoría de los modelos proyectan aumentos de la precipitación media hacia el este-sureste (costa del Caribe-cordillera sureste).

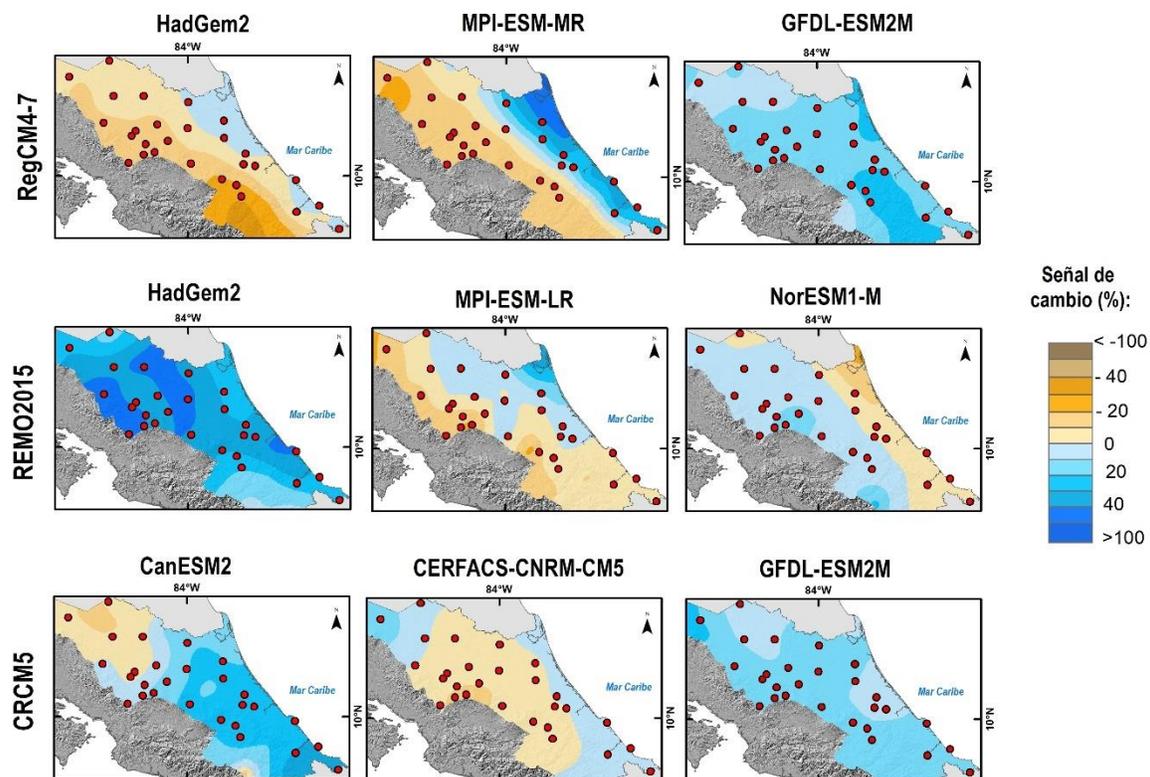


Figura 6.9. Señal de cambio (%) de la precipitación media de septiembre. Periodo 2040-2069.

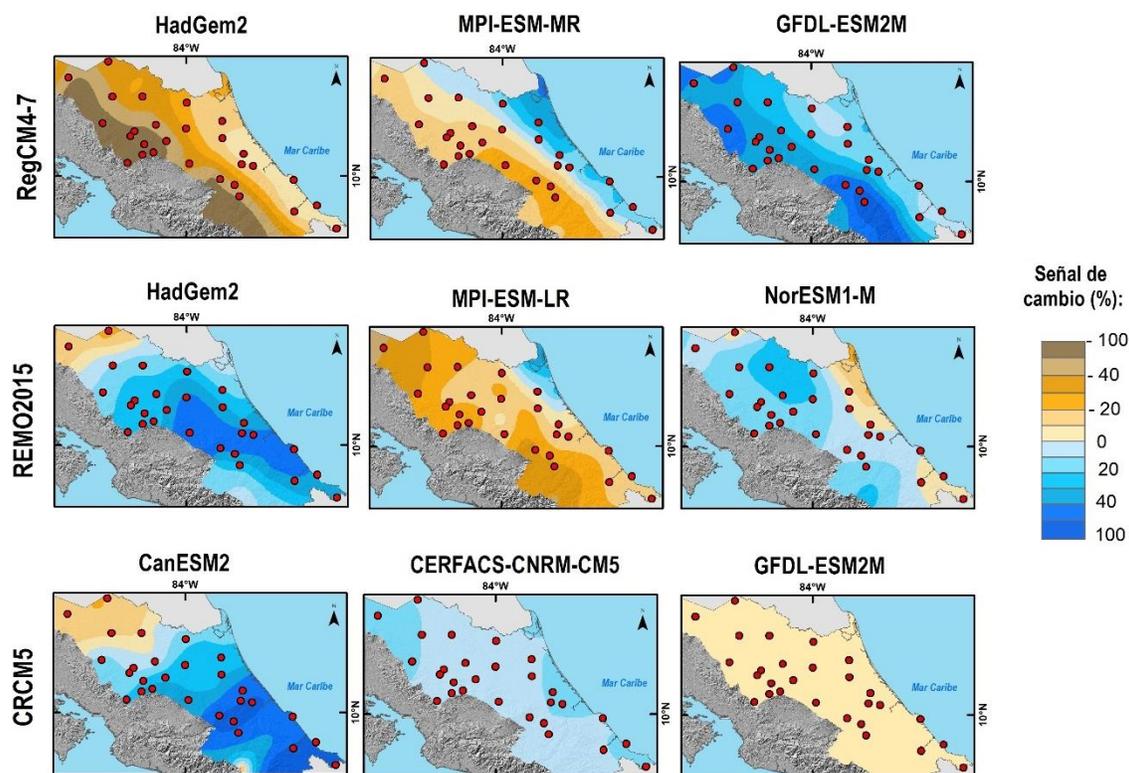


Figura 6.10. Señal de cambio (%) de la precipitación media de septiembre. Periodo 2070-2099.

Para el primer periodo en septiembre ([Figura 6.9](#)), no se observa un patrón homogéneo por RCM. Por ejemplo, para el RegCM4-7, los GCM HadGem2 y MPI-ESM-MR, proyectan disminuciones en casi toda la RTHC y aumentos para la línea costera. No obstante, el GFDL-ESM2M, proyecta aumentos para toda la región hasta del 30%. Para los otros de modelos regionales el comportamiento es dispar. Para el segundo periodo ([Figura 6.10](#)), se observa el mismo patrón de variabilidad intra e intermodelos, no observándose una señal clara de cambio regionalmente. Cuatro modelos proyectan mayoritariamente disminuciones y cinco lo hacen para aumentos. Sin embargo, la señal de cambio de algunos modelos como el RegCM4-7 (MPI-ESM-MR) presenta disminuciones sobre la cordillera y el REMO2015 (NorESM1-M) reducciones en la costa.

La comparación entre los 2 periodos para septiembre, muestra que en general, los aumentos o disminuciones se profundizan para el segundo horizonte con respecto al primero. Algunos modelos presentaron un cambio de signo entre un horizonte y otro, pero más cercanos a cero, por lo que los cambios en el aumento o disminución no son importantes. Para el futuro cercano, la región con mayor acuerdo entre modelos (“agreement”) es la costera, en la que la mayoría de los modelos proyectan aumentos en la precipitación. Sin embargo, este acuerdo se debilita en el segundo período. No obstante, anteriormente en la validación, se encontró que las precipitaciones se encuentran sobrestimadas para esta región.

En el caso de diciembre, la [Figura 6.11](#) muestra la señal de cambio para el futuro próximo, destacándose, en su mayoría, que los modelos proyectan aumentos en la precipitación media de este mes (6 modelos). En este caso, no hay un patrón claro de concordancia entre modelos, aunque 6 de ellos muestran reducciones en el noroeste de la RTHC y 7 de ellos aumentos hacia el norte y este, cercanos a la costa. Respecto al futuro lejano, la señal de aumentos prevalece en 4 modelos, las disminuciones en otros 4 y uno de ellos híbrido ([Figura 6.12](#)). Al comparar las proyecciones para ambos periodos, la disminución se profundiza en la mayoría de los modelos (5) en el segundo horizonte.

Tanto para septiembre como para diciembre, la mayoría de los modelos proyectan aumentos de la precipitación media, hacia el este-sureste. Además, se presenta una mayor variabilidad intermodelos hacia el oeste-noroeste para el periodo futuro próximo.

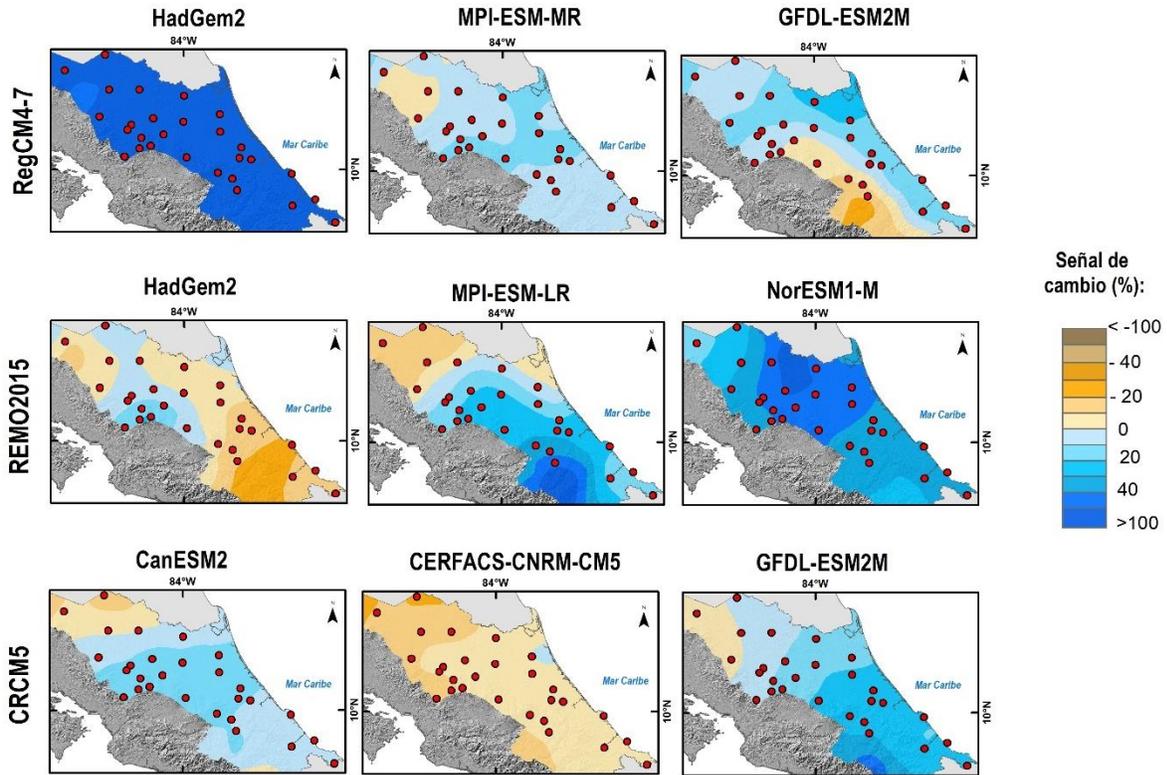


Figura 6.11. Señal de cambio (%) de la precipitación media de diciembre. Periodo 2040-2069.

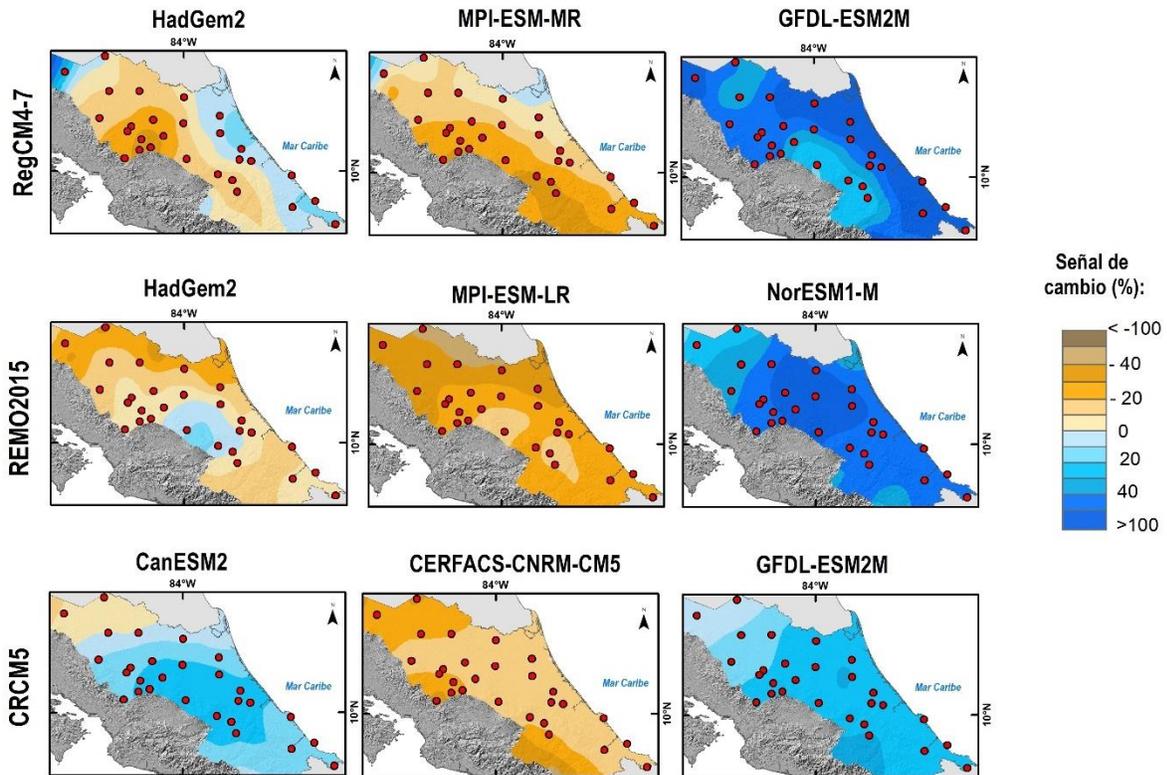


Figura 6.12. Señal de cambio (%) de la precipitación media de diciembre. Periodo 2070-2099.

## Eventos extremos de precipitación

En septiembre, los cambios en el futuro próximo del percentil 25 ([Figura 6.13](#)) son positivos en casi toda la región de estudio según 3 RCM, negativos para 2 RCM y heterogéneos espacialmente para el resto (4). Los modelos del RegCM4-7 muestran un comportamiento espacial similar al de las observaciones y en las proyecciones del valor medio. Respecto al REMO2015, las reducciones prevalecen para casi toda la RTHC en 2 de sus modelos y solo el HadGem2 muestra aumentos para toda la región, con máximos en la cordillera y en el noreste (100%). En el CRCM5, la señal es positiva en 2 de sus modelos, mientras que el CERFACS presenta una amplia región en el centro de la RTHC con patrones negativos (cerca de cero).

Para el futuro lejano, el percentil 25 de la precipitación de septiembre ([Figura 6.14](#)), resalta que 5 modelos muestran cambios positivos, 2 negativos y 2 híbridos. Entre los 2 periodos, la señal cambia de signo en 5 de los 9 RCM en el segundo horizonte respecto al primero. En los modelos del RegCM4-7 se sigue el mismo patrón espacial y se profundizan los aumentos o disminuciones. En el REMO2015, 2 de los modelos cambian de signo, y en el CRCM5 2 de los modelos profundizan sus aumentos.

En diciembre, los cambios futuros próximos para el percentil 75 de precipitación son negativos según la mayoría de los RCM ([Figura 6.15](#)). Puede observarse una concordancia en la señal en todos los modelos, donde en general, las mayores reducciones (20-100%) se dan en el noroeste y sureste. Solo los MPI-ESM-MR y LR muestran aumentos cercanos a la costa del caribe en rangos entre 20-100%. El NorESM1-M presenta aumentos en el noroeste. Respecto al futuro lejano ([Figura 6.16](#)), la señal negativa se profundiza en la mayoría de los modelos, y en otros sobresalen aumentos, principalmente hacia la costa del Caribe (4 modelos). Las disminuciones siguen siendo mayores hacia el noroeste y norte de la RTHC con porcentajes por encima del 100% en 2 modelos del REMO2015, en el CRCM5 (CERFACS) y en el RegCM4-7 (HadGem2) con reducciones superiores al 100% en toda la región.

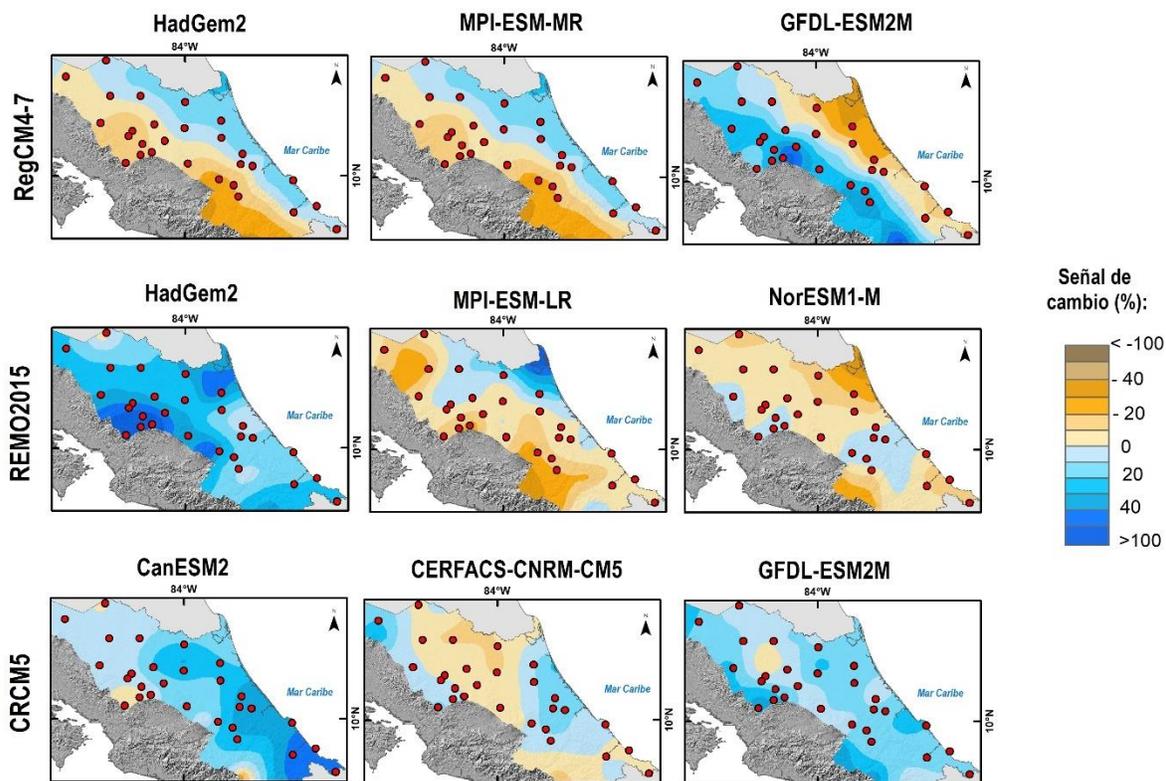


Figura 6.13. Señal de cambio, percentil 25 de la precipitación de septiembre. Periodo 2040-2069.

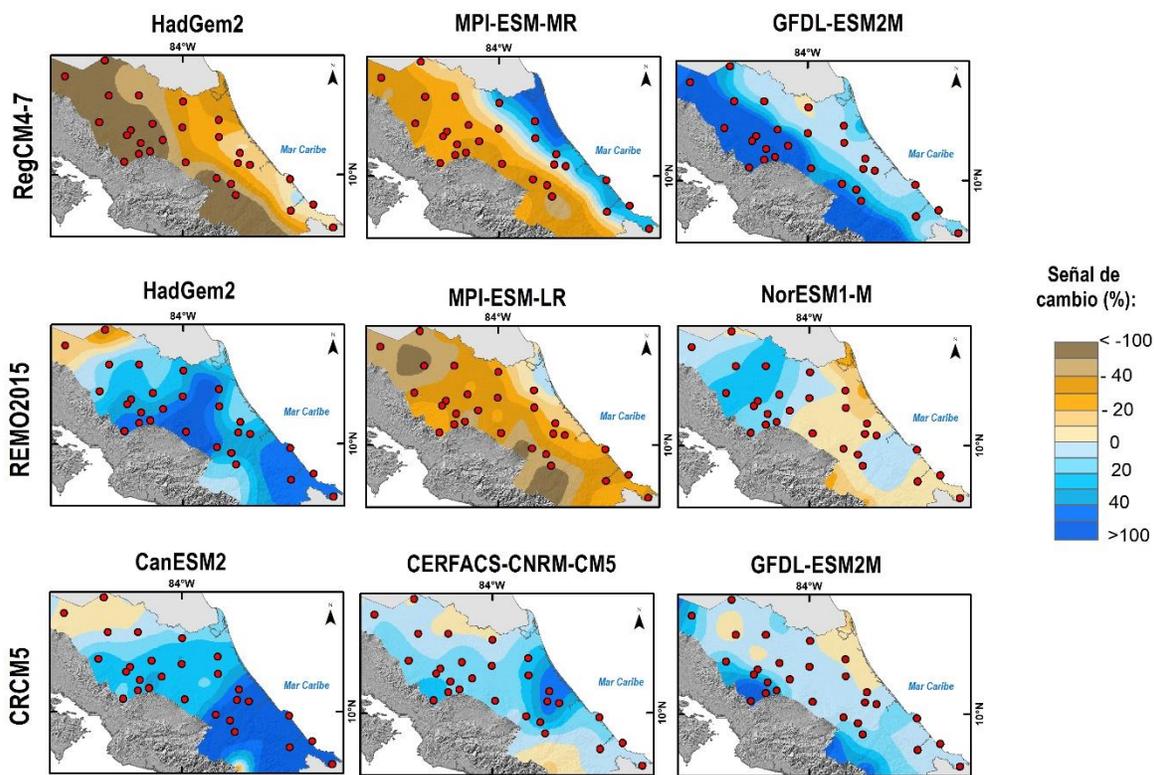


Figura 6.14. Señal de cambio, percentil 25 de la precipitación de septiembre. Periodo 2070-2099.

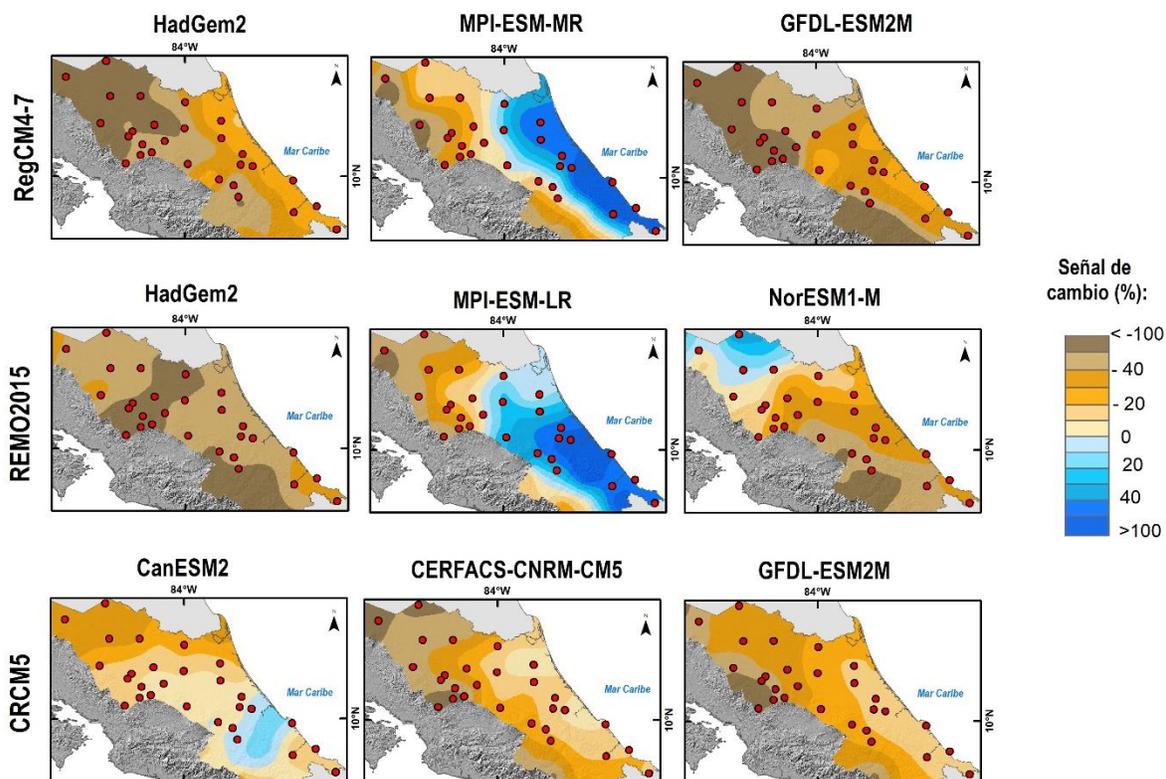


Figura 6.15. Señal de cambio, percentil 75 de la precipitación de diciembre. Periodo 2040-2069.

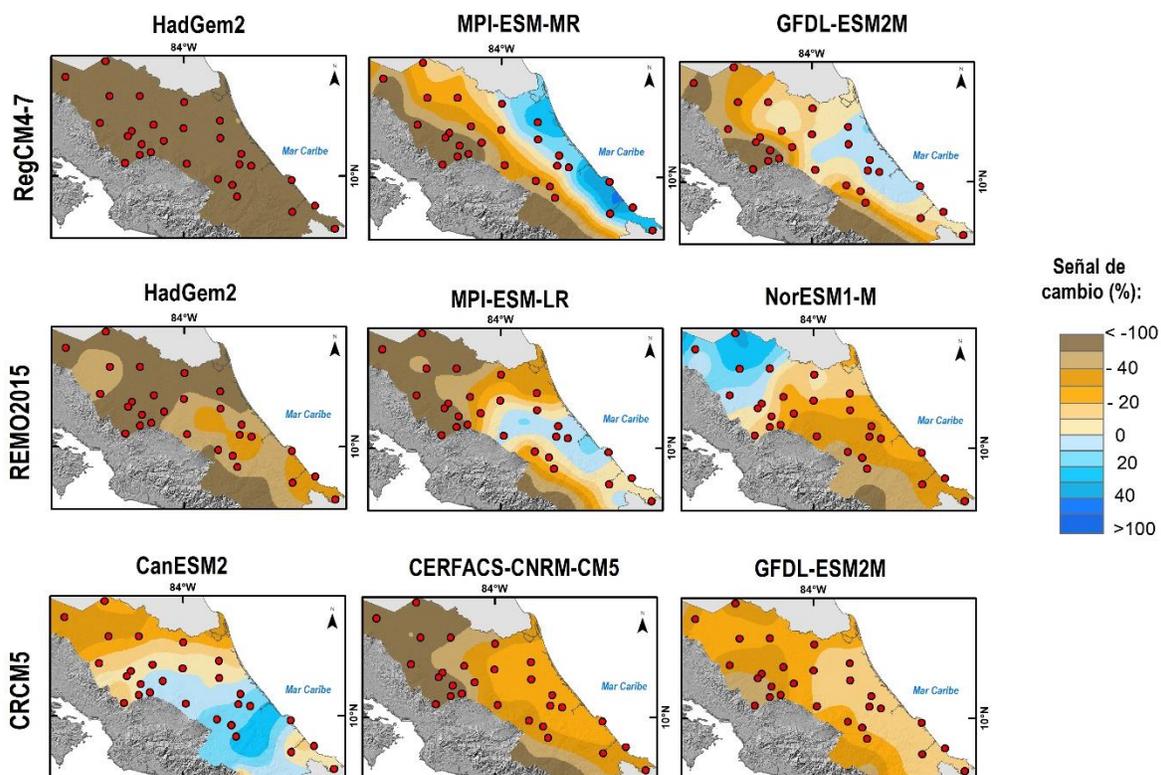


Figura 6.16. Señal de cambio, percentil 75 de la precipitación de diciembre. Periodo 2070-2099.

En la comparación entre horizontes, los eventos extremos de precipitación en diciembre, muestran una profundización del descenso en el segundo horizonte respecto al primero, aunque aparecen más modelos híbridos que los vistos en el futuro próximo, siendo 5 en total para el futuro lejano (de 3 encontrados en el futuro próximo).

#### 6.4. Discusión y conclusiones

El objetivo de este capítulo es analizar las proyecciones futuras de la precipitación mensual y los eventos extremos, sobre la RTHC, utilizando 3 RCM de CORDEX-CORE, considerando el período histórico (1985-2005) y las proyecciones futuras bajo el escenario RCP8.5 para el futuro cercano (2040-2069) y el futuro lejano (2070-2099). Esto permite tener un panorama futuro sobre el comportamiento de las lluvias en la región en un contexto de cambio climático, con la finalidad de aportar insumos para las políticas de adaptación, principalmente al sector agrícola, uno de los más vulnerables a estos cambios en la región de estudio.

Los meses seleccionados (septiembre y diciembre), son importantes porque presentaron tendencias altas y significativas, negativas (septiembre) y positivas (diciembre) (más detalles en el [Capítulo 3](#)). Además resultaron los meses con mayores probabilidades de eventos extremos en el periodo 1981-2019 según el análisis realizado en el [Capítulo 5](#), con mayores probabilidades de déficits (excesos) en septiembre (diciembre).

Los resultados de la validación de la precipitación en septiembre (diciembre) muestran, en general, una sobreestimación (subestimación) de las precipitaciones mensuales. Para septiembre, los bias mostraron que el RegCM4-7 es el que más sobrestima y el REM02015 es más sensible a captar subestimaciones. Para diciembre, ningún modelo reproduce el patrón espacial mostrado en las observaciones. En general todos los modelos presentan los máximos en el este y los mínimos en el oeste. Para diciembre, la mayoría de los modelos mostraron dificultad para reproducir las lluvias en el noroeste de la RTHC, ya que ahí se encuentran las mayores subestimaciones.

El comportamiento de sobrestimación es más homogéneo en septiembre para todos los modelos, mientras que en diciembre existe mayor variabilidad entre subestimación y sobrestimación. La precipitación de diciembre se representa mejor que la de septiembre.

En cuanto a los eventos extremos, en el percentil 25 (75) en septiembre (diciembre) se encuentran sesgos más pronunciados. Para septiembre (percentil 25), los bias en todos los modelos sobrestiman hacia el este y la costa, con valores superiores al 100%. En diciembre (percentil 75), ningún modelo reproduce el patrón espacial de las observaciones, aunque coinciden en los mínimos del noroeste y los máximos de la costa norte del Caribe. No obstante, en los bias se observa una variabilidad intra e intermodelo elevada, prevaleciendo las subestimaciones en 5 modelos.

Si bien los valores medios de la precipitación mensual y eventos extremos de los meses analizados presentan dificultad para ser reproducidos por los modelos, se destaca que para diciembre los bias son menores respecto a septiembre. Esto sugiere que es importante analizar cada mes por separado, de tal forma que no se generalicen resultados para todo el ciclo anual.

La RTHC es una región muy pequeña con particularidades que limitan la representación por parte de los modelos ([Nikulin et al. 2012](#); [Bukovsky et al. 2013](#); [Giorgi y Gutowski, 2015](#); [Fuentes-Franco et al. 2016](#)), como su ubicación en el istmo centroamericano y su topografía compleja, ya que limita al sur con el sistema montañosos central de Costa Rica y al este con el mar Caribe. Esto mismo lo refuerza [Zhao et al. \(2023\)](#), al indicar que la vertiente del Caribe (VC) de Centroamérica en general, es bastante compleja en términos de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación mensual y extrema. [Cabos et al. \(2019\)](#) encontraron que al forzar 2 RCMs (REMO y ROM) con Era-Interim, observaron una mejor habilidad para reproducir el clima de Centroamérica, resaltando que la VC es más difícil de modelar.

Los hallazgos más importantes en las proyecciones de la precipitación mensual, indican que para ambos meses la mayoría de los modelos proyectan aumentos de la precipitación media hacia el este-sureste, mientras que se presenta una mayor variabilidad intermodelos hacia el oeste-noroeste para el periodo futuro próximo. En septiembre, las proyecciones de la

precipitación mensual para el futuro cercano, indican en general aumentos (entre 20-50%) en todos los modelos, especialmente para la región costera y disminuciones (0.1-40%) en la cordillera. Para el futuro lejano, esos aumentos y disminuciones se profundizan, aunque prevalece una señal de aumentos en 5 modelos. En diciembre, para el primer horizonte prevalecen los aumentos, pero para el segundo la variabilidades intermodelos es más importante. A partir de este resultado, no hay una señal clara para indicar un comportamiento general para la región en cuanto a la precipitación para diciembre.

Las proyecciones para el percentil 25 (septiembre), muestran aumentos para la región costera y disminuciones sobre la cordillera para el primer horizonte, profundizándose en el segundo período. Tomando como base estas proyecciones de aumentos en la costa, podría decirse que es positivo para el cultivo de banano, que precisamente se ubica en esta área. En las proyecciones se vislumbran aumentos en esta región entre el 0.1 y 40% (mayor a 50%) para el futuro cercano (lejano).

Las proyecciones para el percentil 75 (diciembre), muestran disminuciones para casi toda la región en el primer horizonte, que se profundizan para el segundo. Las reducciones son mayores en la parte norte y noroeste de la RTHC. Evaluando el comportamiento en la región bananera, para el futuro próximo, 7 modelos proyectan reducciones en la región costera, y 5 modelos presentan reducciones para el futuro lejano. En este contexto, para el cultivo de banano que necesita máximos no mayores a los 500mm, podría decirse que las reducciones vistas en los modelos son beneficiosas para el cultivo.

La señal de cambio futuro es inferior al sesgo analizado durante la etapa de validación, lo que indica la elevada incertidumbre que entrañan las proyecciones. Es difícil indicar si las lluvias aumentan o disminuyen según las proyecciones para cada mes seleccionado, ya que existe poco acuerdo entre los resultados. Sin embargo, en septiembre, existen señales un poco más claras (de aumento) que las vistas en diciembre (híbrido). Esto es congruente con lo indicado por el AR6 del [IPCC \(2023\)](#) en su análisis para la región centroamericana. Si bien la literatura es limitada indican que los RCMs proyectan cambios inconsistentes en la región ([Imbach et al. 2018](#); [Kusunoki et al. 2019](#); [Coppola et al. 2021](#)), generando baja confianza en comparación con el pasado reciente (1995-2014) y la época preindustrial. Estos resultados

impiden una evaluación en cuanto al cambio observado en las precipitaciones intensas, y poco acuerdo con el tipo de cambio generado respecto a observaciones en sequías agrícolas y ecológicas. En este contexto, se evidencia que la falta de datos y de investigación en la RTHC, imposibilita la posibilidad de resultados más claros para las proyecciones de lluvias futuras.

En esta misma línea, [Hidalgo et al. \(2013\)](#), indicaron en su estudio sobre las proyecciones para Centroamérica, que se vislumbra una disminución de la precipitación para finales del siglo XXI (2077-2099). El estudio de [Imbach et al. \(2018\)](#) mostró que los eventos extremos de precipitación, en general muestran una tendencia decreciente en la parte norte de Centroamérica y creciente en la parte sur, en particular en Costa Rica y Panamá, para el período futuro. Además indicó que la disponibilidad de agua muestra tendencias negativas en toda la región, excepto en la VC de Costa Rica y occidente de Panamá. Por su parte, el Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (IMN) en las proyecciones regionalizadas para el país ([Alvarado, 2021](#)), destacó la dificultad que tienen los modelos para reproducir el ciclo anual.

Los RCMs de CORDEX-CORE utilizados, permitieron evidenciar la complejidad de modelar la precipitación en la región de estudio y la minuciosidad que debe tenerse al momento de hacer proyecciones para la región. Si bien, hay acuerdo en que estos modelos han mostrado mejoras en la representación de los patrones de circulación clave en la región, como la ITCZ y la reducción de los sesgos de precipitación tanto en tierra como en los océanos, y en las regiones costeras ([Sitz et al. 2017](#); [Cabos et al. 2019](#); [Cavazos et al. 2019](#); [Luna-Niño et al. 2021](#)), la incertidumbre para la RTHC sigue siendo alta. La mayoría de los trabajos realizados para la región que han utilizado los RCM de CORDEX, evalúan la sensibilidad de los modelos respecto a los patrones de circulación y mecanismos físicos en Centroamérica ([Diro et al. 2012](#); [Hidalgo et al. 2017](#); [Cavazos et al. 2019](#); [Luna-Niño et al. 2021](#); [Rivera et al. 2022](#)).

Los resultados obtenidos en este capítulo, utilizando los modelos de CORDEX-CORE para una región tan pequeña como la RTHC, permiten tener una visión del uso de estos modelos para la región y de posibles interacciones o mejoras a realizarse en futuros trabajos. Por lo tanto, se es consciente que los resultados obtenidos son apenas el punto de partida para nuevas investigaciones con mejoras en cuanto a las bases de datos y modelos utilizados.

# Capítulo 7

## Reflexiones Finales y trabajo futuro

### 7.1. Reflexiones finales

La motivación para el desarrollo de este trabajo de tesis surgió a partir de la necesidad de aportar información climática actualizada de la variabilidad de la precipitación en la región tropical húmeda del Caribe de Costa Rica (RTHC), llenando el vacío de estudios en esta región de Costa Rica y de Centroamérica en general. La hipótesis de este trabajo se fundamentó bajo el contexto de que el comportamiento espacial y temporal de los eventos extremos de precipitación es mayor que el de los valores medios, por lo que un conocimiento detallado de su variabilidad permitirá evaluar mejor los mecanismos físicos (locales y remotos) y tomar decisiones con miras a la adaptación a los cambios futuros de la precipitación, lo cual es un elemento central para la política económica de la región.

A partir de lo expuesto, los objetivos en los cuales se enmarca esta tesis se centran en mejorar el conocimiento de la variabilidad espacio-temporal de la precipitación y los mecanismos físicos responsables, con énfasis en los eventos extremos, en la RTHC de Costa Rica. A su vez, se caracterizan espacialmente los impactos de estos eventos en el sector agrícola de la región, haciendo foco en las plantaciones de banano, y finalmente se analizan proyecciones futuras de la precipitación mensual y eventos extremos para 2 horizontes de tiempo: futuro próximo (2040-2069) y futuro lejano (2070-2099). Este análisis se llevó a cabo con series de alta calidad de 28 estaciones en 2 periodos 1985-2009 y 1997-2019. Esta base de datos permitió construir el contexto de la distribución espacial y variabilidad temporal de la precipitación y los eventos extremos en la RTHC. Posteriormente, el análisis se centró en la forma en que los océanos modulan la variabilidad de la precipitación en la

RTHC, analizando las variabilidades de los océanos Pacífico (ENSO), Atlántico (NAO) e Índico (IOD).

Lo anterior, lleva a poner de manifiesto la importancia de lo realizado en la tesis y su aporte original al conocimiento, basado principalmente en que se logró estudiar una región con escasa información, donde los estudios previos existentes para la RTHC sobre variabilidad y cambio climático han sido pocos. Además se destaca el nivel de detalle presentado, por ejemplo, se contó con una base de datos de estaciones meteorológicas cuidadosamente revisada y sometida a un riguroso control de calidad para encontrar periodos en común y se mantuvieron las series más largas o con datos históricos para algunos análisis específicos. Por otro lado, se analizó la variabilidad espacial y temporal de manera mensual y estacional, presentando resultados inéditos sobre el comportamiento de la precipitación mes a mes, sobre la regionalización encontrada y relacionando estos aspectos con una actividad socioeconómica muy dinámica en la RTHC como es el sector bananero, a través de metodologías que permitieron identificar periodos y umbrales críticos para este cultivo, las cuales podrían replicarse y adaptarse a otros cultivos tanto en el país como en Centroamérica.

La RTHC se caracteriza por una producción agrícola importante, principalmente de banano (primer producto agrícola de exportación). Esta actividad es vulnerable a los cambios en el clima. Por lo tanto, resultó importante caracterizar espacialmente el impacto de los eventos extremos de precipitación (déficits y excesos) en las plantaciones de banano. De este modo, este trabajo contribuye a mejorar el conocimiento de la precipitación (mensual, estacional y extrema) en la RTHC de Costa Rica. Además, dicho análisis podría representar un insumo para la planificación agrícola de la región, en particular de las plantaciones de banano, a través del desarrollo de planes de seguimiento, prevención y alerta temprana para amortiguar los impactos de los eventos extremos de precipitación.

Sabiendo que los efectos del cambio climático tendrán sus impactos en los eventos extremos de precipitación, modificando sus características regionales de frecuencia e intensidad, entre otros parámetros. Estos cambios podrían presentar dificultades para el planeamiento y el

manejo agrícola. Con lo cual, es necesario un análisis de los posibles cambios en la precipitación a fin de determinar sus posibles impactos futuros.

A su vez, este es un trabajo inédito en la región, que avanza en el uso de modelos climáticos regionales (RCM) en Centroamérica, un dominio que presenta dificultades en la modelación de su clima, debido a lo reducido de su territorio, a la compleja topografía del istmo centroamericano y a la influencia del océano Pacífico y del mar Caribe. Sin embargo, el esfuerzo realizado en esta investigación, permitió sugerir que es importante analizar las modelaciones y validaciones para cada mes por separado, de tal forma que no se generalicen resultados para todo el ciclo anual. Esto permite evaluar mejor los cambios climáticos sobre la RTHC en un escenario de calentamiento global, y cómo podría afectar a sectores clave como el agrícola y el comercial (exportación).

Es así como el análisis realizado en el [Capítulo 3](#), mostró que, aunque la precipitación total anual presenta una tendencia positiva, la tendencia de las contribuciones de las estaciones junio-agosto (JJA) y septiembre-octubre (SO) a la tendencia anual, es negativa y significativa en la mayoría de las estaciones (principalmente en SO). En consecuencia, hay 5 meses consecutivos (junio a octubre) en los que la contribución de las lluvias al ciclo anual es decreciente. Estos resultados implican una alerta para la producción de banano, principalmente en SO, ya que las precipitaciones durante estos 2 meses se sitúan entre 200 y 300mm en toda la costa Caribe (área de plantaciones bananeras). Y aún más, la tendencia para SO es negativa y significativa y la tendencia de la contribución porcentual de la precipitación de SO al ciclo anual es también negativa y significativa en toda la RTHC. Estos resultados, resaltan la necesidad del monitoreo climático para los cultivos de banano en Costa Rica, principalmente a partir de septiembre y continuando hasta abril-mayo del año siguiente. Los meses más críticos son SO por posible déficit hídrico y el trimestre de diciembre a febrero (DEF) por exceso hídrico.

Enlazando lo anterior con lo encontrado en el [Capítulo 4](#), se destaca que El Niño Oscilación del Sur (ENSO) es el principal forzante que influye en las precipitaciones de la RTHC, pero posee una variabilidad diversa en el ciclo anual de la lluvia según la fase. Por lo tanto, aunque

se suelen asociar los eventos positivos del ENSO (El Niño) con aumentos en la precipitación en la RTHC y su inversa para los eventos negativos (La Niña), se logró comprender que esto se observa solo para algunos meses. En términos medios, las precipitaciones son más abundantes para los años El Niño entre mayo-agosto, y octubre-noviembre. Para los años La Niña se observaron precipitaciones más abundantes en diciembre y en el trimestre de febrero a abril. En el contexto de la producción bananera de la región, tomando en cuenta que el trimestre DEF acumula aproximadamente entre el 30-35% del total de precipitación anual, es relevante su relación con las lluvias durante El Niño, porque en este trimestre resultan menores que cuando ocurre La Niña o años neutros.

Basado en lo anterior, los resultados del [Capítulo 5](#) mostraron que si bien la región cumple con los requerimientos hídricos del banano, muestra altas probabilidades de déficits y excesos en distintos periodos del año, resaltando que septiembre, presentó las mayores probabilidad de lluvias por debajo del umbral crítico para el cultivo (200mm), y noviembre-diciembre presentó las mayores probabilidades de lluvias por arriba del umbral (500mm), lo cual podría ser perjudicial para el cultivo. En septiembre, la región sur es más propensa a las lluvias por debajo del umbral, mientras que en noviembre, las probabilidades más altas de sobrepasarlo se dan en el norte. En diciembre, las mayores probabilidades de lluvias por arriba (debajo) de 500mm (200mm) se dieron en el norte (sur) de la región bananera (RB). La influencia del ENSO en la RB también recalca el comportamiento inverso entre el área norte y sur. Estas distinciones fueron más importantes cuando se presentó La Niña, encontrando que el área norte muestra mayores probabilidades de exceso.

De este modo, en hilo con lo anterior, los análisis de las proyecciones realizados en el [Capítulo 6](#), se enfocaron en los meses de septiembre y diciembre, ya que presentaron tendencias altas y significativas, negativas (septiembre) y positivas (diciembre) ([Capítulo 3](#)). Además resultaron los meses con mayores probabilidades de eventos extremos de déficits (septiembre) y de excesos (diciembre) en el periodo 1981-2019 ([Capítulo 5](#)). Es difícil indicar si las lluvias aumentan o disminuyen según las proyecciones para cada mes seleccionado, ya que existe poco acuerdo entre los resultados. Sin embargo, en septiembre, existen señales un poco más claras (de aumento) que las vistas en diciembre (híbrido).

Respecto a su importancia para los cultivos, los resultados encontrados en las proyecciones para el percentil 25 en septiembre, se vislumbran como positivos para el cultivo, con aumentos entre el 0.1 y 40% (mayor a 50%) para el futuro cercano (lejano). En las proyecciones para el percentil 75 en diciembre, aunque la señal de cambio fue menos clara, evaluando el comportamiento en la RB, 7 (5) modelos proyectaron reducciones en la región costera para el futuro próximo (lejano). Sabiendo que el cultivo de banano necesita máximos no mayores a los 500mm, podría decirse que las reducciones vistas en los modelos para diciembre también son beneficiosas para el cultivo.

En este contexto, un estudio realizado por la cooperación alemana (GIZ) en el 2021 ([Noleppa et al. 2021](#)), determinó que las plantaciones de banano en Costa Rica, podrían verse afectadas negativamente con la ocurrencia de eventos extremos y el cambio climático, ocasionando reducciones en los rendimientos cosechables de la producción, lo que repercutiría en las exportaciones y en la economía del país. Sumado a lo anterior, [Varma y Bebbber \(2019\)](#) anticipan una disminución del rendimiento en la producción de banano en Costa Rica impulsada por el clima hasta de un 3% para el año 2050. Esto equivale a una disminución de poco más del 0.3% en una década, o alrededor del 0.03% por año ([Noleppa et al. 2021](#)). Por lo tanto, siendo el cultivo de banano tan sensible a las condiciones hídricas, conviene que el sector bananero del país tome medidas de adaptación y de resguardo para la producción agrícola. En esta línea, [Varma y Bebbber \(2019\)](#) en su evaluación del riesgo climático futuro de países productores de banano-para 2050, clasifican el sector bananero de Costa Rica con un riesgo "adaptable", es decir, podría sufrir en el futuro un descenso de los rendimientos, pero la mitigación podría ser posible dadas las tendencias tecnológicas positivas del pasado. Esto resalta que la preparación del sector ante la variabilidad climática y los eventos extremos es vital. Es en este panorama donde el uso de modelos climáticos para la generación de proyecciones, cobra relevancia, con el fin de reducir impactos negativos.

No obstante, es necesario realizar otras investigaciones, para evaluar si los modelos climáticos regionales o globales más actualizados, como los del CMIP6 (que no fueron utilizados en esta investigación), pueden generar escenarios plausibles de cambio climático, y reducir la incertidumbre entre modelos para aplicarlos posteriormente en estudios de

impacto. Por ejemplo, en términos del análisis realizado en este trabajo de tesis, se encontró, que es difícil indicar si las lluvias aumentan o disminuyen según las proyecciones para cada mes seleccionado (septiembre y diciembre), ya que existe poco acuerdo entre los resultados. Esto es congruente con lo indicado por el [IPCC \(2023\)](#) en su análisis para la región centroamericana, indicando que en lo que se refiere a la precipitación, hay datos y literatura limitada, y que los RCMs proyectan cambios inconsistentes, por lo tanto, se evidencia que la falta de datos y de investigación en la RTHC, limita la posibilidad de resultados más claros en cuanto a las proyecciones futuras de precipitación. Dado lo anterior, se es consciente que los resultados obtenidos son apenas el punto de partida para nuevas investigaciones con mejoras en cuanto a las bases de datos y modelos utilizados.

## 7.2. Trabajo futuro

Los resultados encontrados en este trabajo de tesis dejaron líneas de trabajo abiertas para continuar explorando en el futuro. En relación con los mecanismos físicos, queda pendiente explorar con mayor detalle los forzantes analizados (NAO e IOD), con la finalidad de desagregar sus fases, por ejemplo, a través de la metodología de composites (como lo realizado para el ENSO en el [Capítulo 4](#)). Por otro lado, sería de gran valor para el análisis de la variabilidad de la precipitación en la RTHC, relacionarla con otros forzantes, ya que, por ejemplo, algunos estudios han indicado que las SSTs del Atlántico, podrían tener mayor influencia en las lluvias del Caribe que las del Pacífico.

Otro desafío para el futuro, es la realización de estudios más detallados y específicos de los cambios en los regímenes pluviométricos, utilizando umbrales fijos para periodos críticos de otros cultivos que ayuden a planificar y optimizar la producción (como lo realizado para el banano en el [Capítulo 5](#)). Estas investigaciones son importantes como aporte a la toma de decisiones en el sector agroexportador de la RTHC, con el fin de minimizar los efectos negativos de los fenómenos pluviométricos extremos. De esta forma, la metodología utilizada en esta investigación, podría replicarse en otros cultivos y regiones del país.

Respecto a los modelos climáticos regionales y las proyecciones generadas, queda pendiente el análisis de otros meses del año, y a escala estacional, para evaluar qué modelos muestran mayores o menores sesgos (como lo realizado para septiembre y diciembre en el [Capítulo 6](#)). Este estudio permitirá realizar un diagnóstico de los modelos de CORDEX-CORE para la RTHC a nivel mensual y estacional, para luego analizar las proyecciones en distintos horizontes temporales. Además, es importante evaluar otros RCMs anidados por GCMs del CMIP6, de este modo, podría visualizarse si existe una mejora en la modelación para la región, sin embargo, aún los modelos del CMIP6 no se encuentran evaluados para Centroamérica.

Además, otra forma de mejorar los resultados obtenidos con el uso de los modelos, es la realización de técnicas de downscaling que consigan capturar mejor la variabilidad de la precipitación. También seleccionar algún método de corrección de sesgos, utilizando un ensamble de modelos. Estas actividades futuras podrían ayudar a avanzar en mejorar el conocimiento y los resultados sobre proyecciones futuras de precipitación en esta región, con la finalidad de reducir la incertidumbre o de dar un mayor acercamiento al posible comportamiento futuro de variables como la lluvia y su impacto en el sector agrícola.

## Bibliografía

- Accadia C., Mariani S., Casaioli M., Lavagnini A. y Speranza A. 2003. Sensitivity of Precipitation Forecast Skill Scores to Bilinear Interpolation and a Simple Nearest-Neighbor Average Method on High-Resolution Verification Grids. *Weather and Forecasting*, **18** (5), 918-932, doi:10.1175/1520-0434(2003)018<0918:SOPFSS>2.0.CO;2.
- Addison, P. S. 2005. Wavelet transforms and the ECG: a review. *Physiological Measurement*, **26** (5), 155-199, doi:10.1088/0967-3334/26/5/R01.
- Adhikari, U., Nejadhashemi, A. P., y Woznicki, S. A. 2015. Climate change and eastern Africa: a review of impact on major crops. *Food and Energy Security*, **4**, 110-132, doi:10.1002/fes3.61.
- Aditya, F., Gusmayanti, E., y Sudrajat, J. 2021. Rainfall trend analysis using Mann-Kendall and Sen's slope estimator test in West Kalimantan. *Earth Environmental Sciences*, **893**, 012006, doi:10.1088/1755-1315/893/1/012006.
- Aguilar, E., Peterson, T.C., Ramírez Obando, P., Frutos, R., Retana, J. A., Solera, M., Soley, J., González García, I., Araujo, R. M., Rosa Santos, A., Valle, V. E., Brunet, M., Aguilar, L., et al., . 2005. Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961-2003. *Journal of Geophysical Research*, **110**, D23107, doi:10.1029/2005JD006119.
- Alfaro, E. J, Cid-Serrano, L., y Enfield, D. 1998. Relaciones Entre el Inicio y el Término de la Estación Lluviosa en Centroamérica y los Océanos Pacífico y Atlántico Tropical. *Investigaciones Marinas*, **26**, 59-69.
- Alfaro, E.J. 2000. Eventos cálidos y fríos en el Atlántico tropical norte, *Atmosphere*, **13**, 109-119.
- Alfaro, E. J. 2002. Some characteristics of the annual precipitation cycle in Central America and their relationship with its surrounding tropical oceans. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, **9**, 88-103.
- Alfaro, E. J y Pérez-Briceño, P. M. 2014. Análisis del impacto de fenómenos meteorológicos en Costa Rica, América Central, originados en los mares circundantes. *Revista de Climatología*, **14**, 1-11.
- Alfaro, E. J., e Hidalgo, H. 2021. Inicio de la temporada de lluvias en América Central. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, **20** (1), 16-28.
- Alfaro-Córdoba, M., Hidalgo, H. G., y Alfaro, E. J. 2020. Aridity Trends in Central America: A Spatial Correlation Analysis. *Atmosphere*, **11**, 427, doi:10.3390/atmos11040427.
- Alfaro, E. J., Alvarado, L. F., Fallas, B. G., Mora, N. P., e Hidalgo, H. G. 2024. Caracterización climática y análisis de mecanismos moduladores del descenso de las lluvias en la vertiente Caribe de América

- Central durante septiembre-octubre. *Revista de Ciencias Ambientales*, **58** (1), 1-24, doi:10.15359/rca.58-1.4.
- Ali, R., Kuriqi, A., Abubaker, S., y Kisi, O. 2019. Long-Term Trends and Seasonality Detection of the Observed Flow in Yangtze River Using Mann-Kendall and Sen's Innovative Trend Method. *Water*, **11** (9), 1855, doi:10.3390/w11091855.
- Almazroui, M., Islam, M. N., Saeed, F. et al. 2021. Projected Changes in Temperature and Precipitation Over the United States, Central America, and the Caribbean in CMIP6 GCMs. *Earth Syst Environ*, **5**, 1-24, doi:10.1007/s41748-021-00199-5.
- AlMutairi, B.S., Grossmann, I., y Small, M.J. 2019. Climate model projections for future seasonal rainfall cycle statistics in Northwest Costa Rica. *International Journal of Climatology*, **39**, 2933-2946, doi:10.1002/joc.5993.
- Alvarado, L. F., y Fernández, W. 2001. Relación de las anomalías climáticas de la atmósfera libre sobre Costa Rica y la variabilidad de las precipitaciones durante eventos de El Niño. *Tópicos meteorológicos y oceanográficos*, **8** (2), 145-157.
- Alvarado, L.F. 2021. *Proyecciones de Cambio Climático regionalizadas para Costa Rica* (Escenarios RCP-2.6 y RCP-8.5). San José, Costa Rica: IMN-PNUD.
- Amador, J. A. 1998. A climate feature of the tropical Americas: the trade wind easterly jet. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, **5** (2), 91-102.
- Amador, J. A., Alfaro, E. J., Lizano, O. G., y Magaña, V. O. 2006. Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, **69**, 101-142, doi:10.1016/j.pocean.2006.03.007.
- Amador, J. A. 2008. The intra-Americas Sea low-level jet: Overview and future research. *Annals of the New York Academy of Sciences*, **1146** (1), 153-188, doi:10.1196/annals.1446.012.
- Amador, J. y Alfaro, E. J. 2009. Métodos de reducción de escala: Aplicaciones al clima, variabilidad y cambio climático. *Revista REVIBEC*, **11**, 39-52.
- Amador, J.A., Alfaro, E.J., Hidalgo, H.G., Soley, F.J., Solano, F., Vargas, J.L., Sáenz, F., Calderón, B., et al. 2013. Clima, variabilidad y cambio climático en la Vertiente Caribe de Costa Rica: Un estudio básico para la actividad bananera. *CIGEFI, Universidad de Costa Rica y CORBANA*, San José, Costa Rica. <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/11121>
- Amador, J. A., Rivera, E. R., Durán-Quesada, A. M., Mora, G., Sáenz, F., Calderón, B., y Mora, N. 2016. The Eastern most tropical Pacific. Part I: a climate review. *Revista de Biología Tropical*, **64**, 1-22, doi:10.15517/rbt.v64i1.23407.

- Anctil, F., y Coulibaly, P. 2004. Wavelet analysis of the interannual variability in Southern Québec streamflow. *Journal of Climate*, **17**, 163-173, doi:10.1175/1520-0442(2004)017<0163:WAOTIV>2.0.CO;2.
- Ashby, S. A.; Taylor, M. A.; y Chen, A. A. 2005. Statistical models for predicting rainfall in the Caribbean. *Theoretical and Applied Climatology*, **82**, 65–80, doi:10.1007/s00704-004-0118-8.
- Barnston, A. G., y Livezey, R. E. 1987. Classification, seasonality, and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review*, **115**, 1083-1126, doi:10.1175/1520-0493(1987)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2.
- Barnston, A.G., Chelliah, M., y Goldenberg, S.B. 1997. Documentation of a highly ENSO-related SST region in the equatorial Pacific. *Atmosphere-Ocean*, **35 (3)**, 367–383, doi:10.1080/07055900.1997.9649597.
- Baumbach, L., Warren, D. L., Yousefpour, R., y Hanewinkel, M. 2021. Climate change may induce connectivity loss and mountaintop extinction in Central American forests. *Communications Biology*, **4**, 869, doi:10.1038/s42003-021-02359-9.
- Beck, S., y Mahony, M. 2018. The IPCC and the new map of science and politics. *WIREs Climate Change*, **9 (6)**, e547, doi:10.1002/wcc.547.
- Betzold, C., y Weiler, F. 2017. Allocation of aid for adaptation to climate change: do vulnerable countries receive more support? *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, **17**, 17–36, doi:10.1007/s10784-016-9343-8.
- Birkel, C., y Demuth, S. 2006. Drought in Costa Rica: temporal and spatial behaviour, trends, and the relationship to atmospheric circulation patterns. In: S. Demuth; A. Gustard; E. Planos; F. Scatena y E. Servat (Eds). *Climate Variability and Change-Hydrological Impacts*. Netherlands, IAHS press, 338-343. ISBN 978-1901502787.
- Bolaños, E. 2010. Efecto de las inundaciones en las plantaciones bananeras de la vertiente del Caribe de Costa Rica. *CORBANA*, **12 (62)**, 35-36.
- Bolaños, E. 2019. Efecto de las inundaciones en las plantaciones bananeras del Caribe de Costa Rica. *CORBANA*, **45 (65)**, 131-140.
- Bouroncle, C., Imbach, P., Läderach, P., Rodríguez, B., Medellín, C., Fung, E., Martínez-Rodríguez, M. R, y Donatti, C. I. 2015. *La agricultura de Costa Rica y el cambio climático: ¿Dónde están las prioridades para la adaptación?* CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS). Copenhagen, Dinamarca. <https://hdl.handle.net/10568/45941>
- Briggs, I. C. 1974. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, **39**, 39–48, doi:10.1190/1.1440410.

- Bukovsky, M. S., Gochis, D. J. y Mearns, L. O. 2013. Towards assessing NARCCAP regional climate model credibility for the North American monsoon: current climate simulations. *Journal of Climate*, **26**, 8802–8826, doi:10.1175/JCLI-D-12-00538.1.
- Cabos, W., Sein, D. V., Durán-Quesada, A. M. et al. 2019. Dynamical downscaling of historical climate over CORDEX Central America domain with a regionally coupled atmosphere–ocean model. *Climate Dynamics*, **52**, 4305–4328, doi:10.1007/s00382-018-4381-2.
- Calberto, G., Staver, C., y Siles, P. 2015. An assessment of global banana production and suitability under climate change scenarios. In: A. Elbehri (Ed). *Climate Change and Food Systems: Global Assessments and Implications for Food Security and Trade*. FAO, Rome, Italy, 266–291.
- Camargo, S. J., Emanuel, K. A., y Sobel, A. H. 2007. Use of a Genesis Potential Index to Diagnose ENSO Effects on Tropical Cyclone Genesis. *Journal of Climate*, **20**, 4819–4834, doi:10.1175/JCLI4282.1.
- Camilloni, I., y Barros, V. 2020. *La Argentina y el cambio climático: de la física a la política*. Eudeba. Buenos Aires, Argentina. ISBN 9789502330976.
- Castillo, R., Montero, R., Amador, J., y Durán, A. M. 2018. Cambios futuros de precipitación y temperatura sobre América Central y el Caribe utilizando proyecciones climáticas de reducción de escala estadística. *Revista de climatología*, **18**, 1-12.
- Cavazos, T., Luna-Niño, R., Cerezo-Mota, R., Fuentes-Franco, R., Méndez, M., Pineda Martínez, L.F., y Valenzuela, E. 2019. Climatic trends and regional climate models intercomparison over the CORDEX-CAM (Central America, Caribbean, and Mexico) domain. *International Journal of Climatology*, **40**, 1396–1420, doi:10.1002/joc.6276
- Cayan, D. R. 1992. Latent and sensible heat flux anomalies over the northern oceans: The connection to monthly atmospheric circulation. *Journal of Climate*, **5**, 354–369, doi:10.1175/1520-0442(1992)005<0354:LASHFA>2.0.CO;2.
- Chacón, R. E. y Fernández, W. 1985. Temporal and spatial rainfall variability in the mountainous region of the Reventazón river basin, Costa Rica. *International Journal of Climatology*, **5 (2)**, 175-188, doi:10.1002/joc.3370050205.
- Chae, E., Lee, E., et al. 2013. Frequency-domain analysis of discrete wavelet transform coefficients and their adaptive shrinkage for anti-aliasing. *IEEE International Conference on Image Processing*. Melbourne, Australia, 1071-1074, doi:10.1109/ICIP.2013.6738221.
- Champion, J. 1968. *El plátano*. Editorial Blume. Madrid, España. 247 pp. ISBN 84-341-0255-2.
- Chen, X., Jiang, H., Cheng, H., y Zheng, H. 2023. Application of Correlation Analysis Based on Principal Components in the Study of Global Temperature Changes. *Iranian (Iranica) Journal of Energy and Environment*, **14 (4)**, 336-345, doi:10.5829/ijee.2023.14.04.03.

- Chiang, J. C. y Vimont, D. J. 2004. Analogous meridional modes of atmosphere–ocean variability in the tropical Pacific and tropical Atlantic. *Journal of Climate*, **17**, 4143–4158.
- Chinchilla, G., Gutierrez, J. y Zarate, E. 2017. Análisis sinóptico de casos de eventos extremos de lluvia asociados a líneas de cortante de empujes fríos que han llegado a Costa Rica en el periodo invernal. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, **16**(2), 5-18.
- CNE. 2015. Plan General de la emergencia: Inundaciones y deslizamientos provocados por temporal y paso de un sistema de baja presión. Decreto de Emergencia N°39056. Disponible en: <https://www.cne.go.cr/recuperacion/declaratoria/finiquitos/Informe%20de%20Finiquito%20Decreto%20de%20Emergencia%2039056.pdf>
- Cook, K. H., y Vizzy, E. K. 2010. Hydrodynamics of the Caribbean Low-Level Jet and Its Relationship to Precipitation. *Journal of Climate*, **23** (6), 1477-1494, doi:10.1175/2009JCLI3210.1/.
- Coppola, E., Raffaele, F., Giorgi, F. et al. 2021. Climate hazard indices projections based on CORDEX-CORE, CMIP5 and CMIP6 ensemble. *Climate Dynamics*, **57**, 1293–1383, doi:10.1007/s00382-021-05640-z.
- CORBANA. 2021. Estadísticas de exportación bananera 2021. ISSN 1409-0058
- Cullen, H. M., Kaplan, A., Arkin, P. A., y de Menocal, P. B. 2002. Impact of the North Atlantic Oscillation on Middle Eastern climate and streamflow. *Climatic Change*, **55**, 315–338, doi:10.1023/A:1020518305517.
- Delworth, T. L., y Mann, M. E. 2000. Observed and simulated multidecadal variability in the Northern Hemisphere. *Climate Dynamics*, **16**, 661–676.
- Depsky, N., y Pons, D. 2021. Meteorological droughts are projected to worsen in Central America's dry corridor throughout the 21<sup>st</sup> century. *Environmental Research Letters*, **16**, 014001, doi:10.1088/1748-9326/abc5e2.
- Dereczynski, C., ChanChou, S., Lyra, A., Sondermann, M., Regoto, T., Tavares, P., Chagas, D., Gomes, J.L., Rodrigues, D.C., y Skansi, M. 2020. Downscaling of climate extremes over South America – Part I: model evaluation in the reference climate. *Weather and Climate Extremes*, **29**, 100273, doi:10.1016/j.wace.2020.100273.
- Diffenbaugh, N. S., y Giorgi, F. 2012. Climate change hotspots in the CMIP5 global climate model ensemble. *Climatic Change*, **114**, 813–822, doi:10.1007/s10584-012-0570-x.
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., González, L. A., Tablada, E. M., Díaz, M. P., Robledo, C. W., Balzarini, M. G. 2008. Estadística para las Ciencias Agropecuarias. Séptima Edición. ISBN 978-987-591-112-3E1.

- Diro, G. T., Rauscher, S. A., Giorgi, F., y Tompkins, A. M. 2012. Sensitivity of seasonal climate and diurnal precipitation over Central America to land and sea surface schemes in RegCM4. *Climate Research*, **52**, 31-48, doi:10.3354/cr01049.
- Dittus, A.J., Karoly, D. J., Lewis, S. C., Alexander, L. V., y Donat, M. G. 2016. A Multiregional Model Evaluation and Attribution Study of Historical Changes in the Area Affected by Temperature and Precipitation Extremes. *Journal of Climate*, **29**, 8285–8299, doi:10.1175/JCLI-D-16-0164.1.
- Dunn, R. J., Alexander, L.V., Donat, M.G., Zhang, X., Bador, M., Herold, N., et al. 2020. Development of an updated global land in situ-based data set of temperature and precipitation extremes: HadEX3. *Journal of Geophysical Research, Atmospheres*, **125**, e2019JD032263, doi:10.1029/2019JD032263.
- Durán-Quesada, A. M., Gimeno, L., y Amador, J. 2017. Role of moisture transport for Central American precipitation. *Earth System Dynamics*, **8** (1), 147–161, doi:10.5194/esd-8-147-2017.
- Durán-Quesada, A. M., Sorí, R., Ordoñez, P., y Gimeno, L. 2020. Climate Perspectives in the Intra-Americas Seas. *Atmosphere*, **11** (9), 959, doi:10.3390/atmos11090959.
- Echeverría, C., De Waziers, B., Serebrisky, T., y Suárez-Alemán, A. 2017. Infraestructura para el desarrollo: ¿Cómo renovar la electricidad en Costa Rica? Banco Interamericano de Desarrollo, doi:10.18235/0000996.
- Enfield, D. B. 1996. Relationship of the Inter-American Rainfall to Tropical Atlantic and Pacific SST Variability. *Geophysical Research Letters*, **23**, 3305-3308, doi:10.1029/96GL03231.
- Enfield, D. B., y Alfaro, E. J. 1999. The dependence of Caribbean rainfall on the interaction of the tropical Atlantic and Pacific Oceans. *Journal of Climate*, **12**, 2093–2103, doi:10.1175/1520-0442(1999)012<2093:TDOCRO>2.0.CO;2.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A et al. 2016. Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, **9**, 1937–1958, doi:10.5194/gmd-9-1937-2016.
- FAO. 2018. Statistical database FAOSTAT. Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/en/#data>
- FAO. 2023. *Agricultural Outlook 2023-2032*. OECD Publishing Press. Paris, France. doi:10.1787/08801ab7-en.
- Fernández, W., y Ramírez, P. 1991. El Niño, la Oscilación del Sur y sus Efectos en Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, **11** (1), 3-11.
- Fernández, W., Chacón, R. E., y Melgarejo, J. W. 1996. On the rainfall distribution with altitude over Costa Rica. *Revista Geofísica*, **44**, 57-72.

- Frosch, S., von Frese, J., y Bro, R. 2005. Robust methods for multivariate data analysis. *Journal of Chemometrics*, **19**, 549–563, doi:10.1002/cem.962.
- Fuentes-Franco, R., Giorgi, F., Coppola, E. y Zimmermann, K. 2016. Sensitivity of tropical cyclones to resolution and convection scheme over the eastern tropical Pacific and tropical North Atlantic oceans in RegCM4 model. *Climate Dynamics*, **49**, 547–561, doi:10.1007/s00382-016-3357-3.
- Galán-Saúco, V., y Robinson, J. C. 2013. Fisiología, clima y producción de banano. *XX Reunião Internacional da Associação para a Cooperação em Pesquisa e Desenvolvimento Integral das Musáceas (Bananas e Plátanos)*. 9-13 de septiembre, 2013. Fortaleza, Brasil.
- García-Franco, J.L., Chadwick, R., Gray, L.J. et al. 2023. Revisiting mechanisms of the Mesoamerican Midsummer drought. *Climate Dynamics*, **60**, 549–569, doi:10.1007/s00382-022-06338-6.
- Giannini, A., M., Cane, M.A., y Kushnir, Y. 2001. Interdecadal Changes in the ENSO Teleconnection to the Caribbean Region and the North Atlantic Oscillation. *Journal of Climate*, **14**, 2867–2879, doi:10.1175/1520-0442(2001)014<2867:ICITET>2.0.CO;2.
- Giorgi, F., y Mearns, L.O. 1991. Approaches to the simulation of regional climate change: a review. *Reviews of Geophysics*, **29** (2), 191–216.
- Giorgi, F. 2006. Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, **33**, 1–4, doi:10.1029/2006GL025734.
- Giorgi, F., Jones, C., y Asrar, G.R. 2009. Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *WMO Bull*, **58** (3), 175.
- Giorgi, F., y Gutowski, Jr W. J. 2015. Regional dynamical downscaling and the CORDEX initiative. *Annual Review of Environmental and Resources*, **40**, 467-490, doi:10.1146/annurev-environ-102014-021217.
- Giorgi, F., Coppola, E., Solmon, F., Mariotti, L., Sylla, M.B., et al. 2012. RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research*, **52**, 7–29, doi:10.3354/cr01018.
- Giorgi, F., Coppola, E., Jacob, D., Teichmann, C., Abba Omar, S., Ashfaq, M., et al. 2022. The CORDEX-CORE EXP-I initiative: Description and highlight results from the initial analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **103** (2), E293–E310, doi:10.1175/BAMS-D-21-0119.
- González-Flores, E., Campos-Enríquez, J. O., Camacho-Ramírez, E., y Rivera-Recillas, D. E. 2016. Eliminated aliasing effect on wavelet transform based multiresolution analysis. *Geofísica internacional*, **55** (3), 189-198, doi:10.19155/rgi20165531611.
- Gorgas, J., Cardiel, N., y Zamorano, J. 2011. *Estadística básica para estudiantes de ciencias*. Departamento de Astrofísica y Ciencias de la Atmósfera. Facultad de Ciencias Físicas. Universidad Complutense de Madrid. ISBN 978-84-691-8981-8.

- Greatbatch, R. 2000. The North Atlantic Oscillation. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, **14**, 213–242, doi:10.1007/s004770000047.
- Guillén-Oviedo, H. S., Cid-Serrano, L. R., y Alfaro-Martínez, E. J. 2020. Comparación de parámetros de valor extremo de la distribución generalizada asociada a eventos de precipitación extrema en América Central. *Uniciencia*, **34** (1), 111-128, doi:10.15359/ru.34-1.7.
- Gutowski, W. J., Giorgi, F., Timbal, B., Frigon, A., Jacob, D., Kang, H. S., Raghavan, K., Lee, B., Lennard, C., Nikulin, G., O'Rourke, E., Rixen, M., Solman, S., Stephenson, T., y Tangang, F. 2016. WCRP Coordinated Regional Downscaling Experiment (CORDEX): a diagnostic MIP for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, **9** (11), 4087-4095, doi:10.5194/gmd-9-4087-2016.
- Guzmán, J. A; y González, M. 2021. Comportamiento del clima: causas, evidencias y su efecto sobre la Vertiente del Caribe de Costa Rica. *CORBANA. Dirección de Investigaciones*. San José, Costa Rica.
- Hall, L., Ulate, A., Pastrana, G., Segura, B., y Araya, A. 2020. Distribución espacial del empleo en Costa Rica. *Serie de documentos de trabajo*, **20-01**. Escuela de Economía. Universidad de Costa Rica.
- Hannah, L., Donatti, C., Harvey, C.A., Alfaro, E.J., Rodríguez, D.A., Bouroncle, C., Castellanos, E., Díaz, F., Fung, E., Hidalgo, H.G., Imbach, P., Laderach, P., Landrum, J.P., Solano, A.L. 2017. Regional modeling of climate change impacts on smallholder agriculture and ecosystems in Central America. *Climatic Change*, **141**, 29-45, doi:10.1007/s10584-016-1867-y.
- Hastenrath, S. 1976. Variations in low-latitude circulation and extreme climatic events in the tropical Americas. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **33**, 202–215, doi:10.1175/1520-0469(1976)033<0202:VILLCA>2.0.CO;2.
- Hidalgo, H. G., Amador, J. A., Alfaro, E. J., y Quesada, B. 2013. Hydrological climate change projections for Central America. *Journal of Hydrology*, **495**, 94–112, doi:10.1016/j.jhydrol.2013.05.004.
- Hidalgo, H. G. y Alfaro, E. J. 2015. Skill of CMIP5 climate models in reproducing 20th century basic climate features in Central America. *International Journal of Climatology*, **35**, 3397-3421, doi:10.1002/joc.4216.
- Hidalgo, H. G., Durán-Quesada, A. M., Amador, J. A., y Alfaro, E. J. 2015. The Caribbean low-level jet, the inter-tropical convergence zone and precipitation patterns in the intra Americas sea: a proposed dynamical mechanism. *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*, **97**, 41–59, doi:10.1111/geoa.12085.
- Hidalgo, H. G., Alfaro, E. J., y Quesada-Montano, B. 2017. Observed (1970–1999) climate variability in Central America using a high-resolution meteorological dataset with implication to climate change studies. *Climatic Change*, **141**, 13-28, doi:10.1007/s10584-016-1786-y.
- Hidalgo, H. G. 2021. Climate Variability and Change in Central America: What Does It Mean for Water Managers? *Frontiers in Water*, **2**, 632739, doi:10.3389/frwa.2020.632739

- Hidalgo, H. G., Alfaro, E. J., y Pérez-Briceño, P. M. 2021. Cambios climáticos proyectados de modelos CMIP5 en La Cruz, Guanacaste, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 69 (2), S60-S73, doi:10.15517/rbt.v69iS2.48307.
- Hong, C. C., Lu, M. M., y Kanamitsu, M. 2008. Temporal and spatial characteristics of positive and negative Indian Ocean dipole with and without ENSO. *Journal of Geophysical Research*, 113, D08107, doi:10.1029/2007JD009151.
- Hu, Q., Woodruff, C.M., y Mudrick, S.E. 1998. Interdecadal variations of precipitation in the central United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79 (2), 221–229.
- Huang, B., Thorne, P. W., Banzon, V.F., Boyer, T., Chepurin, G., Lawrimore, J. H., Menne, M. J., Smith, T. M., Vose, R. S., y Zhang, H. M. 2017. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature, version 5 (ERSSTv5): upgrades, validations, and Intercomparisons. *Journal of Climate*, 30, 8179–8205, doi:10.1175/JCLI-D-16-0836.1.
- Hulme, M., Conway, D., Jones, P.D., Jiang, T., Barrow, E.M., y Turney, C. 1995. Construction of a 1961–1990 European climatology for climate change modeling and impact applications. *International Journal of Climatology*, 15, 1333–1363.
- Hurrell, J.W. 1995. Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation. *Science*, 269, 676–679, doi:10.1126/science.269.5224.676.
- Imbach, P., Beardsley, M., Bouroncle, C., Medellín, C., Laderach, P., Hidalgo, H., et al. 2017. Climate change, ecosystems, and smallholder agriculture in Central America: an introduction to the special issue. *Climatic Change*, 141, doi:10.1007/s10584-017-1920-5.
- Imbach, P., Chou, S.C., Lyra, A., Rodrigues, D., Rodriguez, D., Latinovic, D., et al. 2018. Future climate change scenarios in Central America at high spatial resolution. *PLOS ONE*, 13 (4), e0193570, doi:10.1371/journal.pone.0193570.
- IMN. 2011. Análisis del riesgo actual del sector hídrico de Costa Rica ante el cambio climático: para contribuir a mejorar el desarrollo humano. San José, Costa Rica.
- IMN. 2019. Boletín Meteorológico Enero 2019. San José, Costa Rica. Disponible en: <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/526292/ENERO>
- INEC. 2015. Resultados generales del Censo Nacional de Vivienda y Población 2011, Costa Rica. Disponible en: <https://inec.cr/estadisticas-fuentes/censos/censo-2011?documentTypen>
- INEC. 2022. Encuesta Nacional Agropecuaria, Costa Rica, 2021. Disponible en: <https://inec.cr/estadisticas-fuentes/encuestas/encuesta-nacional-agropecuaria>
- INEC. 2023. Estimaciones de población y vivienda, Costa Rica, 2022. Disponible en: <https://inec.cr/estimaciones-poblacion-vivienda-2022>

- IPCC, 2021. Climate change 2021: *The physical science basis*. In: V., Masson-Delmotte, P., Zhai, A., Pirani, S. L., Connors, C., Péan, (Eds). Contribution of working group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. In press., doi:10.1017/9781009157896.
- IPCC. 2023. Summary for Policymakers. Climate Change 2023: *Synthesis Report*. In: Core Writing Team, H. Lee y J. Romero (Eds). Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.
- Jacob, D., Andrae, U., Elgered, G., Fortelius, C., Graham, L. P., et al. 2001. A Comprehensive Model Intercomparison Study Investigating the Water Budget during the BALTEX-PIDCAP Period. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **77 (1-4)**, 19-43.
- Jianping, L., y Wang, J. X. 2003. A new North Atlantic Oscillation index and its variability. *Advances in Atmospheric Sciences*, **20**, 661–676, doi:10.1007/BF02915394.
- Jones, P. D., Josson, T., y Wheeler, D. 1997. Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland. *International Journal of Climatology*, **17**, 1433–1450, doi:10.1002/(SICI)1097-0088(19971115)17:13<1433::AID-JOC203>3.0.CO;2-P.
- Jones, J. J., Stephenson, T. S., Taylor, M. A. y Campbell, J. D. 2016. Statistical downscaling of North Atlantic tropical cyclone frequency and the amplified role of the Caribbean low-level jet. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **121 (8)**, 3741–3758, doi:10.1002/2015JD024342.
- Jury, M., Malmgren, B. A., y Winter, A. 2007. Winter, A. Subregional precipitation climate of the Caribbean and relationships with ENSO and NAO. *Journal of Geophysical Research*, **112**, D16107, doi:10.1029/2006JD007541.
- Kendall, M. G. 1938. A new measure of rank correlation. *Biometrika*, **30**, 81-93.
- Klotzbach, P. 2010. On the Madden–Julian oscillation–Atlantic hurricane relationship. *Journal of Climate*, **23**, 282–293, doi:10.1175/2009JCLI2978.1.
- Knaff, J. A. 1997. Implications of summertime sea level pressure anomalies in the tropical Atlantic region. *Journal of Climate*, **10**, 789–804, doi:10.1175/1520-0442(1997)010<0789:IOSSLP>2.0.CO;2.
- Krishnamurthy, L., Vecchi, G. A., Msadek, R., Murakami, H., Wittenberg, A. T., y Zeng, F. 2016. Impact of Strong ENSO on Regional Tropical Cyclone Activity in a High–Resolution Climate Model in the North Pacific and North Atlantic Oceans. *Journal of Climate*, **29**, 2375–2394, doi:10.1175/JCLI-D-15-0468.1.

- Kumar, S., Merwade, V., Kinter, J. L., III y Niyogi, D. 2013. Evaluation of temperature and precipitation trends and long-term persistence in CMIP5 twentieth-century climate simulations. *Journal of Climate*, **26** (12), 4168–4185, doi:10.1175/JCLI-D-12-00259.1.
- Kusunoki, S., Nakaegawa, T., Pinzón, R. et al. 2019. Future precipitation changes over Panama projected with the atmospheric global model MRI-AGCM3.2. *Climate Dynamics*, **53**, 5019–5034, doi:10.1007/s00382-019-04842-w.
- Lamb, P. J. y Changnon, J. R. 1988. On the “best” temperature and precipitation normal: the Illinois situation. *Journal of Applied Meteorology*, **20**, 1383-1419.
- Lehner, F., Deser, C., Maher, N., Marotzke, J., Fischer, E., Brunner, L., Knutti, R., y Hawkins, E. 2020. Partitioning climate projection uncertainty with multiple large ensembles and CMIP5/6. *Earth Systems Dynamics*, **11**, 491–508. doi:10.5194/esd-11-491-2020.
- Li, H. y Misra, V. 2014. Thirty-two-year ocean–atmosphere coupled downscaling of global reanalysis over the Intra-American Seas. *Climate Dynamics*, **43**, 2471–2489, doi:10.1007/s00382-014-2069-9.
- Lim, Y. K., Schubert, S. D., Reale, O., Molod, A. M., Suarez, M. J., y Auer, B. M. 2016. Large–Scale Controls on Atlantic Tropical Cyclone Activity on Seasonal Time Scales. *Journal of Climate*, **29**, 6727–6749, doi:10.1175/JCLI-D-16-0098.1.
- Luna-Niño, R., Cavazos, T., Torres-Alavez, J.A., Giorgi, F., y Coppola, E. 2021. Interannual variability of the boreal winter subtropical jet stream and teleconnections over the CORDEX-CAM domain during 1980–2010. *Climate Dynamics*, **57**, 1571–1594, doi:10.1007/s00382-020-05509-7.
- Lynn, B. H., Healy, R., y Druyan, L. M. 2007. An analysis of the potential for extreme temperature change based on observations and model simulations. *Journal of Climate*, **20** (8), 1539–1554, doi:10.1175/JCLI4219.1.
- Machovina, B., y Feeley, K.J., 2013. Climate change driven shifts in the extent and location of areas suitable for export banana production. *Ecological Economics*, **95**, 83–95, doi:10.1016/j.ecolecon.2013.08.004.
- Magaña, V., Amador, J. A., y Medina, S. 1999. The Midsummer Drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, **12**, 1577–1588, doi:10.1175/1520-0442(1999)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2.
- Magnan, A. K., Schipper, E. L., y Duvat, V. K. 2020. Frontiers in climate change adaptation science: advancing guidelines to design adaptation pathways. *Current Climate Change Reports*, **6** (4), 166–177, doi:10.1007/s40641-020-00166-8.
- Maillard, J.C. 1984. Le marché international de la banane, étude géogram que d’un système comercial. *Fruits*, **39** (9), 501-539.

- Malcangio, D., Manella, N., y Ungaro N. 2020. Environmental quality characteristics of the Apulian transitional waters. Case study: lagoons of Lesina and Varano (Italy). *Aquatic Ecosystem Health & Management*, **23 (4)**, 427–435, doi:10.1080/14634988.2020.1807246.
- Maldonado, T., Alfaro, E., Fallas-López, B., y Alvarado, L. 2013. Seasonal prediction of extreme precipitation events and frequency of rainy days over Costa Rica, Central America, using Canonical Correlation Analysis. *Advances in Geosciences*, **33**, 41–52, doi:10.5194/adgeo-33-41-2013.
- Maldonado, T., Rutgersson, A., Alfaro, E. J., Amador, J. A., y Claremar, B. 2016. Interannual variability of the midsummer drought in Central America and the connection with sea surface temperatures. *Advances in Geosciences*, **42**, 35–50, doi:10.5194/adgeo-42-35-2016.
- Maldonado, T., Alfaro, E., Rutgersson, A. y Amador, J. A. 2017. The early rainy season in Central America: the role of the tropical North Atlantic SSTs. *International Journal of Climatology*, **37**, 3731–3742, doi:10.1002/joc.4958.
- Maldonado, T., Alfaro, E. J., e Hidalgo, H. G. 2018. A review of the main drivers and variability of Central America's Climate and seasonal forecast systems. *Revista de Biología Tropical*, **66 (1)**, 153–175, doi:10.15517/RBT.V66I1.33294.
- Maldonado, T., Alfaro, E. J., e Hidalgo, H. G. 2021. Análisis de los conglomerados de precipitación y sus cambios estacionales sobre América Central para el período 1976- 2015. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, **28 (2)**, 337–362, doi:10.15517/rmta.v28i2.42322.
- Mann, H. B. 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometric*, **13**, 245-259.
- Manso, P., Stolz, W., y Fallas, J. C. 2005. El régimen de la precipitación en Costa Rica. *Revista Ambientico*, **144**, 7-8.
- Marín, D. H., Romero, R. A., Guzmán, M., y Sutton, T. B. 2003. Black sigatoka: an increasing threat to banana cultivation. *The American Phytopathological Society Publications*, **87**, 208-222, doi:10.1094/PDIS.2003.87.3.208.
- Martínez, C., Goddard, L., Kushnir, Y., y Ting, M. 2019. Seasonal climatology and dynamical mechanisms of rainfall in the Caribbean. *Climate Dynamics*, **53**, 825-846, doi:10.1007/s00382-019-04616-4.
- Martynov A., Laprise, R., Sushama, L., Winger, K., Separovic, L., y Dugas, B. 2013. Reanalysis-driven climate simulation over CORDEX North America domain using the Canadian Regional Climate Model version5. *Climate Dynamics*, **41**, 2973-3005, doi:10.1007/s00382-013-1778-9.
- McClearn, D. et al. 2016. The Caribbean lowland evergreen moist and wet forests. In: M. Kappelle (Ed). *Costa Rica ecosystems*. University of Chicago Press. Chicago, Illinois, 527–587. ISBN 978-0-226-12150-5.

- McKenna, S., Santoso, A., Sen Gupta, A., Taschetto, A., y Wenju, C. 2020. Indican Ocean Dipole in CMIP5 and CMIP6: characteristics, biases, and links to ENSO. *Scientific Reports*, **10**, 11500, doi:10.1038/s41598-020-68268-9.
- McPhaden, M. J., Santoso, A., y Wenju, C. 2021. Introduction to El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate. In: M. J. McPhaden., A. Santoso., A., y C. Wenju (Eds). *El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate. Geophysical Monograph*, **253**. First edition. American Geophysical Union and John Wiley y Sons, Inc. Washington, D.C, USA. ISBN 9781119548119.
- Méndez, M., Maathuis, B., Hein-Griggs, D., y Alvarado G., L., 2020. Performance Evaluation of Bias Correction Methods for Climate Change Monthly Precipitation Projections over Costa Rica. *Water*, **12 (2)**, 482, doi:10.3390/w12020482.
- Meyers, S. D., Kelly, B. G., y O'Brien, J. J. 1993. An introduction to wavelet analysis in oceanography and meteorology: with application to the dispersion of Yanai waves. *Monthly Weather Review*, **121**, 2858–2866.
- Mideplan. 2014. Plan de desarrollo de la región huetar Caribe: Competitividad y ordenamiento territorial al 2030. Disponible en: <https://repositorio-snp.mideplan.go.cr/handle/123456789/412>
- Montgomery, D. C., Johnson, L. A., y Gardiner, J. S. 1990. *Forecasting and time series analysis*. Second edition. McGraw-Hill, New York. ISBN 978-0070428584.
- Morlet, J., Arens, G., Fourfeau, E., y Giard, D. 1982. Wave propagation and sampling theory I: complex signal and scattering in multi-layered media. *Geophysics*, **47 (2)**, 203–221.
- Morón, V., Bigot, S., y Roucou, P. 1995. Rainfall variability in subequatorial America and Africa and relationships with the main sea-surface temperature modes (1951- 1990). *International Journal of Climatology*, **15**, 1297-1322.
- Moses, T., Kiladis, G. N., Diaz, H. F., y Barry, R. G. 1987. Characteristics and frequency of reversals in mean sea level pressure in the North Atlantic sector and their relationship to long-term temperature trends. *International Journal of Climatology*, **7**, 13–30.
- Muñoz, A. C., Fernández, W., Gutiérrez, J. A. y Zárate, E. 2002. Distribución horaria de la magnitud del viento en Costa Rica. *Tópicos Meteorológico y Oceanográficos*, **9 (1)**, 14- 28.
- Navarro-Racines C, Tarapues J, Thornton P, Jarvis A, Ramirez-Villegas J. 2020. High-resolution and bias-corrected CMIP5 projections for climate change impact assessments. *Scientific Data*. **7(1)**. doi:10.1038/s41597-019-0343-8.
- Nawrotzki, R.J., Tebeck, M., Harten, S. et al. 2023. Climate change vulnerability hotspots in Costa Rica: constructing a sub-national index. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, **13**, 473–499, doi:10.1007/s13412-023-00831-y.

- Nijssen, B., O'Donnell, G. M., Lettenmaier, D. P., Lohmann, D. y Wood, E. F. 2001. Predicting the discharge of global rivers. *Journal of Climate*, **14**, 3307–3323, doi:10.1175/1520-0442(2001)014<3307:PTDOGR>2.0.CO;2.
- Nikulin, G., Jones, C., Giorgi, F., Asrar, G., Buchner, M., Cerezo-Mota, R., Bossing Christense, O., Déqué, M., Fernandez, J., Handsler, A., Meijgaard, E., Samuelsson, P., Bamba Sylla, M. y Sushama, L. 2012. Precipitation climatology in an ensemble of CORDEX-Africa regional climate simulations. *Journal of Climate*, **25 (18)**, 6057–6078, doi:10.1175/JCLI-D-11-00375.1.
- Noleppa, S., Gornott, C., Luttringhaus, S., Hackenberg, I., y Gleixner, S. 2021. *Climate change and its effects on banana production in Colombia, Costa Rica, the Dominican Republic, and Ecuador*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). German Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (BMZ) Division 122.
- Olmo, M., Balmaceda-Huarte, R., y Bettolli, M., 2022. Multi-model ensemble of statistically downscaled GCMs over Southeastern South America: Historical evaluation and future projections of daily precipitation with focus on extremes. *Climate Dynamics*, **59 (9-10)**, 3051–3068, doi:10.1007/s00382-022-06236-x.
- Orozco-Montoya, R. A., Brenes-Maykall, A., Sura-Fonseca, R. 2022. Inventario Histórico de Desastres en Costa Rica en el Periodo 1970-2020. *Revista de estudios latinoamericanos sobre reducción del riesgo de desastres*, **6 (1)**, 66-82, doi:10.55467/reder.v6i1.85.
- Orozco-Montoya, R. A., y Penalba, O. C. 2023. Spatial and temporal rainfall variability in the Caribbean coast of Costa Rica. *Theoretical and Applied Climatology*, **151**, 1585–1599, doi:10.1007/s00704-022-04342-8.
- Orth, R., Sungmin, O., Zscheischler, J., Mahecha, M. D., y Reichstein, M. 2021. Contrasting biophysical and societal impacts of hydrometeorological extremes. *Environmental Research Letters*, **17 (1)**, 014044, doi:10.1088/1748-9326/ac4139.
- Ortiz-Vega, R., López, A., Ponchner, S., y Segura, A. 1999. *El cultivo del banano*. Editorial EUNED. San José, Costa Rica. ISBN 978-9968-31-048-2.
- Osborn, T. J. 2011. Winter 2009/2010 temperatures and a record-breaking North Atlantic Oscillation index. *Weather*, **66 (1)**, 19-21, doi:10.1002/wea.660.
- Oyhantçabal, W. y Rodríguez, A. 2022. *Acción climática en la agricultura: la experiencia de países miembros de la Plataforma de Acción Climática en Agricultura de Latinoamérica y el Caribe*. Serie Recursos Naturales y Desarrollo, N°215, CEPAL.
- Panofsky H. A., Brier G. W. y Best W. H. 1958. *Some application of statistics to meteorology*. The Pennsylvania State University. USA. 224 pp. ASIN: B000KYBZ8C.

- Pántano, V. C., Penalba, O. C., Spescha, L. B., y Murphy, G. M. 2017. Assessing how accumulated precipitation and long dry sequences impact the soil water storage. *International Journal of Climatology*, **37**, 4316-4326, doi:10.1002/joc.5087.
- Pascale, S., Kapnick, S. B., Delworth, T. L. et al. 2021. Natural variability vs forced signal in the 2015–2019 Central American drought. *Climatic Change*, **168**, 16, doi:10.1007/s10584-021-03228-4.
- Pasquini, A.I., Lecomte, K.L., Piovano, E.L., y Depetris, P.J. 2006. Recent rainfall and runoff variability in central Argentina. *Quaternary International*, **158**, 127–139, doi: 10.1016/j.quaint.2006.05.021.
- Patricola, C. M., Saravanan, R., y Chang, P. 2014. The Impact of the El Niño–Southern Oscillation and Atlantic Meridional Mode on Seasonal Atlantic Tropical Cyclone Activity. *Journal of Climate*, **27**, 5311–5328, doi:10.1175/JCLI-D-13-00687.1.
- Penalba, O. C., y Vargas, W. M. 2004. Interdecadal and Interannual Variations of Annual and Extreme Precipitation Over Central-Northeastern Argentina. *International Journal of Climatology*, **24** (12), 1565–1580, doi:10.1002/joc.1069.
- Penalba, O. C., y Robledo, F. 2010. Spatial and temporal variability of the frequency of extreme daily rainfall regime in the La Plata Basin during the 20th century. *Climatic Change*, **98**, 531–550, doi:10.1007/s10584-009-9744-6.
- Penalba, O.C., y Pántano, V.C. 2019. Soil water fluxes projections from global climate models of CMIP5 in South America and its regional impact. *Revista Argentina de Agrometeorología*, **10**, 1-13.
- Pérez-Briceño, P. M., Alfaro, E. J, Hidalgo, H., y Jiménez, F. 2016. Distribución espacial de impactos de eventos hidrometeorológicos en América Central. *Revista de Climatología*, **16**, 63-75.
- Pérez-Briceño, P. M., Amador-Astúa, J. A., y Alfaro, E. J. 2017. Dos propuestas de clasificación climática para la vertiente Caribe costarricense según el sistema de Thornthwaite. *Revista de Climatología* **17**, 1-16.
- Piedra-Castro, L., Castillo-Chinchilla, M., y Morales-Cerdas, V. 2021. Characterization of sandy beaches of the southern Caribbean of Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, **34** (3), 120-133, doi:10.18845/tm.v34i3.5197.
- Poblete, A., Iranzo, D.A., y Aguiar, L. A. 2013. Análisis espacio-temporal del posible corrimiento de la posición latitudinal del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur. *Revista Universitaria de Geografía*, **22** (1), 129-146, ISSN 1852-4265.
- Poleo, D., Solano-León, E., y Stolz-España, W. 2014. La oscilación atmosférica Madden-Julian (MJO) y las lluvias en Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, **13** (1), 58-74.
- Portis, D. H., Walsh, J. E., Hamly, M. E., y Lamb, P. J. 2000. Seasonality of the North Atlantic Oscillation. *Journal of Climate*, **13**, 2069-2078, doi:10.1175/1520-0442(2001)014<2069:SOTNAO>2.0.CO;2

- Pospieszyńska, A., y Przybylak, R. 2019. Air temperature changes in Toruń (central Poland) from 1871 to 2010. *Theoretical and Applied Climatology*, **135**, 707–724, doi:10.1007/s00704-018-2413-9.
- Poveda, G., y Mesa, O. J. 2000. On the existence of Lloró (the rainiest locality on Earth): enhanced ocean-land-atmosphere interaction by a low-level jet. *Geophysical Research Letters*, **27** (11), 1675–1678, doi:10.1029/1999GL006091.
- Poveda, G., Jaramillo, L., y Vallejo, L. F. 2014. Seasonal precipitation patterns along pathways of South American low-level jets and aerial rivers. *Water Resources Research*, **50**, 98-118, doi:10.1002/2013WR014087.
- Prager, S.D., Ríos, A. R., Schiek, B., Almeida, J. S., y González, C. E. 2020. *Climate change vulnerability and economic impacts in the agricultural sector in Latin America and the Caribbean*. IDB Technical Note IDB-TN-01915. Inter-American Development Bank (IDB); International Center for Tropical Agriculture (CIAT). Cali, Colombia.
- PROCOMER. 2022. Portal estadístico de Comercio Exterior, Costa Rica. Disponible en: <http://sistemas.procomer.go.cr/estadisticas/inicio.aspx>
- Quesada, M. E., y Waylen, P. 2013. Análisis climático de la precipitación anual e interanual en la cuenca media del río Grande de San Ramón, Costa Rica. *Investigaciones Geográficas*, **45**, 3-18, doi:10.5354/0719-5370.2013.27591.
- Quesada, M. E., y Waylen, P. 2020. Variability of Daily Precipitation on the Caribbean Coast of Costa Rica. *Revista de Climatología*, **20**, 61-74.
- Quesada-Hernández, L. E., Hidalgo, H. G., y Alfaro, E. J. 2020. Asociación entre algunos índices de sequía e impactos socio-productivos en el Pacífico Norte de Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, **54**, 16-32, doi:10.15359/rca.54-1.2.
- Quesada-Montano, B., Wetterhall, F., Westerberg, I. K., Hidalgo, H. G., y Halldin, S. 2019. Characterising droughts in Central America with uncertain hydro-meteorological data. *Theoretical and Applied Climatology*, **137**, 2125–2138, doi:10.1007/s00704-018-2730-z.
- Quesada-Román, A., y Pérez-Briceño, P. M. 2019. Geomorphology of the Caribbean coast of Costa Rica. *Journal of Maps*, **15** (2), 363-371, doi:10.1080/17445647.2019.1600592.
- Ramirez, J., Jarvis, A., Van den Bergh, I., Staver, C., Turner, D., Hatfield, J. L., Lotze-campen, H., y Hall, A. E. 2011. Changing climates: effects on growing conditions for banana and plantain (*Musa* spp.) and possible responses. In: S. S. Yadav, R. J. Redden, H. Lotze-Campen, A. E. Hall. (Eds). *Crop Adaptation to Climate Change*. Wiley-Blackwell, Oxford, UK, 426–438, doi:10.1002/9780470960929.ch29.

- Rathinasamy, M., Agarwal, A., Sivakumar, B. et al. 2019. Wavelet analysis of precipitation extremes over India and teleconnections to climate indices. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, **33**, 2053–2069, doi:10.1007/s00477-019-01738-3.
- Retana, J., y Villalobos, R. 2000. Caracterización pluviométrica de la fase cálida de ENOS en Costa Rica con base en probabilidades de ocurrencia de eventos en tres escenarios: seco, normal y lluvioso. *Tópicos Meteorológicos y oceanográficos*, **7 (2)**, 117-124.
- Retana, J. 2012. Eventos hidrometeorológicos extremos lluviosos en Costa Rica desde la perspectiva de la adaptación al cambio en el clima. *Revista de Ciencias Ambientales*, **44**, 5-16.
- Ribera, P., Ordoñez, P., Gallego, D., y Peña-Ortiz, C. 2020. Internal variability and external forcings in the ocean-atmosphere multidecadal oscillator over the North Atlantic. *Climate Dynamics*, **55**, 909–923, doi:10.1007/s00382-020-05300-8.
- Riehl, S., Pustovoytov, K. E., Weippert, H., Klett, S., y Hole, F. 2014. Drought stress variability in ancient Near Eastern agricultural systems evidenced by  $\delta^{13}\text{C}$  in barley grain. *PNAS*, **26 (111)**, 12348-12353, doi:10.1073/pnas.1409516111.
- Rivera, J. A., Penalba, O. C. y Betolli, M. L. 2013. Inter-annual and inter-decadal variability of dry days in Argentina. *International Journal of Climatology*, **33**, 834-842, doi:10.1002/joc.3472.
- Robinson, J. C., y Galán-Saúco, V. 2010. *Bananas and Plantains*. CAB International. Wallingford, UK. ISBN 978-1-84593-658-7.
- Rodríguez-Vera, G., Romero-Centeno, R., Castro, C. L., Castro, V. M. 2019. Coupled Interannual Variability of Wind and Sea Surface Temperature in the Caribbean Sea and the Gulf of Mexico. *Journal of Climate*, **32**, 4263–4280, doi:10.1175/JCLI-D-18-0573.1.
- Rummukainen, M., 2010. State-of-the-art with regional climate models. *Wires Climate Change*, **1**, 82–96, doi:10.1002/wcc.8.
- Ruscica, R.C., Sörensson, A.A., y Menéndez, C.G. 2014. Hydrological links in southeastern South America: soil moisture memory and coupling within a hot spot. *International Journal of Climatology*, **34 (14)**, 3641–3653, doi:10.1002/joc.3930.
- Sáenz, F., y Amador, J. A. 2016. Características del ciclo diurno de precipitación en el Caribe de Costa Rica. *Revista de Climatología*, **16**, 21-34.
- Sáenz, F., Hidalgo, H. G., Muñoz, A. G., Alfaro, E.J., Amador, J. A., y Vázquez-Aguirre, J. L. 2022. Atmospheric circulation types controlling rainfall in the Central American Isthmus. *International Journal of Climatology*, 1-22, doi:10.1002/joc.7745.
- Saji, N. H., Goswami, B. N., Vinayachandran, P. N., y Yamagata, T. 1999. A dipole mode in the tropical Indian Ocean, *Nature*, **401**, 360–363.

- Saji, N. H., y Yamagata, T. 2003. Possible impacts of Indian Ocean Dipole mode events on global climate. *Climate Research*, **25**, 151–169.
- Salas, J. D. 1992. Analysis and modelling of hydrology time series. In: D. R. Maidment (Ed). *Handbook of Hydrology*, chapter 19. Mc Graw-Hill, New York. ISBN 9780070397323.
- Salvacion, A. R. 2020. Effect of climate on provincial-level banana yield in the Philippines. *Processing in Agriculture*, **7** (1), 50-57, doi:10.1016/j.inpa.2019.05.005.
- Sánchez-Murillo, R., Durán-Quesada, A. M., Birkel, C., Esquivel-Hernández, G., y Boll, J. 2017. Tropical precipitation anomalies and d-excess evolution during El Niño 2014 16. *Hydrological Processes*, **31**, 956-967, doi:10.1002/hyp.11088.
- Seager, R., Kushnir, Y., Visbeck, M., Naik, N., Miller, J., Krahnemann, G., y Cullen, H. 2000. Causes of Atlantic Ocean climate variability between 1958 and 1998. *Journal of Climate*, **13**, 2845–2862, doi:10.1175/1520-0442(2000)013<2845:COAOCV>2.0.CO;2.
- Separovic, L., Alexandru, A., Laprise, R., Martynov, A., Sushama, L., Winger, K., Tete, K., y Valin, M. 2013. Present climate and climate change over North America as simulated by the fifth-generation Canadian regional climate model. *Climate Dynamics*, **41**, 3167- 3201, doi:10.1007/s00382-013-1737-5.
- SEPSA. 2023. Desempeño del sector agropecuario 2022. Disponible en: [http://www.sepsa.go.cr/docs/2023-005-Desempenno\\_SectorAgro\\_2022.pdf](http://www.sepsa.go.cr/docs/2023-005-Desempenno_SectorAgro_2022.pdf)
- Serrano, E., Guzmán, M., Mora, M., Araya, M., González, M., Segura, R., Ortega, R., y Sandoval, J. 2008. Efecto de la periodicidad o estacionalidad climatológica en las plantaciones de banano en la zona Caribe de Costa Rica. *Informe Anual 2008. CORBANA*, San José, Costa Rica.
- Siegel, S. 1956. *Nonparametric Statistics: For the behavioral Sciences*. Mc Graw-Hill, New York. ISBN 978-0070573574.
- Simpson, N. P., Mach, K. J., Constable, A., Hess, J., Hogarth, R., Howden, M., Lawrence, J., Lempert, R. J., Muccione, V., Mackey, B. y New, M. G., 2021. A framework for complex climate change risk assessment. *One Earth*, **4** (4), 489–501, doi:10.1016/j.oneear.2021.03.005.
- Sitz, L. E., Di Sante, F., Farneti, R., et al. 2017. Description and evaluation of the Earth System Regional Climate Model (Reg CM-ES). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **9**, 1863–1886, , doi:10.1002/2017MS000933.
- Solano, J., y Villalobos, R. 2001. Aspectos fisiográficos aplicados a un bosquejo de regionalización geográfico-climático de Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, **8**, 26-39.
- Sörensson, A. A., y Menéndez, C. G. 2011. Summer soil–precipitation coupling in South America. *Tellus A*, **63** (1), 56–68, doi:10.1111/j.1600-0870.2010. 00468.x.

- Soto-Quirós, E. 2000. Drenaje en el cultivo de banano. *CORBANA, Boletín* **5**. San José, Costa Rica.
- Soto, M. 2014. *Bananos. Conceptos Básicos 1*. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. ISBN 978-9977-66-318-0
- Stone, M. C., Hotchkiss, R. H., y Mearns, L. O. 2003. Water yield responses to high and low spatial resolution climate change scenarios in the Missouri River basin. *Geophysical Research Letters*, **30** (4), 1186.
- Stover, R. H. y Simmonds, N. W. 1987. Classification of Banana Cultivars. In: R.H. Stover, y N.W. Simmonds (Eds). *Bananas*. Wiley, New York, 97-103.
- Sulaiman, N. H., Kamarudin, M. K., Mustafa, A. D., Amran, M. A., Azaman, F., Abidin, I.Z. y Hairoma, N. 2015. Trend Analysis of Pahang River Using Non-Parametric Analysis: Mann Kendall's Trend Test. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, **19**, 1327-1334, ISSN 1394-2506.
- Sun, S., Lan, J., Fang, Y., Tana., Gao, X. 2015. A triggering mechanism for the Indian Ocean Dipoles Independent of ENSO. *Journal of Climate*, **28**, 5063–5076, doi:10.1175/jcli-d-14-00580 .1 .
- Tang, B. H., y Neelin, J. D. 2004. ENSO Influence on Atlantic hurricanes via tropospheric warming. *Geophysical Research Letters*, **31**, L24204, doi:10.1029/2004GL021072.
- Taylor, M. A., y Alfaro, E. J. 2005. Climate of Central America and the Caribbean. In: J. E. Oliver (Ed). *Encyclopedia of World Climatology*. Springer, 183-188. Netherlands, doi:10.1007/1-4020-3266-8
- Torma, C., Giorgi, F., y Coppola, E. 2014. Added value of regional climate modeling over areas characterized by complex terrain–precipitation over the Alps. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **120**, 3957–3972, doi:10.1002/2014JD022781.
- Torrence, C., y Compo, G.P. 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **79**, 61–78.
- TradeMap. 2022. Trade statistics for international business development. Disponible en: [https://www.trademap.org/Country\\_SelProduct](https://www.trademap.org/Country_SelProduct)
- Trenberth, K. E. 1997. The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **78**, 2771–2778.
- Trenberth, K. 2021. ENSO in the global climate system. In: M. J. McPhaden., A. Santoso., A., y C. Wenju (Eds). *El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate. Geophysical Monograph*, **253**. First edition. American Geophysical Union and John Wiley y Sons, Inc. Washington, D.C, USA. ISBN 9781119548119.
- UNDRR. 2023. Base de datos de Desastres DesInventar, Costa Rica. Disponible en: <https://db.desinventar.org/DesInventar/profiletab.jsp?countrycode=cra&continue=y>

- van Loon, H., y Rogers, J. C. 1978. The seesaw in winter temperatures between Greenland and Northern Europe. Part I: General description. *Monthly Weather Review*, **106**, 296–310.
- Vantuyghem, M., Merckx, R., Stevens, B., Hood-Nowotny, R., Swennen, R., y Dercon, G. 2022. The potential of stable carbon isotope ratios and leaf temperature as proxies for drought stress in banana under field conditions. *Agricultural Water Management*, **260**, 1-12, doi:10.1016/j.agwat.2021.107247
- Vargas, A., Watler, W., Morales, M., y Vignola, R. 2017. Prácticas efectivas para la reducción de impactos por eventos climáticos en el cultivo de banano en Costa Rica. *Estudio de prácticas efectivas para adaptación de cultivos prioritarios para seguros, en Costa Rica*. CATIE, MINAE, DCC.
- Varma, V., y Bebbber, D. P. 2019. Climate change impacts on banana yields around the world. *Nature Climate Change*, **9**, 752–757, doi:10.1038/s41558-019-0559-9.
- Vichot-Llano, A., Martínez-Castro, D., Centella-Artola, A. y Bezanilla-Morlot, A. 2014. Sensibilidad al cambio de dominio y resolución de tres configuraciones del modelo climático regional RegCM4.3 para la región de América Central y del Caribe. *Revista de Climatología*, **14**, 45–62.
- Villalobos, R., y Rojas, N. 2016. Descripción del clima: Cantón de Limón. *Instituto Meteorológico Nacional*. San José, Costa Rica.
- Vimont, D. J., y Kossin, J. P. 2007. The Atlantic Meridional Mode and hurricane activity. *Geophysical Research Letters*, **34**, L07709, doi:10.1029/2007GL029683.
- Viner, D., Ekstrom, M., Hulbert, M., Warner, N. K., Wreford, A., y Zommers, Z. 2020. Understanding the dynamic nature of risk in climate change assessments—A new starting point for discussion. *Atmospheric Science Letters*, **21** (4), doi:10.1002/asl.958.
- Von Storch, H., y Zwiers, F. W. 2003. *Statistical Analysis in climate research*. Cambridge University Press. Cambridge. ISBN 978-051-161-233-6
- Wallace, J. M., y Gutzler, D. S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere Winter. *Monthly Weather Review*, **109**, 784-812.
- Wang, C., y Fiedler, P. C. 2006. ENSO variability and the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, **69** (2-4), 239-266, doi:10.1016/j.pocean.2006.03.004.
- Wang, C., Lee, S.-K., y Enfield, D. B. 2008. Climate Response to Anomalously Large and Small Atlantic Warm Pools during the Summer. *Journal of Climate*, **21** (11), 2437-2450, doi:10.1175/2007JCLI2029.1.
- Wang, W., Chen, X., Shi, P., y van Gelder, P. H. 2008. Detecting changes in extreme precipitation and extreme streamflow in the Dongjiang River Basin in southern China. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, **12**, 207–221, doi:10.5194/hess-12-207-2008.

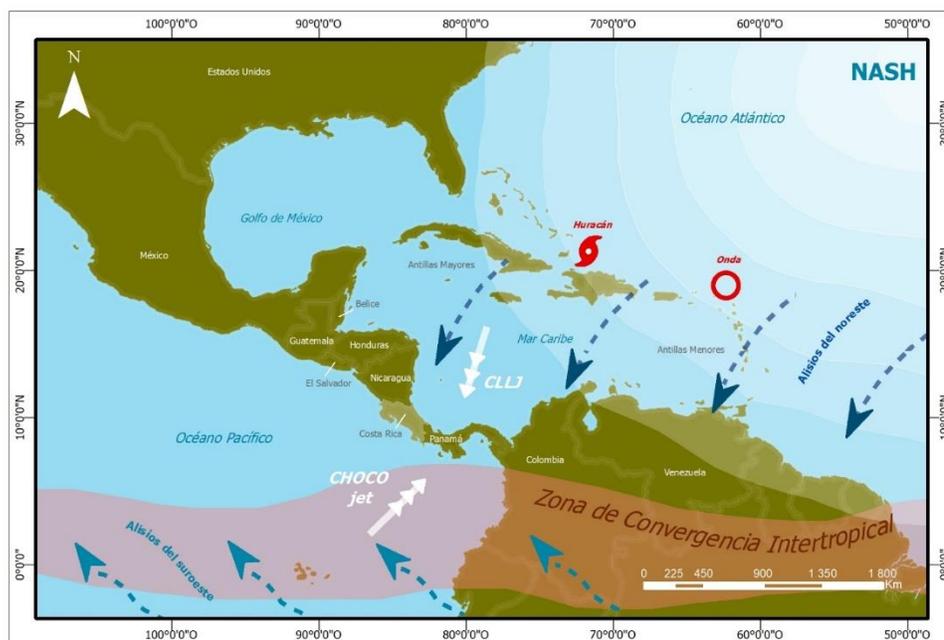
- Waylen, P. R., Quesada, M. E., y Caviedes, C. N. 1996. Temporal and spatial variability of annual precipitation in Costa Rica and the southern oscillation. *International Journal of Climatology*, **16**, 173–193.
- Webb, E. J., y Magi, B. I. 2022. The Ensemble Oceanic Niño Index. *International Journal of Climatology*, **42 (10)**, 5321–5341, doi:10.1002/joc.7535.
- Weng, H., y Lau, K. M. 1996. Low-frequency time–space regimes in tropical convection. *Theoretical and Applied Climatology*, **55**, 89–98, doi:10.1007/BF00864704.
- Wilks, D. S. 2006. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Second Edition. Elsevier Inc. International Geophysics Series, **91**. 649 pp. ISBN 978-0-12-385022-5.
- Wilson, S., Hassell, D., Hein, D. et al. 2016. *Technical Manual for PRECIS The Met Office Hadley Centre regional climate modelling system*. MettOffie, UK. Disponible en: <https://www.metoffice.gov.uk/research/applied/international/precis>
- Wolny, A.; Ogryzek, M.; Zrobek, R. 2017. Challenges, opportunities, and barriers for sustainable transport development in functional urban areas. *Environmental Engineering 10th International Conference*. Vilnius Gediminas Technical University. Lithuania, doi:10.3846/enviro.2017.126.
- WMO. 1966. Climatic Change. Technical note No. 79. *WMO-No. 195*. Report of a working group of the Commission for Climatology. Geneva, Switzerland.
- WMO. 1988. Analysing long time series of hydrological data with respect to climate variability. Technical Note No 224. World Climate Application Programme. Geneva, Switzerland.
- WMO. 2004. World Climate Programme Data and Monitoring. *WMO/TD- No. 1236*. Fourth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases. Budapest, Hungary.
- WMO. 2006. World Climate Programme Data and Monitoring. *WMO/TD- No. 1493*. Fifth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases. Budapest, Hungary.
- WMO. 2017. Directrices de la Organización Meteorológica Mundial sobre el cálculo de las normales climáticas. *WMO/TD-No. 1203*. [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=4167](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4167)
- WMO. 2018. Guía de prácticas climatológicas. *WMO/TD- No. 100*. Geneva, Switzerland.
- WMO. 2023. Guidelines on the Definition and Characterization of Extreme Weather and Climate Events. *WMO-No. 1310*. Geneva, Switzerland.
- Yang, Y., Xie, S., Wu, L., Kosaka, Y., Lau, N., y Vecchi, G. A. 2015. Seasonality and predictability of the Indian Ocean Dipole mode: ENSO Forcing and internal variability. *Journal of Climate*, **28**, 8021–8036, doi:10.1175/jcli-d-15-0078.1.

- 
- Yeh, S.-W., Cai, W., Min, S.-K., McPhaden, M. J., Dommenges, D., Dewitte, B., et al. 2018. ENSO atmospheric teleconnections and their response to greenhouse gas forcing. *Reviews of Geophysics*, **56**, 185–206, doi:10.1002/2017RG000568.
- Yue, S., y Wang, C. Y. 2002. Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test. *Water Resources Research*, **38** (6), doi:10.1029/2001WR000861.
- Zarate-Hernández, E. 2013. climatología de masas invernales de aire frío que alcanzan Centroamérica y el Caribe y su relación con algunos índices Árticos. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, **12**(1), 35-55.
- Zhang, T., Hoell, A., Perlwitz, J., Eischeid, J., Murray, D., Hoerling, M., y Hamill, T. M. 2019. Towards probabilistic multivariate ENSO monitoring. *Geophysical Research Letters*, **46**, 10532–10540, doi:10.1029/2019GL083946.
- Zhao, Z., Han, M., Yang, K., y Holbrook, N. J. 2023. Signatures of midsummer droughts over Central America and Mexico. *Climate Dynamics*, **60**, 3523–3542, doi:10.1007/s00382-022-06505-9.
- Zscheischler, J., Westra, S., Van Den Hurk, B. J., Seneviratne, S. I., Ward, P. J., Pitman, A., et al. 2018. Future climate risk from compound events. *Nature Climate Change*, **8** (6), 469–477, doi:10.1038/s41558-018-0156-3.

# ANEXOS

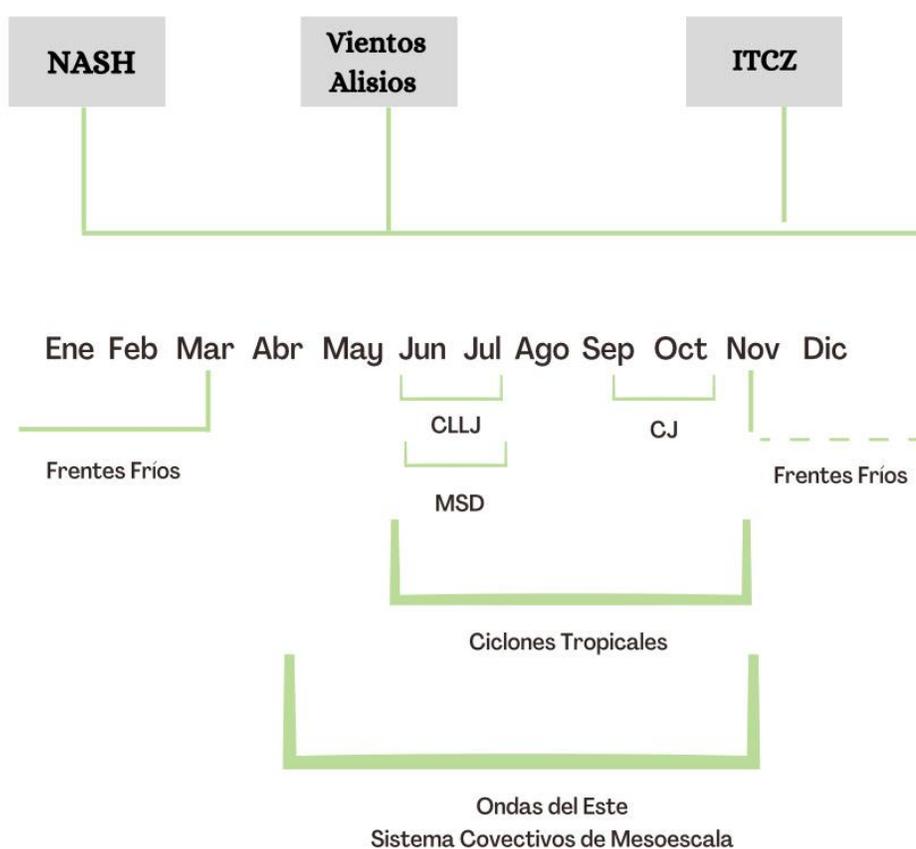
## Anexo 1: Principales patrones de circulación en Centroamérica

La [Figura 1](#) muestra una síntesis de los principales patrones de circulación en Centroamérica y su contexto espacial. Centroamérica es reconocida como una región climática única en el mundo, debido a su ubicación y forma, así como a los numerosos procesos climáticos a gran escala y a escala local que influyen en su variabilidad y cambio en una amplia gama de escalas espaciales y temporales ([Hidalgo, 2021](#)). En el diagrama se identifica la alta subtropical del Atlántico norte (NASH, por sus siglas en inglés), la cual se relaciona con los vientos alisios del noreste que influyen en la precipitación de la región. También, la zona de convergencia intertropical y su migración latitudinal, que se relaciona con el inicio y finalización de la época lluviosa en Centroamérica. Asimismo se muestra la corriente en chorro del Caribe (CLLJ, por sus siglas en inglés) y la del Chocó. Por otro lado, la influencia directa e indirecta de las ondas tropicales y de los ciclones tropicales como los huracanes en el Caribe.



**Figura 1.** Principales patrones de circulación en Centroamérica y su contexto espacial.

La **Figura 2**, muestra los principales forzantes y cómo ocurren a nivel mensual en la región, es decir, se muestra su máxima ocurrencia en el ciclo anual de la precipitación en la RTHC. Por ejemplo, el ingreso de frentes fríos a la región, tiene su máxima ocurrencia durante el invierno boreal (diciembre-febrero), mientras que las ondas y los sistemas convectivos de mesoescala ocurren en promedio entre abril-noviembre. Por su parte, la temporada de ciclones tropicales coincide con la estación cálida desde junio y se extiende hasta noviembre. La corriente en chorro del Caribe (CLLJ, por sus siglas en inglés) y la del Chocó (CJ), tienen sus picos máximos entre junio-julio y septiembre-octubre respectivamente.



**Figura 2.** Síntesis de los principales patrones de la circulación a escala regional y local en Centroamérica y su ocurrencia máxima usual en el ciclo anual. Se identifican estos patrones de manera general, aunque no están analizados en el trabajo de tesis. Significado de acrónimos: NASH (Alta subtropical del Atlántico norte); ITCZ (Zona de convergencia intertropical); CLLJ (Chorro de bajo nivel del Caribe); CJ (Chorro del Chocó); MSD (Sequía de mediados de verano), todos los anteriores por sus siglas en inglés.

## Anexo 2: Metodología de composites

El método de composites consiste en clasificar los datos en categorías según una variable  $\mathbf{z}$ , y comparar, por ejemplo, los valores medios o anomalías de otra variable  $\mathbf{V}$  según las distintas categorías de  $\mathbf{z}$ . Puede servir para identificar señales no muy fuertes que están ocultas debido a la existencia de ruido. La idea básica con los composites es construir estados típicos de  $\mathbf{V}$  condicionados al valor del índice externo, en este sentido se obtienen estimaciones del estado medio (Von Storch y Zwiers, 2003).

De acuerdo con Von Storch y Zwiers (2003), se busca formar conjuntos o categorías  $\Theta$  de la variable o índice  $\mathbf{z}$ , y estimar el valor esperado de la variable  $\mathbf{V}$ , condicionado a que  $\mathbf{z} \in \Theta$ . Formalmente, el composite está dado por la ecuación 1 donde  $\mathbf{t}$  es el tiempo:

$$V_{\Theta} = E(V_{\mathbf{t}} | \mathbf{z}_{\mathbf{t}} \in \Theta) \quad (1)$$

En la práctica, esta expresión se sustituye por el estimador (ecuación 2), donde la suma se realiza sobre los tiempos  $t_1, t_2 \dots t_k$  para los cuales  $\mathbf{z}_{t_j} \in \Theta$ :

$$V_{\Theta} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k V_{t_j} \quad (2)$$

Entonces, se entiende que un composite corresponde a un campo medio representativo de una variable según parámetros dados.

### Anexo 3: Características del cultivo de banano y su producción

El banano y las 4 principales frutas tropicales frescas (mango, piña, aguacate y papaya) desempeñan un papel vital en la producción agrícola mundial y en garantizar la nutrición y los medios de subsistencia de los pequeños agricultores de los países productores. En las últimas décadas, el aumento de los ingresos y el cambio en las preferencias de los consumidores, han facilitado un rápido crecimiento del comercio internacional de estos productos básicos (FAO, 2023). A nivel mundial, el banano (junto con el plátano) se encuentra entre los 10 primeros cultivos en términos de superficie cultivada y rendimiento (Calberto et al. 2015). Dada la importancia de este cultivo para la subsistencia y el comercio, resulta sorprendente la escasa representación del banano en las evaluaciones globales de los impactos climáticos sobre la seguridad alimentaria y nutricional (Varma y Bebbber, 2019).

Se producen alrededor de 150 millones de toneladas de banano al año, principalmente en Asia, África y América del Sur y Central (FAO, 2018; Vantighem et al. 2022). De acuerdo con la FAO (2023), para el 2022, las industrias mundiales de exportación de bananos generan unos US\$ 10,000 millones de dólares al año. Aunque solo aproximadamente el 16% de la producción mundial se comercializa en los mercados internacionales. En los países exportadores, que son en su mayoría economías de ingresos bajos o medios, los ingresos procedentes de la producción y el comercio bananero pueden pesar sustancialmente en el PIB agrícola. Por ejemplo, en Latinoamérica el banano representó alrededor del 50% de los ingresos por exportaciones agrícolas en Ecuador en 2021, mientras que las exportaciones combinadas de banano y piña en Costa Rica supusieron alrededor del 40% de los ingresos por exportaciones agrícolas. Como tal, el comercio de banano y de las principales frutas tropicales (como la piña y la papaya que también se producen en la región tropical húmeda del Caribe de Costa Rica-RTHC) tienen el potencial de generar importantes ingresos de exportación en los países productores. Por todas estas razones, es importante evaluar las condiciones climáticas de las regiones donde se desarrollan estos productos que dinamizan las economías productoras.

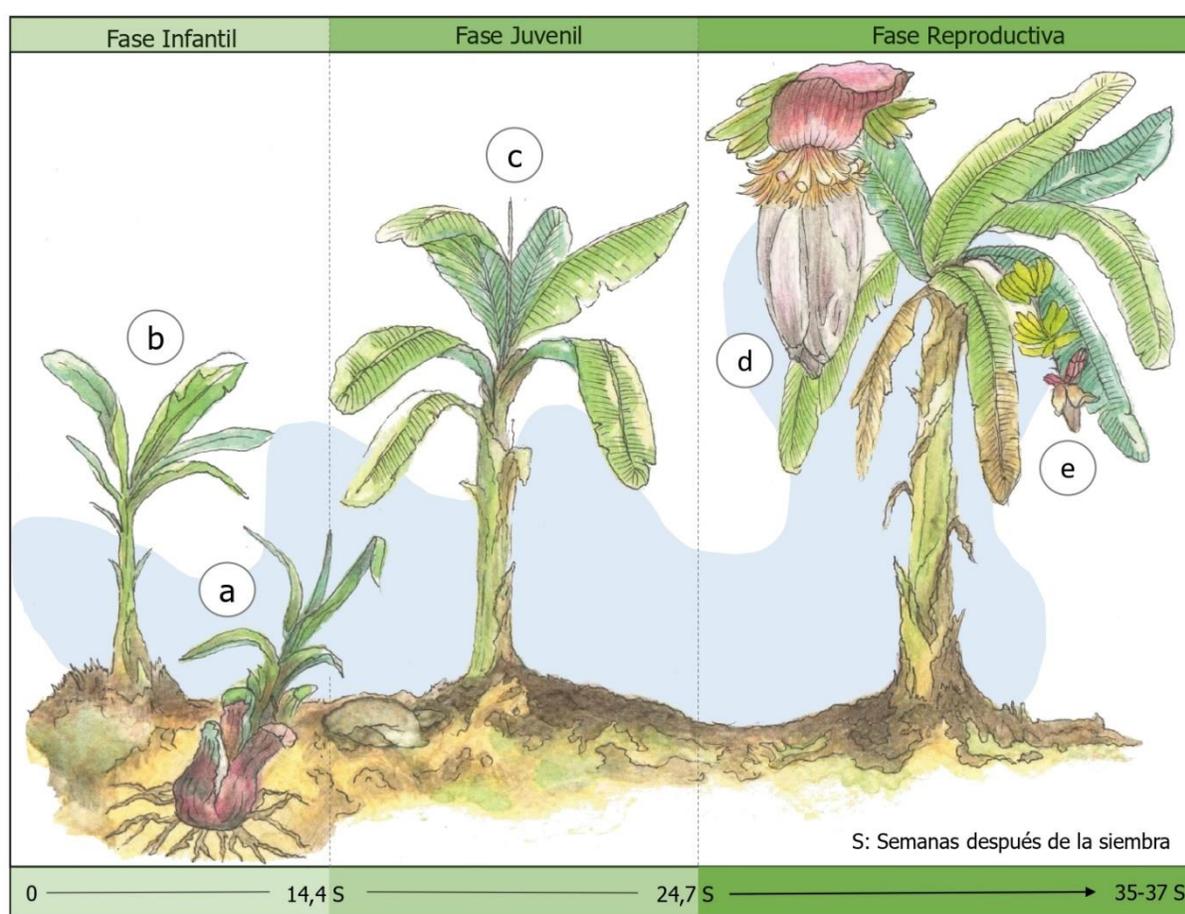
De acuerdo con [TradeMap \(2022\)](#), Costa Rica se consolidó como el cuarto exportador de banano del mundo (superado por Ecuador, Filipinas y Guatemala). Según [CORBANA \(2022\)](#) el 98% de la producción bananera para exportación se produce en la RTHC. Además, es el producto agrícola que genera mayores divisas por exportación en el país, siendo un 8 % del total de exportaciones para 2022, lo que lo convierte en el tercer producto de exportación nacional (solo superado por instrumentos de uso médico y jeringas y catéteres) ([INEC, 2022](#); [SEPSA, 2023](#)). Todo lo anterior, pone de manifiesto la importancia del estudio de la variabilidad climática de la precipitación en la RTHC y los eventos extremos.

En la RTHC la mayor problemática que enfrentan las plantaciones de banano se relacionan con los excesos lluviosos. De hecho, [Maillard \(1984\)](#) y [Soto \(2014\)](#), indican que las planicies húmedas de la RTHC y de Panamá, parecen ser las óptimas a nivel regional para el cultivo de banano, aunque presentan riesgos en los meses de mayor precipitación (noviembre-enero y julio), donde la consistencia de la lluvia satura el suelo, provocando pérdida de oxígeno y podredumbre de las raíces. Las inundaciones reportadas en los últimos años en la RTHC han provocado pérdidas de plantas y retraso en las cosechas ([Bolaños, 2019](#); [Guzmán y González, 2021](#)), ya que aunque el suelo puede permanecer inundado por un tiempo, después de 48 horas de inundación, una gran mayoría de las raíces muere, causando una producción de racimos livianos (hasta 50% de pérdida en el peso) y de dedos excesivamente cortos. Además, se acorta el tiempo que los dedos se mantienen verdes antes de madurar en postcosecha, y en otros casos se pierdan las plantas ([Ortiz-Vega et al. 1999](#)).

### **Ciclo fenológico del banano e impactos por déficits o excesos hídricos**

El ciclo fenológico para la región productiva de banano de la RTHC tiene una duración de entre 35 y 37 semanas después de la siembra (unos 9 meses a 9 meses y medio) ([Vargas et al. 2017](#)). El ciclo fenológico del cultivo se compone de 3 fases: infantil, juvenil y reproductiva ([Soto, 2014](#)) ([Figura 3](#)). La fase infantil tiene una duración aproximada de 14.4 semanas, siendo la más larga del ciclo (3 meses y medio). La etapa juvenil dura alrededor de 10.3 semanas (2 meses), ubicándose a las 24.7 semanas desde la siembra (6 meses y medio). Finalmente, la fase reproductiva que comienza con la aparición de la inflorescencia

(estructura que contiene las flores que luego serán frutos) hasta la cosecha, posee un periodo estimado de 12.3 semanas (2 meses y medio) (desde la semana 25 a la 35-37 aproximadamente), completando los 9 meses (Vargas et al. 2017). La Tabla 1 muestra una serie de impactos ante eventos climáticos extremos que poseen las plantaciones bananeras de acuerdo con su fase de desarrollo del ciclo vegetativo. Estos hallazgos se basan en el trabajo de Vargas et al. (2017), relacionados sobre prácticas efectivas para la reducción de impactos por eventos climáticos en el cultivo de banano en Costa Rica, como parte del estudio de prácticas efectivas para la adaptación de cultivos prioritarios para seguros en Costa Rica.



**Figura 3.** Fases del ciclo fenológico del cultivo de banano por semanas: **fase infantil**, a. germinación del cormo, b. planta hija; **fase juvenil**, c. planta en crecimiento con nuevas hojas a partir de la hoja F10; **fase reproductiva**, d. inicia con la inflorescencia (floración), e. aparece el fruto.

De acuerdo con [Soto \(2014\)](#) y [Vargas et al. \(2017\)](#), en las 3 fases del ciclo fenológico del banano se dan impactos de muy alta afectación por déficit hídrico y por lluvias en exceso, por un alto porcentaje de humedad relativa. No obstante, con base en la [Tabla 1](#), se identifica que, en cuanto a los excesos hídricos, los impactos por fuertes lluvias son más importantes en las fases infantil y juvenil, mientras que no aparecen en la fase reproductiva. Adicionalmente, los impactos por lluvias prolongadas se dan en las 3 fases, siendo más importantes en las fases infantil y reproductiva. En cuanto a los déficit hídricos, en la RTHC parecen ser menores a los impactos por excesos de precipitación, aunque corresponden al cuarto impacto en importancia para las fases infantil y reproductiva, y el quinto en la fase juvenil.

**Tabla 1.** Impactos por eventos extremos de precipitación (excesos o déficits) en las plantaciones de banano según la fase fenológica del ciclo vegetativo del banano. (Soto, 2014; Vargas et al. 2017).

Fases	Excesos hídricos	Déficit hídrico
Infantil	<p><b>Impactos por fuertes lluvias: segundo</b> impacto en importancia para esta fase, después de las altas temperaturas.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Pérdidas de suelo por erosión, dejando el sistema radical expuesto, lo que provoca pérdida de plantas por pudrición radical.</li> <li>-Diseminación de enfermedades de suelo que ingresan por las lesiones en las raíces, así como por salpique de gotas en hojas enfermas con presencia de esporas de Sigatoka.</li> </ul> <p><b>Impactos por lluvias prolongadas: tercer</b> impacto en importancia para esta fase.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Sobresaturación de agua en el suelo e incrementos en el nivel freático, lo que ocasiona baja disponibilidad de oxígeno en el suelo (anoxia) dificultando el desarrollo radical, la demora de actividades metabólicas y el crecimiento vegetativo.</li> <li>-Pérdidas de suelo por erosión, exposición del sistema radical, pérdida de anclaje, pudrición de raíces y en casos extremos, pérdida de unidades productivas.</li> <li>-Desbordamiento de ríos hacia las plantaciones. En esta fase el riesgo de ocasionar daños irreversibles es mayor.</li> </ul>	<p><b>Impactos por sequías: cuarto</b> impacto en importancia para esta fase.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Disminución en la disponibilidad de agua en el suelo para la planta, lo que le genera estrés hídrico, disminuyendo la absorción de nutrientes, atrasos fisiológicos y bajos rendimientos al final del ciclo, ya que existe una correlación muy estrecha entre el desarrollo vegetativo, la calidad y el tamaño de la fruta.</li> <li>-Deseccación del suelo que ocasiona compactación, aumento del grado de volatilización del fertilizante y pérdidas de plantas en áreas de renovación.</li> </ul>

	-Retraso en las aplicaciones aéreas ligadas a la protección del cultivo y la diseminación de enfermedades como la Sigatoka.	
Juvenil	<p><b>Impactos por fuertes lluvias: segundo</b> impacto en importancia para esta fase, después de las altas temperaturas.</p> <p>-Pérdidas de suelo por el impacto directo de las gotas y por el arrastre de sedimentos que pueden ocasionar la pérdida de áreas efectivas y de la capa superficial del suelo.</p> <p>-Aumento de enfermedades de suelo como <i>Erwinia</i> y enfermedades foliares como la Sigatoka.</p> <p><b>Impactos por lluvias prolongadas: cuarto</b> impacto en importancia para esta fase, después de las lluvias intensas (segundo) y los fuertes vientos (tercero).</p> <p>-Desbordamientos de ríos hacia las PB que causan inundaciones poniendo en riesgo a la plantación, a la productividad y a la salud humana. Al incrementar el nivel freático y la saturación de agua por más de 48 horas de anoxia, la planta sufre daños irreversibles por la baja disponibilidad de oxígeno.</p> <p>-El crecimiento vegetativo se paraliza y la emisión de la inflorescencia se compromete o emerge con deficiencias nutritivas y productivas, disminuyendo el rendimiento de la planta.</p> <p>-Pérdidas de suelo por erosión y exposición del sistema radical después de la llena (inundación). Pérdida de raíces necesarias para el anclaje y absorción de nutrientes, pudrición de raíces y en casos extremos, pérdida de unidades productivas.</p> <p>-Retrasos en las aplicaciones aéreas con fungicidas y elevados costos operativos al utilizar productos sistémicos de alto valor económico.</p>	<p><b>Impactos por sequías: quinto</b> impacto en importancia para esta fase.</p> <p>-Aumento en plagas insectiles como el picudo y los nemátodos principalmente <i>Radophulus similis</i> que ocasionan grandes problemas en el sistema radical y la absorción de nutrientes.</p> <p>-Desecación del suelo por déficit hídrico que ocasiona compactación y agrietamiento, lo que genera retrasos en las prácticas de fertilización, estrés hídrico dentro de la planta, disminución en la absorción de nutrientes y atraso fisiológico.</p>

<b>Reproductiva</b>	<p><b>Impactos por lluvias prolongadas: tercer</b> impacto en importancia para esta fase, después de las altas temperaturas (primero) y los fuertes vientos (segundo).</p> <p>-Aumento de enfermedades foliares como la Sigatoka, principalmente en las hojas viejas o bajas que ya cumplieron con las funciones metabólicas y son más susceptibles a la diseminación de enfermedades.</p> <p>-Sobresaturación de agua en el suelo, promoviendo la proliferación de hongos, predisposición de la planta por anoxia y pérdida de rendimiento por el bajo calibre de la fruta.</p> <p>-Caída o volcamiento de las plantas al perder firmeza, disminución en el peso del racimo o caída por peso del agua en el racimo.</p>	<p><b>Impactos por sequías: cuarto</b> impacto en importancia para esta fase.</p> <p>-Al principio de esta fase puede provocar el aborto de la inflorescencia y la pérdida de filotaxia (arrepollamiento) que afecta el desarrollo del racimo.</p> <p>-Aumento de plagas como la cochinilla y la escama. Estas plagas son importantes en esta fase, ya que se establecen dentro de los racimos, se dificulta el manejo del lavado y existen altas posibilidades de presentarse en contenedores o en los mercados meta, provocando la devolución o quema del embarque.</p> <p>-Malformaciones del racimo, reducción del calibre de los dedos, disminución del peso de los racimos o problemas de maduración temprana en el campo.</p>
---------------------	--	--

## Anexo 4: Composites de la precipitación mensual según fases del ENSO

La [Figura 4](#) sintetiza la relación entre el ciclo anual y las fases del ENSO (neutro-primer columna, El Niño-segunda columna y La Niña-tercera columna).

El primer cuatrimestre del año (enero-abril) se destaca por sus bajas precipitaciones en toda la RTHC, principalmente en marzo y abril para las 3 fases del ENSO. En enero, los años neutros y La Niña, presentan un comportamiento similar, pero con El Niño, se dan máximos sobre la cordillera (alrededor de 600mm) y en el extremo norte de la VC (entre 400-500 mm). De febrero a abril, se observan lluvias mayores con La Niña, en comparación a El Niño y a los años neutros en las subregiones del CN y NE, donde los máximos se encuentran sobre la cordillera. De manera indistinta de la fase del ENSO, la sección oeste de la RTHC coincidente con las subregiones NO y parte de NE, presenta lluvias bajas (debajo de 100mm). El CN y CS presenta lluvias por arriba de 200mm de febrero a abril cuando ocurre La Niña, y entre 100-200mm cuando se da El Niño. En marzo y abril, se identifica un gradiente oeste-este: bajas precipitaciones-por debajo de 100mm- en las subregiones NO y NE, mientras que hacia el este aumentan (entre 200-300mm).

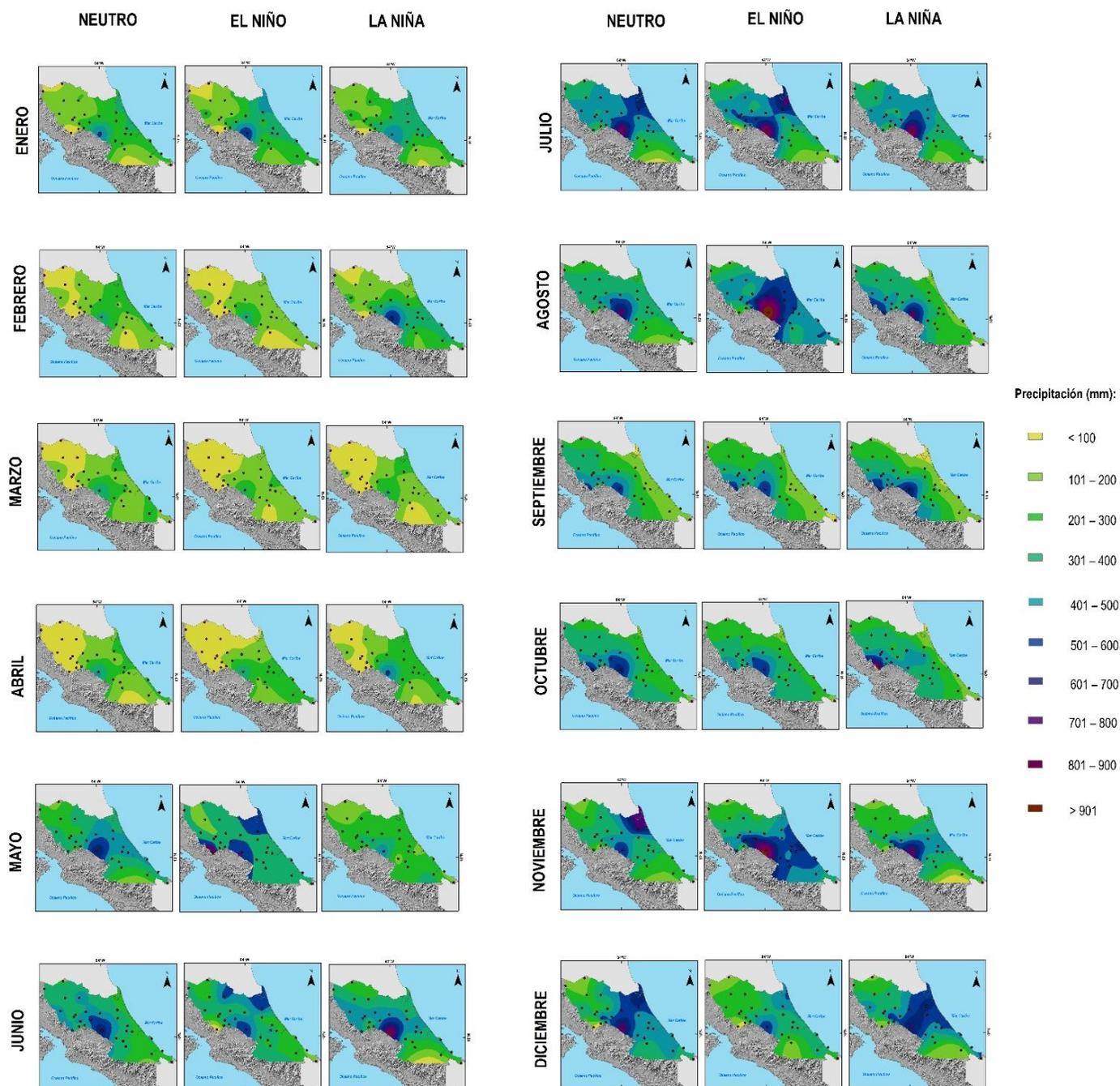
Los máximos de precipitación son evidentes entre mayo-agosto y noviembre con la ocurrencia de eventos El Niño, registrando hasta 700mm mensuales en las llanuras y más de 900mm en el área montañosa. En mayo y junio, al darse El Niño se dan lluvias más abundantes respecto a los años neutros y a La Niña, lo cual se refleja más en mayo, donde La Niña presenta disminuciones de la precipitación en el orden de 200mm para el NE y CN respecto al neutro y de 300mm en el área montañosa y extremo norte de la costa del Caribe respecto a El Niño ([Figura 4](#)). En Junio, los años neutros y La Niña presentan máximos de lluvia en la región montañosa, pero en La Niña, se da una franja de precipitaciones entre 400-500mm sobre la llanura del NE y CN que conecta hasta la costa. En el caso de eventos El Niño, se dan 3 áreas con máximos de lluvia por arriba de 600mm: extremo de la costa del Caribe y en la estación El Bum; el tercero en la cordillera (estación La Montura). En julio y agosto, los años El Niño presentaron lluvias más abundantes en la NE y CN en comparación a los neutros y La Niña. Este patrón es mayor en agosto en años El Niño, donde el CN registra lluvias por

---

arriba de 500mm para todo el mes, y la zona sobre la cordillera por arriba de 900mm. Las llanuras presentan unos 300mm de lluvia adicional a los años neutros, mientras la línea costera presenta 300mm menos que con La Niña.

En septiembre y octubre, sobresale el gradiente cordillera-costa en las 3 fases, principalmente en septiembre se observa que al darse La Niña, hay mínimos por debajo de 100mm para la costa del Caribe y máximos de 600mm en la cordillera (estaciones La Montura y Piedades Sur). En los años neutros y El Niño, el comportamiento es similar, ya que la VC presenta lluvias entre 100-200 mm. El extremo norte de la costa presenta mínimos debajo de 10 mm en años neutros, mientras que en El Niño esto se invierte al CS en Sixaola. En octubre, se sigue un comportamiento similar en las 3 fases, principalmente en las llanuras, ya que las principales diferencias se dan en la zona montañosa. Mientras los años neutros presentan máximos en Piedades Sur y La Montura (arriba de 600mm), los años El Niño los presentan en La Montura y los años La Niña en Piedades Sur.

En noviembre hay un comportamiento espacial llamativo al darse El Niño, ya que los máximos de precipitación se amplifican por toda la zona llana y costera del CN y CS, con montos entre 600-700mm, mientras lluvias por encima de 900mm en la cordillera. Se estima que en los años El Niño, la llanura caribeña experimenta aumentos en el orden de 300mm respecto a La Niña y entre 200- 30mm respecto a los neutros; en estos últimos, cambia el máximo que se da durante El Niño, ya que en el primero ocurre en el extremo norte de la vertiente (estación Cantagallo), mientras en el segundo se da sobre la cordillera (La Montura). En diciembre se dan máximos con La Niña, principalmente en el CN, apareciendo una franja característica que conecta el noreste de la costa caribeña con la cordillera en el suroeste, donde se reportan entre 500-700mm mensuales. Diciembre presenta la particularidad de que al presentarse El Niño, disminuyen las precipitaciones en el CN y CS respecto a los años neutros y aún más respecto a La Niña (Figura 4).



**Figura 4.** Composites de la precipitación mensual según la fase del ENSO: años neutros, El Niño y La Niña de manera desagregada para los periodos 1985-2009 y 1997-2019.