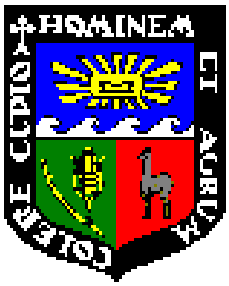
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS



"ESTIMACION DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMATICO EN LA PRECIPITACION EN LA COSTA NORTE DEL PERÚ USANDO SIMULACIONES DE MODELOS CLIMÁTICOS GLOBALES"

Presentado por:

Lucero Yakelyn Ramos Jauregui.

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE

INGENIERO METEORÓLOGO

Lima – Perú
2014

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE CIENCIAS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METEORÓLOGO 026/2014/FC

Los Miembros del Jurado que suscriben, se han reunido en la Ceremonia de Sustentación de Tesis que presenta la **Señorita Lucero Yakelyn Ramos Jauregui** titulada: **"ESTIMACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMATICO EN LA PRECIPITACION EN TUMBES USANDO SIMULACIONES DE MODELOS CLIMÁTICOS GLOBALES".**

Atendida la exposición oral y oída las respuestas a las preguntas y observaciones formuladas, se propone el cambio del título de la Tesis por: **"ESTIMACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PRECIPITACIÓN DE LA COSTA NORTE DEL PERÚ USANDO SIMULACIONES DE MODELOS CLIMÁTICOS GLOBALES".**

Por consiguiente la declaramos: APROBADA.

con el calificativo de: SOBRESALIENTE

y se acuerda que su redacción final sea publicada en una revista científica de importancia.

En consecuencia, queda en condiciones de ser calificado apta por el Consejo de Facultad y recibir el Título Profesional de: INGENIERO METEORÓLOGO

De conformidad con lo estipulado en el Art. 172° inciso "I" del Reglamento General de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

La Molina, 12 de SETIEMBRE de 2014

Ing. Franklin Unsihuay Tovar
PRESIDENTE

Mg. Sc. Armando Aramayo Bazzetti
MIEMBRO

Ing. Met. Wilmer Pulache Vilchez
MIEMBRO

Mg. Sc. Ever Menacho Casimiro
PATROCINADOR

Dr. Ken Takahashi Guevara
Co PATROCINADOR

Declaramos: Aprobado, Desaprobado
Calificativos: Regular, Buena, Muy Buena y Sobresaliente (Art 25° del Reglamento de Tesis)

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de tesis a mi madre, Myriam Jauregui, por alentarme a seguir mis sueños y ser mi apoyo y mi mayor motivación.

AGRADECIMIENTO

Me gustaría agradecer a todas las personas que formaron parte de este trabajo de investigación:

Mi familia, por su continuo apoyo y soporte.

Dr. Ken Takahashi, por ser el investigador principal del Proyecto "Impacto de la Variabilidad y Cambio Climático en el Ecosistema de Manglares de Tumbes" con financiamiento del Centro de Investigación y desarrollo internacional (IDRC). Gracias a este proyecto pude realizar esta investigación. Le agradezco además por su continuo apoyo y asesoría.

A mis amigos del Instituto Geofísico del Perú, por las discusiones útiles, sugerencias y crear un buen ambiente de investigación y crecimiento profesional. En especial a Hans Segura por su apoyo.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCION 1

1.1 Objetivo Principal 4

Objetivos Específicos 4

1.2 Problema de investigación. 5

1.3 Justificación de la investigación. 5

II. REVISIÓN DE LITERATURA 8

2.1 Conceptos Previos 8

2.2 Condiciones normales en la costa norte del Perú 13

2.3 Condiciones durante El Niño. 17

2.4 Relación empírica de la precipitación y la TSM en el presente. 19

2.5 Probables cambios de la precipitación y la TSM en el futuro. 20

2.6 Zona de convergencia intertropical 22

2.7 Modelo Climático Global (GCM) 23

2.7.1 Quinta fase del proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP5). 23

2.7.2 Experimento del presente o histórico. 25

2.7.3 Proyección del cambio climático futuro (RCP4.5) 25

2.7.4 El Niño en los GCMs 26

2.7.5 Errores de los GCMs 27

2.8 Cambio en la precipitación local y global proyectada usando GCMs. 29

2.9 Modelo Físico Empírico 31

III. MATERIALES Y METODOS 32

3.1 Datos 32
3.1.1 Datos observados 32
3.1.2 Datos de GCMs. 32
3.2 Metodología 38
3.2.1 Estimación de parámetros de la ecuación del MFE en datos observados. 38
3.2.2 Estimación de los parámetros de la ecuación del MFE en GCMs del experimento Histórico. 39
3.2.3 Estimación de parámetros de la ecuación del MFE en GCMs del experimento RCP4.5. 39
3.2.4 Ajuste del Modelo Físico Empírico 40
3.2.5 Validación del MFE 41
3.2.6 Análisis de Sensibilidad 42
3.2.7 Corrección de los errores sistemáticos de los GCMs. 44
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES 45
4.1.1 Relación empírica entre la precipitación (PP) mensual y la temperatura de la superficie del mar (TSM) mensual con datos observados. 45
4.2 Relación de temperatura superficial del mar (TSM) y la precipitación (PP) en los GCMs. 47
4.3 Resultados y análisis de los parámetros estimados y los promedios de PP y TSM. 91
4.3.1 Análisis de Tcrit y Temperatura Superficial promedio. 93
4.3.2 Análisis de la pendiente ("a"). 103
4.4 Resultado del proceso de ajuste del Modelo Físico Empírico (MFE). 107
4.4.2 Correlación Lineal 109
4.4.3 Resultados de la estimación de Monte Carlo. 114
4.5 Análisis de Sensibilidad 120
4.5.2 Análisis de la Tcrit 120

4.5.3 Análisis de la TSM 122
4.5.4 Análisis de la Pendiente 124
4.5.5 Análisis de (TSM – Tcrit) 126
4.6 Corrección y estimación del cambio de la precipitación promedio. 129
4.7 Efecto del ΔTSM en el ΔPrecipitación 140
V. CONCLUSIONES 143
VI. RECOMENDACIONES 146
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 147
VIII. ANEXOS 156

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Criterio de Clasificación Climática 13

Cuadro 2: Datos utilizados en el análisis estadístico de datos observados.....32

Cuadro 3: Modelos utilizados CMIP5. 33

Cuadro 4: Descripción de los forzamientos.....35

Cuadro 5: Forzamientos de la proyección futura para cada GCM. 36

Cuadro 6: Parámetros del MFE estimados en datos observados. 46

Cuadro 7: Lista de Modelos 70

Cuadro 8: Resultados de los parámetros estimados además de la TSM promedio, la PP promedio estimado con el MFE y PP promedio de cada GCM correspondiente al experimento del Presente para Tumbes. 87

Cuadro 9: Resultados de los parámetros estimados además de la TSM promedio, la PP promedio estimado con el MFE y PP promedio de cada GCM correspondiente al experimento del Presente para Piura. 88

Cuadro 10: Resultados de los parámetros estimados además de la TSM promedio, la PP promedio estimado con el MFE y PP promedio de cada GCM correspondiente al experimento del futuro para Tumbes.....89

Cuadro 11: Resultados de los parámetros estimados además de la TSM promedio, la PP promedio estimado con el MFE y PP promedio de cada GCM correspondiente al experimento del Futuro para Piura. 90

Cuadro 12: Diferencias de TSP promedio y Tcrit para modelo con buen ajuste en Tumbes....98

Cuadro 13: Diferencias de TSP promedio y Tcrit para modelo con buen ajuste en Piura. 99

Cuadro 14: Comparación entre el cambio de Tcrit y el cambio de TSM promedio en los modelos con buen ajuste.....101

Cuadro 15: Intervalo de confianza de la Temperatura Crítica (Tcrit) para el escenario del presente y futuro en Tumbes. Estos se han obtenido de la estimación de Monte Carlo, donde p2.5 es el percentil 2.5 y p97.5 es el percentil 97.5.....118

Cuadro 16: Intervalo de confianza de la Temperatura Crítica (Tcrit) para el escenario del presente y futuro en Piura. Estos se han obtenido de la estimación de Monte Carlo, donde p2.5 es el percentil 2.5 y p97.5 es el percentil 97.5.....119

Cuadro 17: Cambio de PP para Tumbes en modelos con buen ajuste, sin y con cambio de pendiente.....133

Cuadro 18: Cambio de PP para Piura en modelos con buen ajuste, sin y con cambio de pendiente.....135

Cuadro 19 : Resultados de la corrección de la precipitación con y sin cambio de la pendiente. 136

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Climatología mensual de la precipitación para las estaciones de El Salto-Tumbes y Piura-CORPAC y la temperatura superficial del mar con datos provenientes de la NOAA ERSST-V3b. 14

Figura 2: Condiciones Normales de la Costa Norte del Perú. Figura modificada a partir de Katerina Goubanova. 15

Figura 3: Condiciones durante El Niño. Realizado por Darwin C. Rojas. 17

Figura 4: Promedio anual- mensual de las condiciones normales de a. la TSM y b. la precipitación para la zona tropical. c. El promedio de la TSM y d. precipitación durante los eventos El Niño. Los datos de TSM fueron descargados de la NOAA ERSSTV3b y los datos de precipitación descargados del TRMM 3V43, ambos variables para el periodo 1998 – 2005. Las unidades de precipitación (mm/mes) y de TSM (°C) 19

Figura 5 Lluvias mensuales en Piura vs Temperatura Superficial del Mar frente a Lobos. Modificado a partir de Woodman, 1999. 20

Figura 6: Clasificación de los escenarios de acuerdo a su grado de forzamiento radiativo. Fuente: figura modificada a partir de IPCC 2013. 26

Figura 7: Error que muestran los modelos en la precipitación promedio mensual anual (mm/mes) del clima presente. 28

Figura 8: Promedio anual-mensual (mm mes-1) de 1968 a 2005 correspondiente al modelo GISS-E2-H del CMIP5. 29

Figura 9: Zona de Estudio. 45

Figura 10: Diagramas de dispersión entre : la TSM (82 °W 4°S) y PP en el Salto (3.4°S 80.32°W) en la izquierda y la TSM (82 °W 6°S) y PP en Piura (5.2°S 80.6°W) en la derecha. 46

Figura 11: Diagrama de dispersión entre TSM y PP para modelos con buen ajuste para Tumbes. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro. 49

Figura 12: Diagrama de dispersión entre TSM y PP para modelos con buen ajuste para Tumbes. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro. 50

Figura 13: Diagrama de dispersión entre TSM y PP para modelos con buen ajuste para Tumbes. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro. 51

Figura 14: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos con relativo ajuste para Tumbes. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro. 51

Figura 15: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos con relativo ajuste para Tumbes. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro. 52

Figura 16: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos con relativo ajuste para Tumbes. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro. 53

Figura 17: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos con relativo ajuste para Tumbes. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro. 54

Figura 18: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos con relativo ajuste para Tumbes. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro. 55

Figura 19: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos con relativo ajuste para Tumbes. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro. 56

Figura 20: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos eliminados para Tumbes. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro. 56

Figura 21: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos eliminados para Tumbes. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro. 57

Figura 22: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos eliminados para Tumbes. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro. 58

Figura 23: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos eliminados para Tumbes. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro. 59

Figura 24: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos con buen ajuste para Piura. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro....60

Figura 25: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos con buen ajuste para Piura. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro....61

Figura 26: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos con buen ajuste para Tumbes. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro. 62

Figura 27: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos con relativo ajuste para Piura. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro....62

Figura 28: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos con relativo ajuste para Piura. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro....63

Figura 29: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos con relativo ajuste para Piura. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro....64

Figura 30: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos con relativo ajuste para Piura. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro...65

Figura 31: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos con relativo ajuste para Piura. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro...66

Figura 32: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos eliminados para Piura. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro. 67

Figura 33: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos eliminados para Piura. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro. 68

Figura 34: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos eliminados para Piura. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro. 69

Figura 35: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Tumbes de los modelos con buen ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios. 71

Figura 36: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Tumbes de los modelos con buen ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios. 72

Figura 37: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Tumbes de los modelos con buen ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios. 73

Figura 38: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Tumbes de los modelos con relativo ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios. 74

Figura 39: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Tumbes de los modelos con relativo ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios. 75

Figura 40: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Tumbes de los modelos con relativo ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios. 76

Figura 41: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Tumbes de los modelos con relativo ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios. 77

Figura 42: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Tumbes de los modelos con relativo ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios. 78

Figura 43: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Tumbes de los modelos con relativo ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios. 79

Figura 44: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Piura de los modelos con buen ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios. 79

Figura 45: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Piura de los modelos con buen ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios. 80

Figura 46: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Piura de los modelos con buen ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios. 81

Figura 47: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Piura de los modelos con relativo ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios. 82

Figura 48: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Piura de los modelos con relativo ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios. 83

Figura 49: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Piura de los modelos con relativo ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios. 84

Figura 50: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Piura de los modelos con relativo ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios. 85

Figura 51: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Piura de los modelos con relativo ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios. 86

Figura 52: Regresión Lineal entre la PP promedio de cada GCM versus PP promedio estimado a partir del MFE. Para los experimentos Histórico (presente) y RCP4.5 (futuro). 91

Figura 53: Dispersión entre el cambio de PP promedio (Futuro menos Presente) de los GCM y el cambio de PP promedio estimado con el MFE para Tumbes y Piura. Los modelos con

relativo ajuste están identificados con círculos mientras que los de buen ajuste con otros marcadores. 92

Figura 54 : Dispersión entre la Tcrit versus la PP promedio de los GCMs. 94

Figura 55: Dispersión de la Tcrit del presente y Futuro versus la PP promedio de los GCMs. 95

Figura 56: Dispersión del cambio de Tcrit y el cambio de precipitación de los GCMs. 96

Figura 57: Dispersión entre la diferencia de TSM promedio y la Tcrit versus la PP promedio de cada GCM. Para Tumbes y Piura en el experimento del presente. La estrella muestra la diferencia observada. 97

Figura 58: Dispersión entre el cambio de la diferencia de TSM y la Tcrit estimada versus el cambio de PP de cada GCMs. 100

Figura 59: Dispersión entre el cambio de Tcrit y el cambio de TSM promedio para Tumbes y Piura. 102

Figura 60: Dispersión de la pendiente estimada de los GCMs y la PP promedio para el experimento del presente. El valor observado es la estrella. 104

Figura 61: Dispersión entre la diferencia de pendiente (futuro menos presente) y la PP promedio de los GCMs para Tumbes y Piura. 105

Figura 62: Comparación de parámetros estimados con datos de GCMs y los estimados con datos observados para Tumbes. 106

Figura 63: Comparación de parámetros estimados con datos de GCMs y los estimados con datos observados para Piura. 107

Figura 64: Error relativo de la PP estimada con el MFE. 108

Figura 65: Serie temporal de la PP mensual, promedio DEF y promedio anual. En azul datos de GCMs en verde PP estimada con el MFE. “r” es el coeficiente de correlación lineal o de

Pearson. HadGEM2-ES corresponde a un modelo con buen ajuste mientras que MIROC4h a uno con relativo ajuste. 110

Figura 66: Coeficientes de Correlación mensual, promedio de diciembre, enero y febrero (DEF), promedio anual entre la PP estimada con el MFE y sus análogos en los GCMs. Los números del eje x corresponden a la numeración de los modelos y en el eje "y" están los coeficientes. Los marcadores diferentes a círculo son los que tienen buen ajuste además de buena correlación. 111

Figura 67: Igual que la figura 66 pero para Piura. 112

Figura 68: Igual que la figura 66 pero para Tumbes del escenario del futuro. 113

Figura 69: Igual que la figura 66 pero para Piura del escenario del futuro. 114

Figura 70: Resultado de la estimación de Monte Carlo para dos submuestras (líneas negras) de un modelo con relativo ajuste (CESM1-CAM5) y uno buen ajuste (HadGEM2-AO). Los parámetros estimados de las submuestras son: Tcrit 1, Tcrit 2, "a1" y "a2". Tcrit y "a" son los parámetros estimados con el total de datos. 115

Figura 71: Histogramas de los 10000 estimados de Tcrit obtenidos de la estimación de Monte Carlo. "a" es un modelo con relativo ajuste (CESM1-CAM5) y "b" uno con buen ajuste (HadGEM2-AO). Los ejes del histograma corresponden a la Tcrit (eje x) y la frecuencia (eje y del lado izquierdo). La barra horizontal de color negro es el intervalo confianza de la Tcrit que varía del percentil 2.5 hasta el percentil 97.5. Los círculos sombreados es la Tcrit estimada con todos los datos para el escenario del presente (verde) y el escenario del futuro (rosa). La curva corresponde a función de densidad de probabilidad de la TSM de los GCMs. Los ejes de la curva corresponden a la TSM (eje x) y la probabilidad (eje y del lado derecho). Los diamantes sombreados corresponden a la TSM promedio de cada modelo para cada escenario respectivamente y en diferente color. 116

Figura 72: Sensibilidad de Tcrit. Dispersión entre el cambio de PP de los GCM y el cambio de PP estimado con la ecuación 4 y 5. 121

Figura 73: Sensibilidad de TSM. Dispersión entre el cambio de PP de los GCM y el cambio de PP estimado con la ecuación 4 y 6. 123

Figura 74: Sensibilidad de la pendiente. Dispersión entre el cambio de PP de los GCM y el cambio de PP estimado con la ecuación 4 y 7. 125

Figura 75: Sensibilidad de la diferencia de TSM y Tcrit. Dispersión entre el cambio de PP de los GCM y el cambio de PP estimado con la ecuación 3 y 7. 127

Figura 76: Para el eje x se estimó el cambio de la precipitación con respecto al presente para Tumbes. La PP estimada del futuro fue estimada manteniendo todo constante (igual que la PP estimada del presente) solo variando un parámetro, la leyenda muestra el parámetro que se cambió en cada caso siguiendo la metodología del análisis de sensibilidad. PP GCM es el cambio de la precipitación de los GCMs y PP MFE es el cambio de la precipitación estimada con todos sus parámetros. 128

Figura 77: Igual que la Figura 76 pero para Piura. 129

Figura 78: Intervalo de los cambios de los parámetros estimados usando datos de los GCMs, para Tumbes. 130

Figura 79: Intervalo de los cambios de los parámetros estimados usando datos de los GCMs, para Piura. 130

Figura 80: Relación de Pendientes entre el experimento del presente y del futuro.....131

Figura 81: Dispersión entre Cambio de la precipitación de los GCMs versus el cambio estimado de la PP corrigiendo los errores pero manteniendo la pendiente observada constante (arriba) y cambiando la pendiente (abajo). Para Tumbes. 132

Figura 82: Dispersión entre Cambio de la precipitación de los GCMs versus el cambio estimado de la PP corrigiendo los errores pero manteniendo la pendiente observada constante (arriba) y cambiando la pendiente (abajo). Para Piura. 134

Figura 83: Cambio de PP (mm/mes) en Tumbes. 137

Figura 84: Cambio de PP (%) en Tumbes. 137

Figura 85: Cambio de PP (mm/mes) en Piura. 139

Figura 86: Cambio de PP (%) en Piura. 139

Figura 87: Cambio absoluto de la PP promedio global por grado de calentamiento global. .. 140

Figura 88: Gráfico de dispersión entre el cambio porcentual de la PP local en Tumbes (a) y Piura (b) con el cambio de TSM. Además en c y d se muestra el cambio porcentual de la pendiente por grado de calentamiento. Solo para modelos con buen ajuste. 141

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Resultados de la estimación de los coeficientes de correlación para Tumbes. 156

Anexo 2: Resultados de la estimación de los coeficientes de correlación para Piura 157

Anexo 3: Resultados de la estimación del Método de Monte Carlo para Tumbes. La barra de color negro muestra el intervalo de confianza inicia en el percentil 2.5 y termina en el percentil 97.5. El eje izquierdo corresponde a la frecuencia de eventos de Tcrit y el eje x es Tcrit. 158

Anexo 4: Resultados de la estimación del Método de Monte Carlo para Piura. La barra de color negro muestra el intervalo de confianza inicia en el percentil 2.5 y termina en el percentil 97.5. El eje izquierdo corresponde a la frecuencia de eventos de Tcrit y el eje x es Tcrit. 162

Anexo 5: Intervalo de confianza de la pendiente ("a") para el escenario del presente y futuro en Tumbes. Estos se han obtenido de la estimación de Monte Carlo, donde p2.5 es el percentil 2.5 y p97.5 es el percentil 97.5. 167

Anexo 6: Intervalo de confianza de la pendiente ("a") para el escenario del presente y futuro en Piura. Estos se han obtenido de la estimación de Monte Carlo, donde p2.5 es el percentil 2.5 y p97.5 es el percentil 97.5. 168

RESUMEN

La Costa Norte del Perú caracterizada como una zona árida puede llegar a sufrir de intensas precipitaciones debido al calentamiento del mar durante los eventos El Niño. Se conoce que existe una relación no-lineal entre la temperatura superficial del mar (TSM) y la precipitación en los trópicos: para que ocurra precipitación convectiva es necesario que la TSM exceda un valor crítico, de manera que el aire pueda ascender y romper la capa de inversión térmica que controla la estabilidad atmosférica e impide la formación de tormentas. Se espera que este valor crítico aumente bajo escenarios de cambio climático debido al calentamiento de la atmosfera tropical.

La generación actual de modelos climáticos proyectan aumento en la lluvia promedio en la costa norte pero estos modelos presentan grandes sesgos positivos de la TSM y precipitaciones en la costa de Sudamérica. Considerando la relación no lineal de la precipitación y temperatura, es probable que estos sesgos sobreestimen la estimación de los cambios futuros de la precipitación en esta región.

Para evitar los errores sistemáticos de los modelos, proponemos un modelo empírico que relaciona la precipitación y la TSM mensual observada en la costa norte del Perú. En este modelo, la precipitación incrementa linealmente con la TSM sobre la Temperatura Crítica (Tcrit) y es cero bajo esta. El modelo empírico reproduce bien los resultados de la mayoría de los GCM y cuando se evitan los sesgos correspondientes, se encuentra que el cambio de precipitación futuro varía en un rango de entre 0 y 60% en los últimos cincuenta años del siglo XXI. Esto se traduce en un incremento de 22mm en Tumbes y 8mm en Piura.

Palabras Clave: Temperatura umbral, Estabilidad atmosférica.

ABSTRACT

The northwestern of Peru is characterized which is characterized as an arid zone, may experience strong rainfall due to El Niño warming events. It is known that there is a non-linear relationship between sea surface temperature (SST) and precipitation (PP) in the tropics: to convective precipitation occur is necessary that the SST exceeds a critical value, so air can move up and break the inversion layer that controls the atmospheric stability and prevents the formation of storms. It is expected that this critical value increases under scenarios of climate change due to warming of the tropical atmosphere.

The current generation of climate models projects an increase in average rainfall the northwestern coast, but these models have large positive biases of SST and rainfall alongshore of South America. Considering the nonlinear relationship of precipitation and temperature, these biases are likely to overestimate the estimated future changes in precipitation in this region.

To correct this effect, we propose an empirical model (MFE) relating monthly precipitation and SST observed in the northern coast of Peru. In this model, precipitation increases linearly with SST over the critical temperature (Tcrit) and the otherwise is cero. The empirical model reproduces well the results of most of the GCM. As the corresponding biases are corrected the change of future precipitation varies in a range between 0 and 60% in the last fifty years of this century. This translates into an increase of 22mm in Tumbes and 8mm in Piura

Keywords: threshold temperature, atmospheric stability.

I. INTRODUCCION

En enero del 2014 el Panel Gubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) publicó su último reporte concluyendo que es evidente la influencia humana en el sistema climático. Esta influencia ha sido a través de la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) que ha sido responsable de que en los últimos 30 años exista un calentamiento en la superficie terrestre. Este incremento de temperatura en la atmósfera también ha sido advertido en los océanos y a su vez ha resultado en un incremento del nivel del mar, observado en el siglo XX (IPCC, 2013). En este reporte también se indica que si continúa la emisión de GEI se espera que cause un mayor calentamiento a lo registrado y aún más cambios en los componentes del sistema climático (Thomas Stocker del IPCC 2013).

La herramienta más importante para explorar la posible evolución futura del clima son los Modelos Climáticos Globales (GCMs). Con ayuda de estos modelos se puede identificar la evolución de variables climáticas como la temperatura, precipitación, vientos y entre otros, a escala global y con escenarios basados en diferentes concentraciones de GEI que pudiera haber en el futuro. En esencia, los modelos climáticos consisten en integraciones numéricas de ecuaciones que describen la dinámica atmosférica (Wilks 2006) y oceánica; es decir, son aproximaciones a las ecuaciones de estado y estimaciones empíricas (conocidas como parametrizaciones) de los procesos que no se puede resolver (porque ocurren en una escala física bastante reducida) o que carecen de datos (Schmidt 2007). Debido a estas parametrizaciones y aproximaciones existe diferencia y mucha incertidumbre entre los GCMs para el cambio de precipitación regional a lo largo de los trópicos (Meehl et al. 2007; Rowell 2012).

La comparación de simulaciones globales con observaciones, sugiere que los modelos son bastante fiables en la reproducción de las características del clima a gran escala (por ejemplo la célula de Hadley, la circulación en latitudes medias, entre otros). Además, en los últimos años los GCMs han mejorado la capacidad para simular variables como la temperatura

superficial del mar (TSM) y la precipitación (PP). Sin embargo, el conocimiento de los procesos físicos de pequeña escala asociados con a la interacción entre el océano y la atmósfera aún es limitado.

Uno de los errores más comunes en la mayoría de GCMs, es la llamada Doble Zona de Convergencia Intertropical (DZCIT), cuya causa aún sigue siendo compleja (Lin 2007, Hwang y Frierson 2013). Algunos estudios han atribuido el origen de este error a la pobre representación de los procesos de retroalimentación (Lin 2007). Por ejemplo: las nubes bajas, la no realista TSM umbral que conlleva a precipitación intensa o tipo convectiva (Bellucci et al 2010), los vientos a lo largo de Chile y Perú (Echevin 2011) y la orografía de la Cordillera de los Andes (Zheng et al. 2010). Además la sobrestimación sistemática de la TSM (4 - 10°S) que conlleva a errores en la representación de cobertura nubosa en los trópicos (Li y Xie 2011).

El capítulo catorce del último reporte del IPCC muestra el cambio climático futuro a nivel regional. Los cambios de precipitación proyectados para Sudamérica en los últimos treinta años del siglo XXI muestran una tendencia positiva en el noroeste del Perú y Ecuador. Sin embargo, esta tendencia tiene una baja confianza (IPCC 2013). Held (2006) estimó que el cambio de precipitación global por grado de temperatura en los GCMs es 2 por ciento. Según la ecuación de Clasius-Clapeyron (relaciona la presión de vapor de saturación del agua con la temperatura), el cambio de vapor de agua o humedad en la atmósfera es de 7 por ciento por grado de temperatura. Esta razón de cambio de humedad (7 por ciento) debería estar relacionada con el cambio de precipitación local o regional si es que se considera a esta cantidad de vapor como máxima (Vecchi 2006). Debido a esta razón aquellos lugares caracterizados con precipitaciones intensas tendrían aún más lluvia en el futuro mientras que las secas tendrían aún menos. (IPCC 2013).

La Costa Norte del Perú, pese a estar ubicada en los trópicos, se caracteriza climáticamente como desértica y con baja TSM cercana a su costa. Sin embargo, es representada por los GCMs como una zona lluviosa y con alta TSM cercana a la costa. Este es un problema que ha perdurado a lo largo de los últimos veinte años (Mechoso et al. 1995, Yu y Mechoso 2000, Meehl et al. 2007, Dai 2006, Lin 2007, Randall et al. 2007). Se conocen cuáles son los factores que dificultan la buena representación de variables en esta zona y cuáles son los

procesos físicos que caracterizan a nuestra zona de estudio. Esto nos provee algunas herramientas suficientes que permiten la identificación de estimaciones erróneas de precipitación.

Aunque la a costa norte del Perú es considerada una zona con clima árido y seco (Centro de Predicción numérica del Tiempo, CPNT - IGP) puede experimentar lluvias muy fuertes asociadas a eventos de El Niño. En condiciones normales la TSM cercana a la costa es baja (21°C en promedio) debido al afloramiento de aguas frías. Además, la cobertura de nubes estratocúmulos gran parte del año es otra importante característica del clima de la costa norte del Perú. Estas nubes se forman sobre los océanos con TSM relativamente frías y bajo una fuerte inversión térmica que limita el ascenso de aire en la capa límite (Klein y Hartman 1993) e inhiben la precipitación. Por otro lado, la TSM cercana a la costa se incrementa durante El Niño, lo que resulta en una desestabilización de la atmósfera, favoreciendo la precipitación convectiva.

Debido a esta relación no lineal observada entre la TSM y la PP, planteamos el uso de un Modelo Físico Empírico (MFE) (Xie y Philander 1994). Este modelo tiene dos condiciones, la primera condición es cuando la TSM tiene valores por encima de la temperatura umbral o crítica (Tcrit) y la segunda cuando está por debajo. En el primer caso habrá PP cuantificada con la relación de dos parámetros estimados, Tcrit y pendiente. Y en el segundo caso la PP será cero. De forma aproximada la Tcrit está relacionada con la estabilidad atmosférica, es decir si la TSM es lo suficientemente alta y mayor a la Tcrit habrá convección e inestabilidad (lluvia). No se consideró la temperatura del aire para estimar la estabilidad del aire debido a que esta varía en un pequeño rango por encima de la capa de inversión (700mb) (Klein 1993). Por lo tanto, la Tcrit estimada con el MFE es un buen indicador de la estabilidad atmosférica y por lo tanto de convección profunda. Por otra parte, la pendiente proviene del ajuste lineal de la TSM y la PP a partir de la Tcrit, este parámetro nos da información de la sensibilidad de la atmósfera a cambios ligeros de TSM por encima de la Tcrit.

Usamos datos de TSM y PP provenientes de modelos acoplados que forman parte de la quinta fase del proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP5) para dos escenarios, presente (1968 – 2005) y futuro (2050 – 2100). Con ayuda del MFE se estimaron los parámetros (Tcrit y pendiente) necesarios para estimar la PP. Las relaciones entre los

parámetros observados y producto de los modelos ayudaron a reconocer las variables a las que los GCMs son sensibles. Lo más importante, este MFE permitió estimar el cambio de PP promedio evitando los errores sistemáticos de los GCMs.

1.1 Objetivo Principal

El objetivo principal de este estudio es estimar el cambio futuro de la precipitación mensual en la costa norte del Perú basado en los CMIP5, usando la relación observada entre cantidad de lluvia y temperatura superficial del mar (TSM) y evitando los errores sistemáticos de los modelos globales.

Objetivos Específicos

Los objetivos específicos son los siguientes:

a. Estimar los parámetros de la ecuación del MFE, TSM umbral y pendiente haciendo uso de datos observados de precipitación en la estación meteorológica de El Salto (Tumbes) y la estación del aeropuerto de Piura (CORPAC) y datos de TSM provenientes de la NOAA (ERSST V3b).

b. Estimar los parámetros del MFE y evaluar relación entre la TSM cercana a la costa y PP mensual en Tumbes y Piura con datos obtenidos de los CMIP5 para el periodo de datos observados que es el escenario del presente.

c. Estimar los parámetros del MFE y evaluar relación entre la TSM cercana a la costa y PP mensual en Tumbes y Piura con datos obtenidos de los CMIP5 para el periodo del futuro (2050 – 2100) que es el escenario del futuro.

d. Estimar el cambio (diferencia del futuro y presente) de los parámetros del MFE, la TSM promedio usando los resultados obtenidos del objetivo b y c.

e. Utilizando los cambios de los parámetros del MFE proyectados por los GCMs, estimar el cambio de PP agregándolos al MFE observacional.

1.2 Problema de investigación.

Se ha planteado como problema principal:

¿Cuál es el efecto del incremento de la TSM debido al cambio climático por el incremento de gases efecto invernadero sobre la precipitación en la Costa Norte del Perú?

1.3 Justificación de la investigación.

Entender el clima y el cambio climático contiene muchas preguntas no solo para científicos sino para la sociedad en general. Se sabe que la continua emisión de GEI causará aún mayor calentamiento de la temperatura del aire lo que a su incrementará a su vez la TSM (IPCC 2014). Pero ¿cuál es la respuesta del sistema climático a este cambio de la TSM en nuestra zona de estudio? y para ser más precisos ¿cuál es su impacto en la PP a nivel regional? son las principales preguntas que iniciaron esta investigación. Para responder a estas preguntas se identificaron los principales mecanismos y procesos físicos a los que responde el clima de la costa Norte del Perú y su variabilidad. Partiendo de las relaciones observadas entre la PP y TSM buscamos estimar el cambio de PP promedio de manera más confiable usando información útil de los GCMs.

Los GCMs nos ayudan a identificar y estimar la evolución previsible de variables climáticas a escala global y regional. Si esas proyecciones se confirman, los modelos - y lo más importante, con sus presunciones subyacentes – se hacen más creíbles (Schmidt 2007). Pese a que se ha mejorado la comprensión de muchos de los mecanismos que contribuyen al cambio climático, aún estos son limitados (la estimación en la intensidad del forzamiento futuro, sensibilidad climática, mecanismos de retroalimentación, y más) lo que somete a incertidumbres la estimación de los cambios a escala global y, más aún, a escala regional.

Por otro lado el nivel de acuerdo entre los GCMs en la proyección futura de la precipitación regional a lo largo de los trópicos es bajo e incluso incierto en algunas

regiones (Meehl et al. 2007; Rowell 2012). Según Held y Soden (2006) un incremento del transporte de humedad conllevaría a más sequedad en las regiones secas y más húmedas a las regiones húmedas en ausencia de compensación con cambios en la circulación (Chou et al. 2010).

A pesar de que estos modelos son solo aproximaciones, sus respuestas tienen bases físicas y matemáticas. En este estudio se usó estas respuestas climáticas de los GCMs frente a un cambio climático debido a un incremento de GEI en la atmósfera. Sin embargo las proyecciones de procesos a lo largo de la Costa Norte del Perú son difíciles de hacer con precisión debido al debilitamiento de la amplitud y variabilidad en la superficie de la circulación atmosférica sobre esta región (Echevin 2012).

Existen dos hipótesis contrarias que afectan a nuestra costa en un clima futuro más cálido debido al incremento de CO2 en la atmósfera. Por un lado se señala que los vientos a lo largo de la costa del Perú deberían incrementar su velocidad, debido a una intensificación de contraste termal entre el mar (caliente) y la tierra (frío), lo que favorecería el afloramiento (Bakun 1990, Bakun y Weeks 2008, Bakun et al. 2010). Por otro lado, se espera un debilitamiento en la intensidad de los vientos alisios en el pacífico oriental debido al debilitamiento de la circulación de Walker que es proyectada por los GCMs (Vecchi y Soden 2007).

En tal sentido, el enfriamiento regional costero entre el centro/sur de Perú y el norte de Chile podría ser consistente con la intensificación del anticiclón del pacífico Sur (Falvey y Garreaud 2009) mientras que a menores latitudes predominaría la señal de macro escala (Dimitri 2011). Las propiedades del agua que aflore dependerán del tipo de estratificación a lo largo de la columna de agua. A corto plazo, década venidera, es más probable la persistencia de las condiciones de enfriamiento costero relativas al calentamiento global, especialmente en la zona centro-sur. Conforme el plazo es mayor (cambio climático futuro) y a medida que la reducción de las emisiones no sea mitigada, el escenario de debilitamiento de las surgencias costeras y de calentamiento generalizado parece tener más posibilidades de imponerse (Dimitri 2011).

La proyección futura de la precipitación depende de muchos procesos y factores a diferentes escalas espaciales y temporales; sin embargo, debido a su incertidumbre se propuso el uso de un modelo empírico. Este modelo físico empírico (MFE) simplifica la estimación de la precipitación con parámetros que tienen significado físico-atmosférico; su formulación parte de relaciones observadas entre la TSM cercana a la costa y la precipitación en la superficie. De esta forma se logra una mejor proyección de la precipitación futura, en la que el calentamiento del mar solo será debido al incremento de GEI, sin considerar eventos El Niño u otros tipos de calentamiento como por ejemplo ondas Kelvin.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Conceptos Previos

Estas definiciones se relacionan con el tema y fueron extraídas del Glosario del último reporte del IPCC publicado el año 2014.

Sistema climático.- Es el sistema de alta complejidad que consta de cinco componentes principales: la atmósfera, la hidrósfera, la criósfera, la litósfera y la biósfera, y las interacciones entre ellos. El sistema climático evoluciona en el tiempo bajo la influencia de su propia dinámica interna y debido a forzamientos externos como volcánica erupciones, las variaciones solares y forzamientos antropogénicos como los cambios en la composición de la atmósfera y el cambio de uso (IPCC 2013).

Variabilidad Climática.- Se refiere a las variaciones en el estado medio y otras estadísticas (como la desviación estándar, la ocurrencia de extremos, y más) del clima o en una escala temporal y espacial más allá de individuales eventos del tiempo. La variabilidad puede ser debido a procesos internos del sistema climático (variabilidad interna), o a variaciones externas o forzamiento externo antropogénico (variabilidad externa) (IPCC 2013).

Capa limite atmosférica. También llamada capa límite planetario, es la capa inferior de la troposfera que está en contacto con la superficie de la tierra. Esta capa adyacente a la superficie de la tierra es afectada por la fricción, trasportes de calor y otras variables cercanas a la superficie. La profundidad varía entre el día y la noche, pero básicamente es hasta donde se sienten los efectos de la superficie (IPCC 2013).

Convección.- Movimiento vertical impulsado por fuerzas de flotabilidad derivados de la inestabilidad estática. Usualmente sucede cuando la capa cercana a la superficie se calienta o el tope de nubes se enfría radiativamente. La convección atmosférica da incremento de nubes cúmulos y precipitación (IPCC 2013).

Cambio Climático.- Se refiere a un cambio del estado del sistema climático que puede ser identificado (por ejemplo, mediante el uso de pruebas estadísticas) por los cambios en la media y / o la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, típicamente décadas o más. El cambio climático puede deberse a los forzamientos naturales procesos internos o externos, como modulaciones de los ciclos solares, las erupciones volcánicas y los cambios antropogénicos persistentes en la composición de la atmósfera o en el uso del suelo. Según el Marco Convención sobre el Cambio Climático (CMNUCC por sus siglas en inglés), en su artículo 1, define el cambio climático como: "un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables ". Así pues, la CMNUCC establece una distinción entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la atmósfera composición y variabilidad climática atribuible a causas naturales.

Incertidumbre.- Es un estado de conocimiento incompleto que puede resultar de una falta de información o de un desacuerdo sobre lo que es conocido o incluso conocible. Esto puede tener algunos tipos de fuentes, la imprecisión en la data hacia ambiguos conceptos definidos o terminología, o incertidumbre en las proyecciones del comportamiento antropogénico. Esta puede ser representada por medidas cuantificadas o por enunciados cualitativos. (Moss 2010)

Forzamiento Radiativo.- Es el cambio neto, hacia abajo menos hacia arriba, del flujo radiativo (expresado en W/m2) en la tropopausa o en el tope de la atmósfera debido al cambio en un impulso externo de cambio climático. Este impulso por ejemplo podría ser un cambio en la concentración de CO2 en la atmósfera o un cambio de la radiación que sale del sol.

Escenario.- Una descripción plausible de cómo puede desarrollarse el futuro basado en un conjunto coherente e internamente consistente de supuestos sobre clave que conducen a las fuerzas (por ejemplo, la tasa de cambio tecnológico, los precios) y las relaciones. Tenga en cuenta que los escenarios no son ni predicciones ni pronósticos, pero son útiles para proporcionar una visión de las consecuencias de los avances y acciones (IPCC 2013).

Escenario de Emisión.- Es una plausible representación del futuro desarrollo de emisiones de sustancias que son potencialmente radiactivamente activas (por ejemplo, GEI, aerosoles). Están basadas en un coherente y consistente conjunto de supuestos sobre fuerzas impulsoras (como demográfica y desarrollo socioeconómico, cambio en la tecnología) y sus relaciones clave. La concentración de escenarios, derivan de escenarios de emisión, estos son usados como datos de entrada en el modelo climático para estimar proyecciones climáticas. Los nuevos escenarios de emisión para el cambio climático, son los cuatro RCP (por sus siglas en inglés Representative Concentration Pathways), estos fueron desarrollados por, pero independientemente de, la presente evaluación del IPCC (IPCC 2013).

Escenario Climático.- Es una representación plausible y a menudo simplificada del clima en el futuro, sobre la base de un conjunto internamente coherente de relaciones climatológicas que se ha construido para el uso explícito en la investigación de las posibles consecuencias del cambio climático antropogénico, sirviendo a menudo como entrada para impactar modelos. Las proyecciones climáticas sirven a menudo como la materia prima para la construcción de escenarios climáticos, pero los escenarios climáticos generalmente requieren información adicional, como clima actual observado. Un escenario climático de cambio es la diferencia entre un escenario climático y el clima actual (IPCC 2013).

Proyección climática.- Es la simulada respuesta del sistema climático a un escenario de emisión o concentración de GEI y aerosoles, generalmente obtenidas usando modelos climáticos. Las proyecciones del clima se distinguen de las predicciones del clima por su dependencia de escenarios de emisión/concentración/forzamiento radiativo que se ha usado, los cuales son obtenidos de supuestos. Por ejemplo, las concentraciones de dióxido de carbono son predominantemente una función de la economía, la tecnología, y el crecimiento de la población, y son mucho más difíciles de predecir que el clima. Por lo tanto los escenarios de emisión de dióxido de carbono están sujetos a más incertidumbre y aún más las proyecciones climáticas. Otro ejemplo, es si el futuro socioeconómico y los desarrollos de tecnología pueden darse en el futuro, pero también pueden que no (IPCC 2013).

Resolución.- En los modelos climáticos, este término se refiere a la distancia física (metros o grados) entre cada punto en la grilla usada para estimar las ecuaciones. La resolución espacial se refiere al paso del tiempo entre cada cálculo o estimación de las ecuaciones (IPCC 2013).

Parametrización.- En los modelos climáticos, este término se refiere a la técnica de representación de procesos que pueden no ser explícitamente resueltos a una resolución temporal o espacial del modelo (procesos dentro de la malla o celda). Las variables resueltas por el modelo tienen coherencia con la escala temporal y espacial, pero dentro de esta escala existen procesos que no son representados y que solo son aproximados o parametrizados (IPCC 2013).

Modelo Climático Global (GCM).- Es una representación numérica del sistema climático basado en propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes, sus interacciones y procesos de retroalimentación, y contabilización de algunas de sus propiedades conocidas. El sistema climático puede ser representado por modelos de diferente complejidad. Difieren en el número de escalas espaciales, en el grado en el que son representados explícitamente los procesos físicos, químicos y biológicos o el nivel en el que las parametrizaciones físicas son involucradas. Un Modelo Océano – Atmósfera de Circulación General proporciona una representación del sistema climático igual a la anterior definición. Hay una evolución hacia más complejos modelos con interacción química y biológica. Estos modelos son aplicados como una herramienta de investigación para estudiar y simular el clima, y para propósitos operacionales, incluyendo predicciones mensuales, estacionales e interanuales.

Los principales componentes del sistema climático tratados en un modelo climático son:

- El componente atmosférico, que simula nubes y los aerosoles, y juega un papel importante en el transporte de calor y el agua en todo el mundo.
- El componente oceánico, que simula el movimiento y la mezcla actual y biogeoquímica, ya que el océano es el dominante reservorio de calor y carbono en el sistema climático.
- El componente de hielo marino, que modula la absorción de la radiación solar y de calor aire-mar y los cambios de agua.

Los GCMs dividen el mundo en una rejilla tridimensional de celdas que representan ubicaciones y elevaciones geográficas específicas. Cada uno de los componentes tiene ecuaciones calculadas sobre la red global para un conjunto de variables climáticas. Hay dos

tipos de procesos simulados dentro de los modelos climáticos que se utilizan: las resueltas o simuladas y los parámetros. Un proceso simulado podría ser un ciclón tropical mientras que un proceso parametrizado sería uno que representa la nube. En el caso de parametrizaciones estas son formulaciones físicas, que pueden hacer uso de los datos observados (GFDL, 2011).

Ensemble. - Es una colección de simulaciones de un modelo caracterizando una predicción o proyección climática. Las diferencias en las condiciones iniciales y la formulación del modelo resultan en diferentes evoluciones del sistema modelado. Estas pueden dar información con incertidumbre asociada con el error del modelo y error en las condiciones iniciales en el caso de pronóstico climático. Además resulta en incertidumbres asociadas con el error del modelo y con la variabilidad climática interna del modelo generado en el caso de proyecciones climáticas (IPCC 2013).

Inicialización del modelo.- Un pronóstico climático típicamente procede por interacción de un modelo climático para un tiempo posterior partiendo de un estado inicial que está destinado a reflejar el estado actual del sistema climático. Las observaciones disponibles del sistema climático son "asimiladas" en el modelo. La inicialización es un complejo proceso que es limitado por observaciones disponibles, errores observacionales y, dependiendo del procedimiento utilizado, puede ser afectado por incertidumbre en la historia del forzamiento climático. Las condiciones iniciales pueden contener errores que se incrementa tanto como el pronóstico progresa limitando de este modo el tiempo por el cual el pronóstico será útil (IPCC 2013).

Modelo del Sistema Tierra.- Conocido como ESM (por sus siglas en inglés, Earth System Model). Es un modelo acoplado de circulación general océano – atmósfera en el que una representación del ciclo del carbono es incluido, permitiendo un cálculo interactivo de CO2 o emisiones compatibles. Son incluidos componentes adicionales como química atmosférica, cobertura de hielo, vegetación dinámica, ciclo del nitrógeno, y también modelos urbanos (IPCC 2013).

Retroalimentación Climática.- Una interacción en la cual una perturbación en una cantidad climática causa un cambio en un segundo, y el cambio en la segunda cantidad últimamente conlleva a un adicional cambio en el primero. Una retroalimentación negativa es una en el cual

la perturbación inicial es debilitada por los cambios en sus causantes; una positiva es una en la que la perturbación inicial incrementa (IPCC 2013).

Retroalimentación de Nubes.- Una retroalimentación climática envuelve cambios de las propiedades en alguna de las propiedades de las nubes. Estas nubes responden al cambio de la temperatura superficial del mar local o global. Entender la retroalimentación de nubes y determinar su magnitud y signo requiere un entendimiento de como un cambio en el clima puede afectar el espectro de tipo de nubes, la fracción de nubes y su altura, las propiedades radiativas de las nubes, y finalmente el balance de radiación neta. Actualmente, las retroalimentaciones de nubes permanecen en una amplia fuente de incertidumbre (IPCC 2013).

2.2 Condiciones normales en la costa norte del Perú

De acuerdo a la clasificación climática elaborado por el Centro de Predicción Numérica del Tiempo y Clima del Instituto Geofísico del Perú; Tumbes, se caracteriza como muy cálido, árido y oceánico; mientras que Piura como cálido, desértico y oceánico (Cuadro 1). Pese a ubicarse en la región tropical cercana al ecuador (4-5°S) la precipitación anual promedio en Tumbes (37 mm mes^{-1}) y Piura (14 mm mes^{-1}) es casi despreciable comparada a otras regiones tropicales.

Cuadro 1: Criterio de Clasificación Climática

Por temperatura	
Muy frío	Temperatura media anual inferior a 0°C.
Frío	Temperatura media anual entre 0 y 10°C.
Templado	Temperatura media anual entre 10 y 20°C.
Cálido	***Temperatura media anual entre 20 y 25°C.***
Muy cálido	***Temperatura media anual superior a 25°C.***
Por amplitud de la temperatura	
Oceánico	***Ampitud térmica anual inferior a 10°C.***
Moderado	Ampitud térmica anual entre 10 y 20°C.
Continental	Ampitud térmica anual superior a 20°C.
Por precipitación	
Desértico	***Cantidad anual de precipitación inferior a 250 mm.***
Árido	***Cantidad anual de precipitación entre 250 y 500 mm.***
Moderadamente lluvioso	Cantidad anual de precipitación entre 500 y 2000 mm.
Excesivamente lluvioso	Cantidad anual de precipitación superior a 2000 mm.

Fuente: Centro de Predicción Numérica del Tiempo y Clima (CPNTC) del Instituto Geofísico del Perú (IGP).

La Figura 1 ilustra el promedio multianual de precipitación acumulada mensual para la estación de El Salto en Tumbes y la estación de Piura que pertenece a la Corporación Peruana de Aeropuertos y Aviación Comercial (CORPAC). El promedio multianual de precipitación correspondiente al periodo de estudio (1968 a 2005) es 443.5 mm año^{-1} para El Salto y 167.4 mm año^{-1} para Piura.

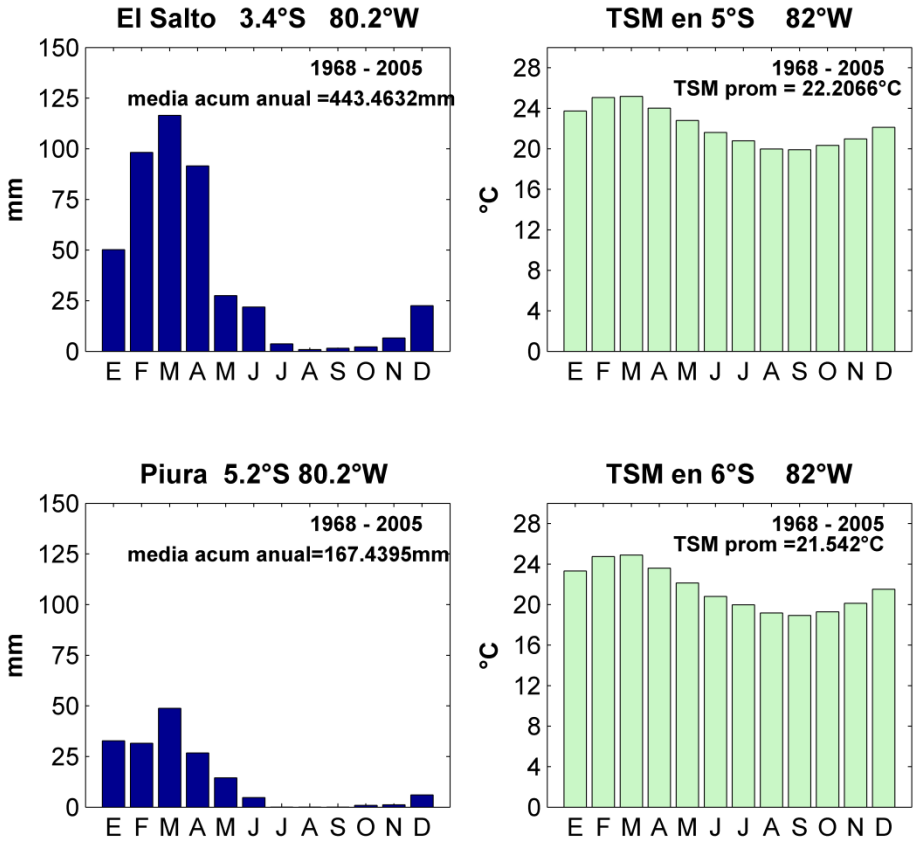


Figura 1: Climatología mensual de la precipitación para las estaciones de El Salto-Tumbes y Piura-CORPAC y la temperatura superficial del mar con datos provenientes de la NOAA ERSST-V3b.

La costa norte del Perú, en la que se encuentra Tumbes y Piura, presenta un clima con condiciones desérticas, gran uniformidad y estabilidad atmosférica, alto grado de humedad en la capa límite atmosférica durante casi todo el año, y además de una ininterrumpida capa de estratos que cubren gran parte de la costa debido a la capa de inversión dominante a lo largo de la costa (Prohaska 1973).

La explicación física de su variabilidad y condición atmosférica estable es debido a la TSM cercana a las costas y a la inversión térmica, presente en las costas orientales del Pacífico. La temperatura del mar (Figura 2) es fría cerca de la costa debido a los vientos alisios que producen un afloramiento de aguas profundas y baja temperatura -afloramiento costero- (Prohaska 1973). Por otro lado, la inversión térmica es una función de la subsidencia y calentamiento adiabático inducido (compresión del aire) por encima de la capa de inversión térmica y enfriamiento radiativo por debajo.

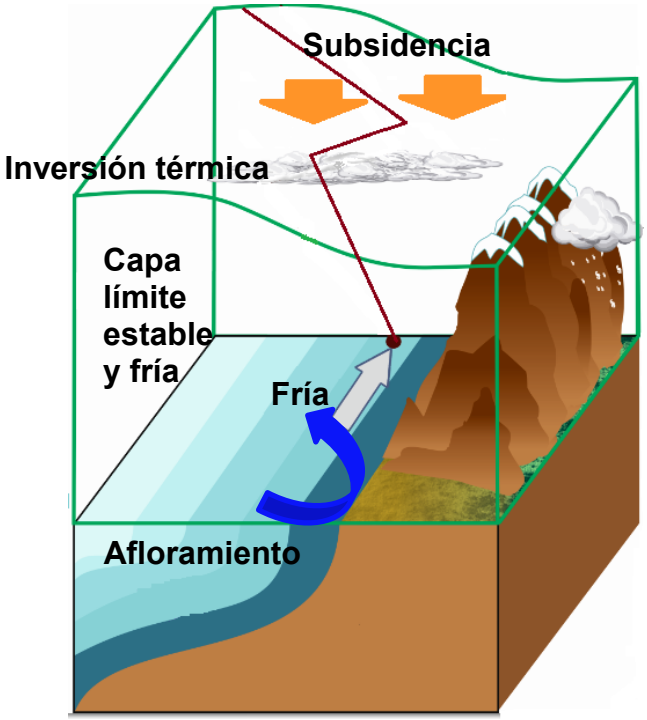


Figura 2: Condiciones Normales de la Costa Norte del Perú. Figura modificada a partir de Katerina Goubanova.

Así, la inversión térmica constituye una "tapa" entre la capa atmosférica cercana a la superficie y la que está por encima (Prohaska 1973). Este contraste de temperatura inhibe movimientos verticales lo que incrementa la inversión térmica y conlleva a la formación de nubes estratocúmulos que no conlleva a lluvia significativa y no permite el ingreso de energía solar a la superficie del mar cerca a la costa peruana. Klein y Hartmann (1993) notaron que la cobertura de nubes de bajos niveles tiene una correlación positiva con la estabilidad atmosférica, y que en la costa es principalmente controlada por cambios de la TSM en tiempo de escala estacional.

Por otra parte la atmósfera de la troposfera libre tropical (encima de la capa límite) no mantiene fuertes gradientes de presión y sus anomalías de temperatura llegan a ser uniformemente distribuidas sobre toda la región en escalas de tiempo de uno a dos meses (Charney 1963, Schneider 1977, Held y Hou 1980, Sobel y Bretherton 2000). Esta capa de atmósfera se caracteriza por ser caliente debido al excedente de energía proveniente del sol. Además, en promedio también existe aún más calentamiento adiabático en las regiones donde hay subsidencia de gran escala (cielos despejados) asociado a la célula de Hadley y a la circulación de Walker.

Entonces, el promedio de la temperatura tropical por encima de la capa límite, es mayor a la temperatura por debajo. Esto ocurre a lo largo de la costa del Perú y es lo que intensifica la capa de inversión haciendo que la cantidad de precipitación sea insignificante e inusual a pesar de estar ubicada en una latitud tropical. Además, la temperatura de la troposfera libre en la región tropical está relacionada con el promedio de la TSM en el pacífico central (Vecchi y Soden 2007). En la costa norte del Perú, la temperatura por encima de 700mb está muy bien correlacionada positivamente con la TSM promedio del Pacífico Central, mientras que la temperatura del aire cercano a la superficie lo está con la TSM cercana a su costa (Takahashi 2010). Entonces, la estabilidad atmosférica depende básicamente de dos efectos, cambios remotos y locales de TSM.

A pesar de que la costa norte del Perú presenta una fuerte estabilidad atmosférica, existen periodos de tiempo en la cual la atmósfera de desestabiliza y contribuye a la formación de nubes convectivas. Estos periodos de tiempo están relacionados con la variabilidad interanual de la costa norte del Perú y está dominada por la ocurrencia de "El Niño". Por ejemplo, la precipitación acumulada en la estación de Piura ubicada en el departamento de Piura alcanzó 1909 mm de agosto de 1997 a julio de 1998 y en el mismo periodo de 1982-1983 fue de 2148 mm (CPNTC).

2.3 Condiciones durante El Niño.

La costa norte del Perú puede llegar a experimentar intensas precipitaciones asociadas a altos valores de TSM, debido a los eventos El Niño (Woodman 1999, Takahashi 2004, Douglas et al. 2009). La Figura 3 ilustra las condiciones del océano y atmósfera durante esta condición.

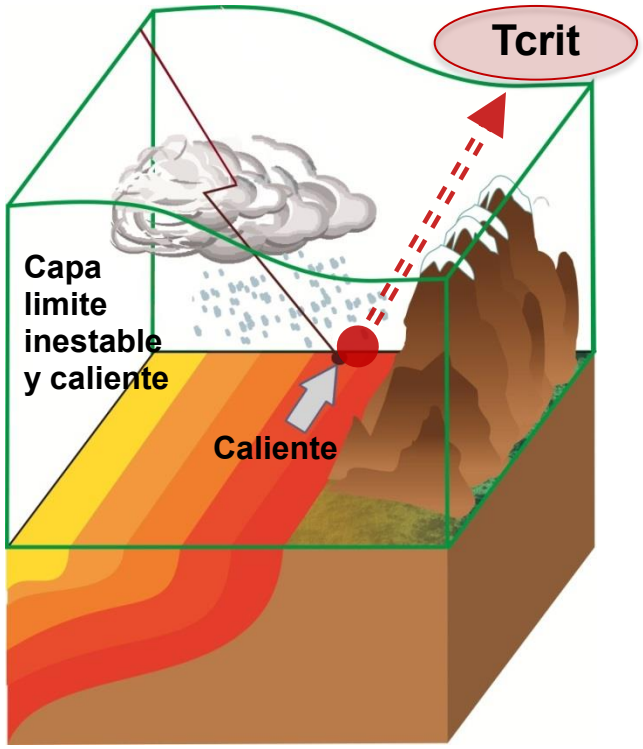


Figura 3: Condiciones durante El Niño. Realizado por Darwin C. Rojas.

La explicación física por la que llueve intensamente es debido a que el calentamiento local de la TSM actúa como un desestabilizador de la atmósfera (Vecchi. y Soden 2007), lo que favorece la convergencia de bajos niveles y el ascenso del aire húmedo de niveles bajos para dar lugar a la formación de nubes convectivas que desencadenan en precipitaciones intensas. (Lindzen y Nigam 1987).

A pesar de que altos valores de TSM pueden desencadenar precipitaciones intensas no es una condición suficiente, si la subsidencia de mayor escala es mayor, la precipitación no ocurre (Graham y Barnet 2013). Sobre una amplia región del Pacífico, un exceso de TSM de 27.5°C es requerido para que la convección profunda ocurra (Graham y Barnet

2013). Así Woodman (2009) encontró que la precipitación de Tumbes y Piura tiene alta correlación con la TSM cercana a sus costas.

La TSM durante los eventos de El Niño llega a valores sobre el promedio normal alcanzando los 27º -28ºC e incluso 29ºC en condiciones extremas (Woodman 1999). La temperatura umbral, llamada temperatura crítica (Tcrit) de aquí en adelante, fue encontrada en trabajos anteriores y que según Woodman (1999) es aproximadamente 25.5°C. Empíricamente se plantea que si la TSM supera la Tcrit se experimenta precipitaciones intensas como en cualquier otro país tropical.

La climatología mensual de la TSM elaborada con datos de NOAA ERSST para el periodo de 1968 – 2005 muestra una TSM promedio de 22°C cercana a la costa de Tumbes y Piura, y el promedio multianual de PP con datos del TRMM (1998 – 2013) es menor a 50mm mes-1 . En la Figura 4 (a y b) se muestra las condiciones normales de precipitación y TSM. Sin embargo las condiciones cambian con el evento El Niño. La TSM llega a incrementar hasta más de 26°C y la PP hasta más de 400mm mes-1 como se observa en la Figura 4 (c y d).

En este estudio no se pretende que el calentamiento del mar y la PP sea similar a una condición de El Niño, sino más bien es una forma de visualizar lo que sería el clima del futuro, frente a un calentamiento de la TSM debido al cambio climático.

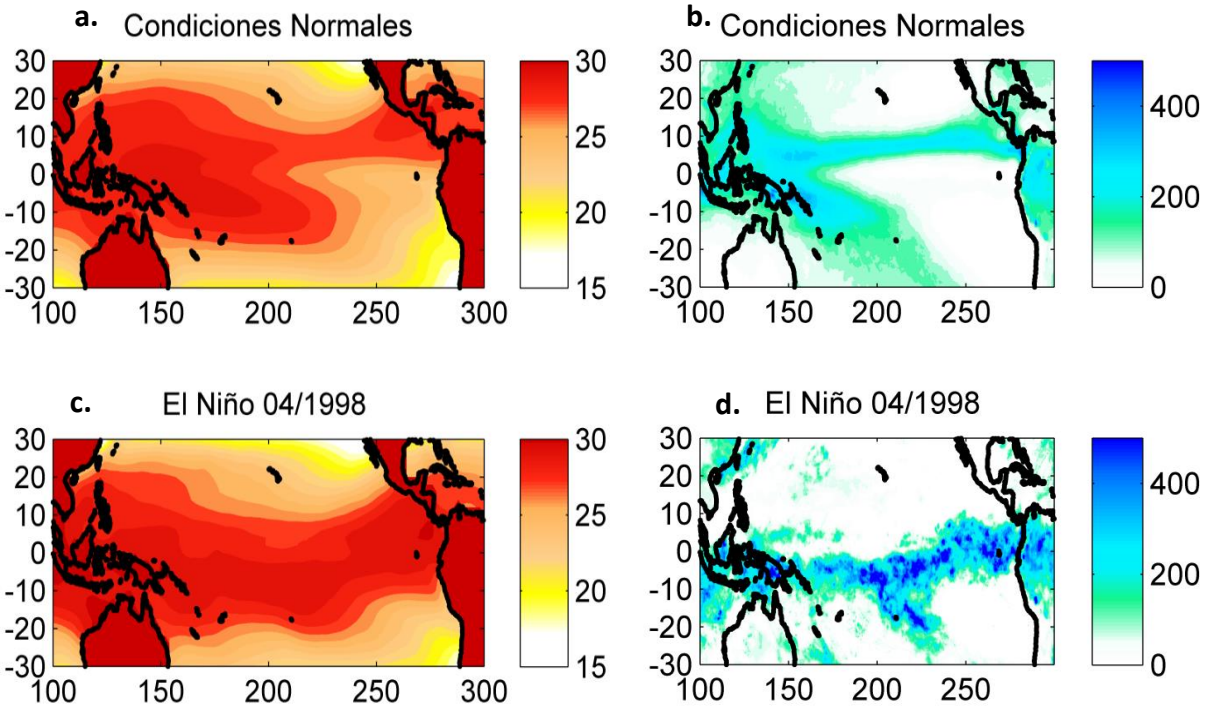


Figura 4: Promedio anual- mensual de las condiciones normales de a. la TSM y b. la precipitación para la zona tropical. c. El promedio de la TSM y d. precipitación durante los eventos El Niño. Los datos de TSM fueron descargados de la NOAA ERSSTV3b y los datos de precipitación descargados del TRMM 3V43, ambos variables para el periodo 1998 – 2005. Las unidades de precipitación (mm/mes) y de TSM (°C)

2.4 Relación empírica de la precipitación y la TSM en el presente.

En la Figura 5 se muestra la dispersión y correlación estadística de la dependencia de las lluvias de la TSM frente a sus costas. Para esta figura se han tomado datos de precipitación acumulada mensual ocurrida en Piura durante 15 años y la TSM en la Isla Lobos de Tierra. La ubicación de estos puntos se debe a que la TSM frente a Lobos explica con buena correlación la PP en Piura. Algo similar se observa con la TSM cercana a la costa de Tumbes hasta Chicama (costa norte del Perú). Claramente se observa que si la TSM es menor a 25.5°C casi no llueve y si lo hace esta es menor a 30 mm mes-1 y al contrario si sobrepasa este valor, la

precipitación incrementa drásticamente con el incremento de TSM. Cuando ésta llega a los 28ºC las precipitaciones son bastante intensas. La relación observada entre PP y TSM es no lineal como se evidencia en la Figura 5, partiremos de esta relación para establecer la ecuación del Modelo Físico Empírico posteriormente.

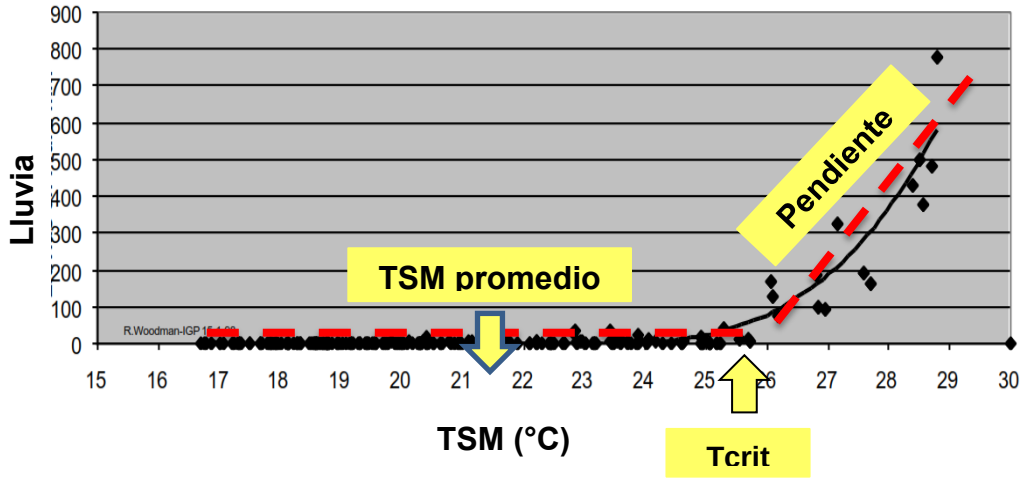


Figura 5 Lluvias mensuales en Piura vs Temperatura Superficial del Mar frente a Lobos. Modificado a partir de Woodman, 1999.

La relación lineal de la precipitación con la TSM a partir de una Tcrit es solo una aproximación, porque como ilustra la Figura 5 esta relación se parece más a una curva. Se escogió esta relación lineal como una forma simplificada de estimar la precipitación, debido a que solo contiene dos parámetros que representan procesos físicos asociados a la precipitación de la costa norte del Perú. Uno de estos es la Tcrit y el otro es la pendiente. Esta Tcrit es un indicador de estabilidad atmosférica (de manera simple sería diferencia de temperatura entre 700mb).

2.5 Probables cambios de la precipitación y la TSM en el futuro.

Es bien sabido que el clima global ha experimentado un cambio sostenido en los últimos cien años debido a la acción del hombre, para los siguientes cien años se espera que los cambios sean hasta diez veces mayor, pero además durante los cien años anteriores el clima ha presentado variaciones naturales de magnitud comparable o mayor lo que coloquialmente dificulta *"separar el trigo de la paja"* (Takahashi 2010).

Ya que no conocemos cual será el posible cambio del clima en el futuro no podemos estimar de forma precisa el cambio de la precipitación, pero podemos usar salidas de modelos climáticos globales que resuelven de forma aproximada las ecuaciones que expresan las leyes físicas fundamentales al clima a las que además se incluye el forzamiento radiativo producto de la emisión de GEI por la actividad humana. Esta herramienta no solo nos proporciona una aproximación sino que además tiene alta incertidumbre, es así que conociendo cuales son los procesos físicos actuales del clima de la costa norte del Perú podemos inferir cuales serían los cambios ubicándonos en diferentes casos.

Estudios previos como el de Takahashi (2010) señala la hipótesis de que el calentamiento local y el remoto de la TSM tienen efectos opuestos en la lluvia estacional en la costa Norte del Perú, tanto para datos observados como para resultados del modelado. Es muy probable que haya un incremento de la temperatura debido a los GEI, sin embargo no se sabe si este calentamiento será uniforme (Bakun 1990, Falvey y Garreaud 1999). Además la precipitación en la región tropical es proyectada y sometida a cambios en la magnitud y también a cambios en los patrones espaciales como respuesta al incremento de GEI (Meehl et al. 2007).

A manera de nota, cabe resaltar que el calentamiento remoto (por ejemplo, calentamiento del Pacífico Central) influye en el calentamiento de la troposfera media y alta, lo que intensifica la subsidencia y por lo tanto la capa de inversión de la costa. Por otro lado el calentamiento local se refiere al calentamiento cercano a la costa, esto sí desestabiliza el perfil térmico y puede causar la precipitación.

Resultados recientes de un modelo global acoplado (GFDL/NOAA) muestra que si se cuadruplica el CO2 la TSM del Pacífico Tropical incrementaría de 4°C - 5°C. Entonces, el gradiente zonal de TSM a lo largo del ecuador disminuiría en 20 porciento a finales del año 2100. Esto disminuiría los vientos y las corrientes asociadas a la circulación de Walker lo que disminuiría la subsidencia en el pacifico oriental y podría causar mayor precipitación (Knutson y Syuro Manabe, 1995).

Aún existe mucha incertidumbre con respecto a los resultados debido a los errores de los GCMs. Pero lo que sí es certero es el calentamiento del mar a mayor escala conllevará a un incremento de la temperatura en la troposfera libre. Si esto ocurre la intensificaría la inversión

térmica cercana a la Costa Norte del Perú. Entonces, el incremento o disminución de la precipitación en Tumbes y Piura dependerá de cuanto se caliente la temperatura cercana a la costa.

En un primer caso, si la TSM cercana a la costa incrementase en menor medida que la temperatura media de la troposfera por encima de la capa límite perdurarían las condiciones normales de precipitación. Es decir habrá poca cantidad de lluvia. En un segundo caso, si el incremento de TSM fuera mayor al de la temperatura sobre la capa límite las condiciones de inestabilidad serían las predominantes y habría más precipitación. Sin embargo esto no es tan simple como se está planteando ya que la precipitación depende además de otros factores a otras escalas de tiempo y el espacio, pero como simple aproximación podemos establecer los dos posibles casos.

2.6 Zona de convergencia intertropical

La zona de convergencia intertropical (ZCIT) es una estrecha banda zonal alargada de gran convergencia de viento de bajo nivel, nubosidad y gran precipitación producto de fuerte calentamiento solar, evaporación y convección en los océanos tropicales y continentes marítimos (Potter y Colman 2003). Una de las características mostradas por la ZCIT sobre el Pacífico Ecuatorial (PE) y Océano Atlántico es que preferentemente se encuentra entre el cinturón de 4° – 12 ° (Hemisferio Norte, HN) y se produce el pico de precipitación anual en alrededor de 7°N (Philander et al. 1996).

Esta asimetría Norte-Sur de la ZCIT es explicado en gran medida por la asimetría geográfica de continente-océano entre el Hemisferio Norte y Sur. El HN posee mayor continente y menos océano mientras que en el hemisferio sur (HS) es al contrario.

Xie y Philander (1994) describieron un mecanismo por el cual la interacción océano – atmósfera en un simple modelo permitió un estado estable de equilibrio con la ZCIT en solo un hemisferio y aguas frías en otro. El llamado mecanismo viento – evaporación – TSM asume que la convección ocurre preferentemente sobre agua caliente y que, si esta es alta inicialmente en un hemisferio debería conducir a altas velocidades del viento en superficie del

HS al HN, los cuales enfrían el agua por evaporación en el HS, reforzando el lugar inicial de convección ya que los vientos mantienen su dirección. Esta es una asimetría que depende también de la retroalimentación SST/nubes bajas, afloramiento costero, entre otros.

El Pacífico Sur oriental se caracteriza por baja TSM en comparación al occidental e incluso al norte del Pacifico oriental tropical asociadas al afloramiento costero (Takahashi 2004). Una característica resaltante de la región oriental de los océanos tropicales es que la atmósfera cercana al mar es más estable producto de la inversión térmica por encima. La subsidencia intensifica la inversión térmica y se forman nubes bajas por debajo de la inversión lo que enfría aún más la TSM. Estas condiciones no permiten la ubicación permanente de la ZCIT en el HN, pero climatológicamente existe una banda a lo largo de esta región durante abril - mayo.

2.7 Modelo Climático Global (GCM)

Los GCM son herramientas importantes para mejorar nuestra comprensión y la previsibilidad del comportamiento climático en las diferentes escalas temporales. Estos ayudan a investigar el grado en que se observa los cambios climáticos debido a la variabilidad natural, actividad humana o la combinación de ambos. Sus resultados y proyecciones proporcionan información esencial para mejorar las informaciones en diferentes áreas. Todos los modelos son similares porque describen el mismo sistema climático, pero sus errores, omisión de procesos, simplificaciones, parametrizaciones de procesos, y aproximaciones numéricas no son similares (Knutti 2013).

2.7.1 Quinta fase del proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP5).

Se requiere una sistemática evaluación coordinada de los modelos y un conjunto bien documentado de modelos por esta razón se creó la organización del Proyecto de Intercomparación de Modelos (MIPs por sus siglas en inglés). Este, proporciona una vía estándar para simular y representar evaluaciones de simulaciones del clima observado. Cuando

los centros de modelamiento presentan un experimento común, simulación o escenario, ofrece la posibilidad de comparar sus propios resultados y además la comparación entre los modelos, evaluando sus diferencias (IPCC 2013). Esta intercomparación permite a los investigadores explorar el rango de comportamientos de los modelos. CMIP5 incluye a un conjunto de experimentos con forzamiento de CO2 y otros que han sido evaluados en el último reporte del IPCC cuya evaluación fue publicada en enero de 2014.

Entonces, CMIP5 es un esfuerzo internacional coordinado para usar el estado del arte de los modelos globales climáticos y Modelos del Sistema Tierra (GCMs que incluyen interacción de carbón y/o biogeoquímica del océano) para presentar un conjunto de experimentos predefinidos (Taylor et al. 2012). Las publicaciones de científicos han incrementado el análisis de los datos de CMIP5 que es usado para evaluar la ciencia del cambio climático. La mayoría de las evaluaciones se dieron a través de publicaciones científicas. CMIP5 tomó un conjunto de datos de diversos centros de modelamiento reconocidos internacionalmente y se ha construido un archivo que puede leerse y analizarse porque todos los datos tienen el mismo formato (NetCDF[1]). Los datos se encuentran disponibles en la página web de Earth System Grid (ESG): http://pcmdi9.llnl.gov/esgf-web-fe/.

El propósito de estos experimentos es abordar cuestiones científicas pendientes que surgieron como parte del cuarto informe de evaluación del IPCC (IPCC AR4) como: mejorar la comprensión del clima y proporcionar estimación del cambio climático en el futuro que será útil para aquellos que están considerando sus posibles consecuencias. CMIP5 además reconoce que algunos grupos desean realizar simulaciones con inusualmente alta resolución en modelos atmosféricos o modelos con los más completos tratamientos de química atmosférica.

CMIP5 promueve un conjunto de simulaciones de modelos para evaluar cuan realistas son las simulaciones en el pasado reciente, es decir el siglo XX. Además proporciona proyecciones de cambio climático en el futuro en 2 escalas de tiempo. Una a corto plazo (hasta 2035) y otro a largo plazo (hasta 2100).

[1] Network Common Data Form

2.7.2 Experimento del presente o histórico.

Este experimento o simulación nos permite la detección de y estudios de atribución - evaluación del impacto humano sobre el clima del presente, desde 1850 hasta 2005. Además nos permite evaluar la performance del clima simulado con datos observados y proporciona condiciones iniciales para el experimento del futuro. Este escenario está ilustrado en la Figura 6.

2.7.3 Proyección del cambio climático futuro (RCP4.5)

Se ha producido 4 escenarios de emisión de GEI para la evaluación de cambio climático futuro, compatible con una gama de estabilización, mitigación y escenario de emisiones de referencia disponibles en la literatura de la comunidad científica. RCP (por sus siglas en inglés Representative Concentration Pathway) por su traducción al español es una vía de concentración representativa. La palabra representativa significa que cada RCP proporciona solo una manera posible que podría conllevar a una específica característica de forzamiento radiativo. Este forzamiento es debido a los gases efecto invernadero y otros agentes radiativos sin incluir efectos directos del uso de suelo (albedo) o forzamiento de polvo mineral. El término "vía" enfatiza que no solo niveles de concentración de largo plazo son de interés, sino también la trayectoria tomada en el tiempo para llegar a ese resultado (Moss et al 2010).

Para un clima estable, es necesario un balance de energía entre los flujos entrantes a la tierra y los salientes, según el balance energético global existe un exceso de aproximadamente 1W m^{-2}(Wild et al. 2013). Debido a este exceso se puede mantener temperaturas que permiten la vida sobre la tierra. Sin embargo con un exceso mayor, el sistema climático se calentaría aún más. El forzamiento radiativo de 4.5 Wm-2 sería el exceso del balance de energía del sistema climático cuando este llegue a su equilibrio en el año 2100 (Taylor y Meehl 2012).

RCP2.6 es una vía donde el forzamiento radiativo se estabiliza aproximadamente en 3W/m2 antes del año 2100 y luego disminuye. RCP4.5 es escogido como un escenario "central", aunque la elección de este escenario en los diferentes modelos no diverge mucho en sus resultados antes de 2030 (Taylor, Stouffer y Meehl 2012). Los aspectos socioeconómicos que subyacen a cada RCP no son únicos, por ejemplo los procesos consultivos regionales con

menor forzamiento radiativo (RCP2.6 y RCP4.5) no se derivan de los de mayor forzamiento radiativo (RCP 6.0, o incluso RCP8.5). Las diferencias entre los RCP no pueden por tanto interpretarse directamente como resultado de la política climática o particulares desarrollos socioeconómicos. Cualquier diferencia se puede atribuir en parte a las diferencias entre los modelos y las hipótesis de escenarios (científico, económico y tecnológico). Los escenarios futuros se ilustran en la Figura 6.

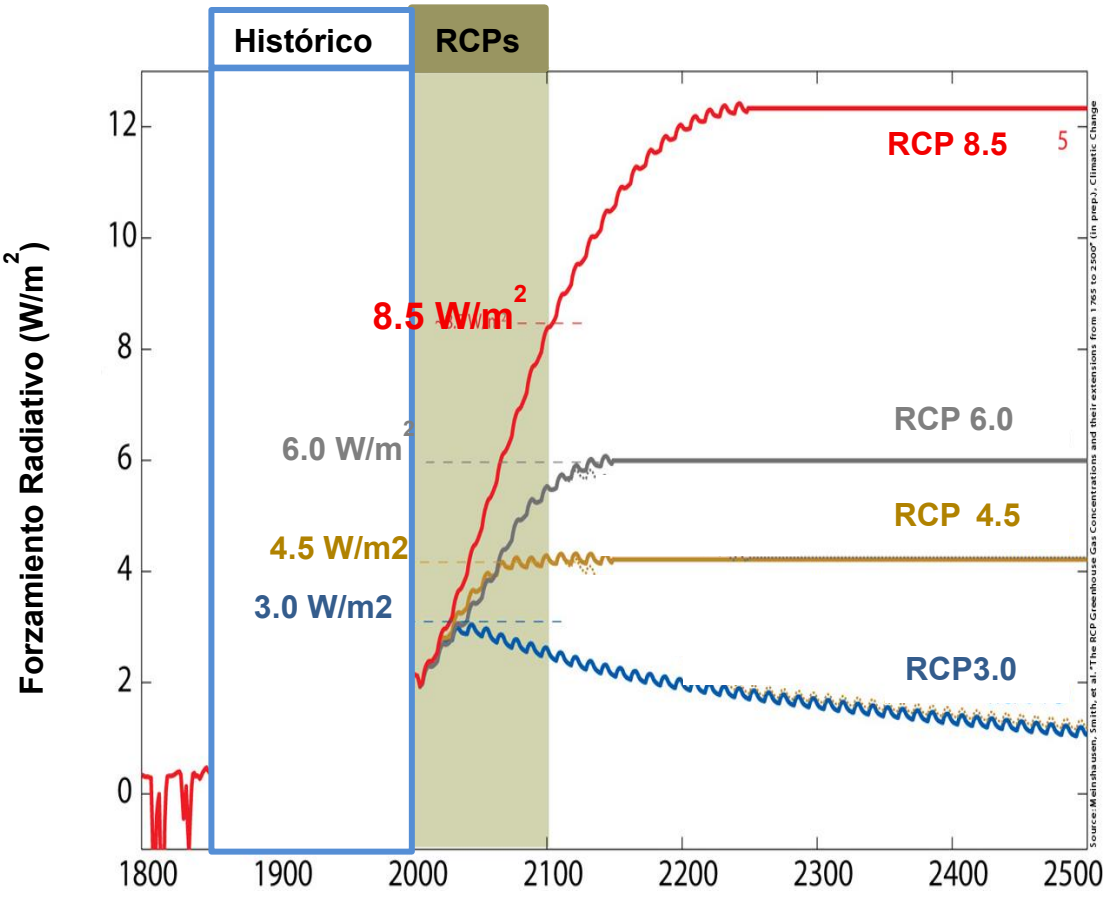


Figura 6: Clasificación de los escenarios de acuerdo a su grado de forzamiento radiativo. Fuente: figura modificada a partir de IPCC 2013.

2.7.4 El Niño en los GCMs

El evento El Niño es la más prominente característica de la variabilidad climática con impactos globales, aún más el categorizado como extremo (97/98 y 82/83). Además influye en muchos patrones globales del tiempo, influenciando ecosistemas, agricultura, ciclones

tropicales, sequías, inundaciones y otros eventos de extremos climáticos a lo largo del mundo. Por eso el potencial cambio futuro en las ocurrencias de El Niño extremo podría tener profundas consecuencias socioeconómicas (Cai et al. 2014).

Todavía hay un limitado entendimiento de El Niño debido a que envuelve una compleja interacción de numerosos procesos atmosféricos y oceánicos. El modelamiento de este fenómeno con modelos globales acoplados del clima, su entendimiento, anticipación y predicción de su comportamiento estacional y a mayor escala de tiempo todavía tiene bastantes desafíos (Guilyardi et al. 2012). Los modelos del CMIP5 aún tienen errores en efectos de retroalimentación nubes y vapor de agua, por lo tanto sus resultados con respecto al modelamiento de El Niño no es robusto y tiene gran incertidumbre (Chen 2013). Sin embargo a manera de aproximación algunos modelos del CMIP5 proyectan que en el futuro se duplicarían las ocurrencias de Niños extremos en respuesta al calentamiento global (Cai et al. 2014).

2.7.5 Errores de los GCMs

En general los modelos tienen deficiencias y errores que incrementan la incertidumbre de sus resultados. Estos errores aún perduran a pesar del esfuerzo que se ha realizado por mejorar el desempeño de la simulación en regiones especiales y en algunos aspectos del sistema climático (Wang et al. 2014). La falta de representación de procesos locales y/o de la interacción Océano-Atmósfera pueden ser los responsables de estos errores sistemáticos. Por ejemplo el error positivo de TSM en el Pacífico y Atlántico Sur oriental puede deberse al excesivo flujo de calor sensible en el océano debido a la insuficiente cobertura nubosa de estratocúmulos (Chen 2013). La figura 7 muestra error de los GCMs que representan el clima del presente. Este error se estimó como la diferencia de la precipitación promedio mensual anual (mm/mes) de 20 GCMs (1990 - 2005), que pertenecen al CMIP5, y la precipitación promedio mensual (mm/mes) del TRMM 3B43 (1998 - 2013). Como ilustra esta misma figura el error de la precipitación es bastante a lo largo de toda la costa peruana e incluso aún más en la costa norte del Perú.

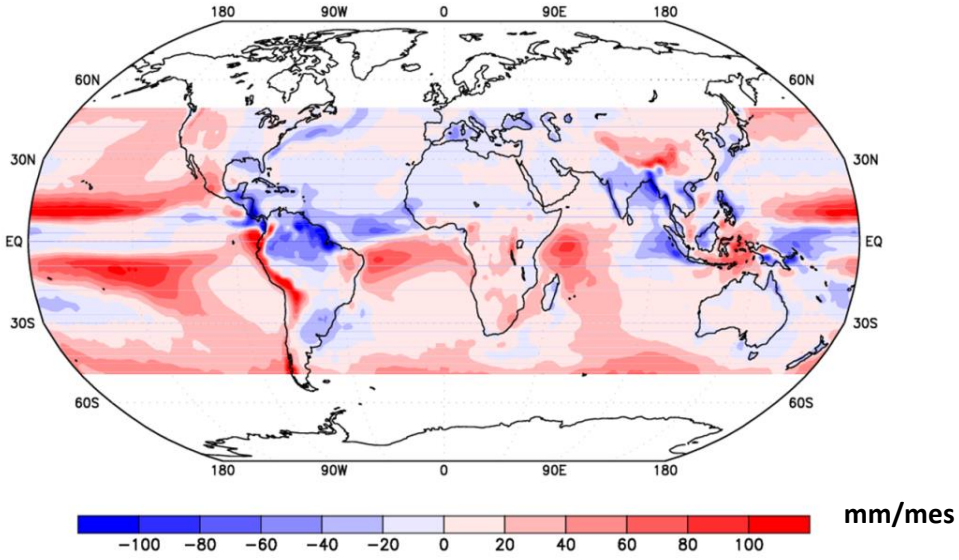


Figura 7: Error que muestran los modelos en la precipitación promedio mensual anual (mm/mes) del clima presente.

Entre los demás errores que muestran los GCMs cerca a la costa norte del Perú se tiene la doble zonal de convergencia intertropical (DZCIT). La incertidumbre de representación de nubes bajas, la sobreestimación de la TSM y el exceso de precipitación podrían explicar la existencia de una banda adicional de la ZCIT en el pacífico tropical sur. En la Figura 8 se observa el resultado del promedio de precipitación multianual (1968 - 2005) del modelo GISS-E2-H. Este, muestra una DZCIT probablemente debido a sus altos valores de TSM en el pacifico oriental.

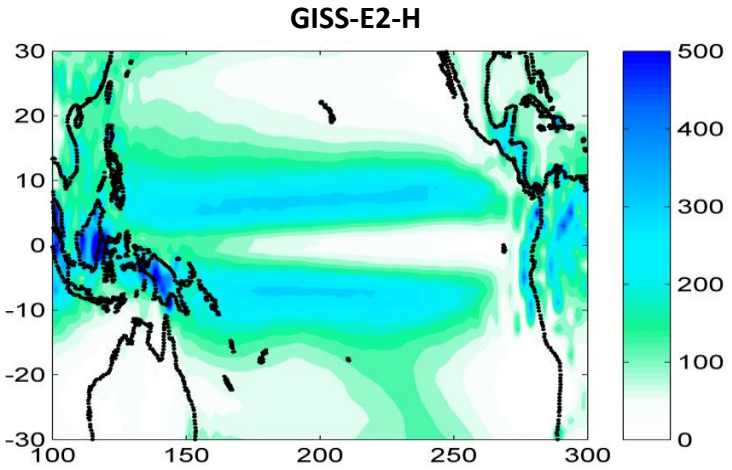


Figura 8: Promedio anual-mensual (mm mes-1) de 1968 a 2005 correspondiente al modelo GISS-E2-H del CMIP5.

2.8 Cambio en la precipitación local y global proyectada usando GCMs.

Actualmente se conocen las limitaciones e incertidumbres de los GCMs para reproducir cambios climáticos globales y regionales. Se cree que los cambios en la humedad relativa puede proporcionar una limitación importante (Sherwood 2010). En particular estudios anteriores, han señalado recientemente que los GCMs subestiman la expansión de la célula de Hadley en un clima más caliente. La magnitud de este tipo de desplazamiento hacia los polos es importante debido a que provoca cambios hidrológicos regionales.

Por una parte los resultados de observaciones y de modelamiento muestran que el comportamiento de la precipitación de tipo convectiva es sensible a la humedad relativa en la troposfera libre (Redelsperger et al. 2002), a pesar de que no está bien representada por las parametrizaciones de esquemas de convección (Derbyshire et al. 2004). Y por otra parte estos mismos sugieren que la humedad relativa se mantendrá más o menos constante en un clima cambiante. Físicamente, si la humedad relativa se mantendría más o menos constante con el cambio climático, el incremento absoluto de vapor de agua dependerá exponencialmente de la temperatura.

Held y Soden (2006) examinaron algunos aspectos del cambio en el ciclo hidrológico que son pronunciados a lo largo de los GCMs evaluados en el cuarto informe del IPCC. Básicamente evaluaron la respuesta climática a nivel del ciclo hidrológico dado un incremento de la temperatura global debido a los GEI. Además evaluaron como ésta respuesta está relacionada directa o indirectamente con incremento del vapor de agua debido a la retroalimentación del calentamiento de la tropósfera baja y no como un forzamiento externo.

Para poder estimar el cambio en el ciclo hidrológico usaron la ecuación de Clausius-Clapeyron (CC) que calcula el cambio de vapor de agua en la atmósfera por grado de calentamiento del aire. Entonces la cantidad de vapor de agua retenida debe aumentar con la presión de vapor de saturación a razón de 7 por ciento por grado de calentamiento (White 2013), manteniendo la humedad relativa constante.

Esta razón proviene de la resolución de la ecuación de Clausius-Clapeyron. Cada resultado depende de la temperatura que se considere como el promedio. Si se considera la temperatura promedio global observado (288 K) y las demás constantes por sus respectivos valores se obtiene que " α " es $0.07K^{-1}$.

$$\frac{d \ln e_s}{dT} = \frac{L}{RT^2} \equiv \alpha(T) \equiv \frac{de_s}{e_s} \equiv 7porciento/K$$

L: calor latente de vaporización (2.26 x 10^6 J/Kg).

R: constante para el vapor de agua (461 J/K.Kg).

T: temperatura promedio del aire.

La suposición más simple sería que la precipitación global aumentara a esta razón, sin embargo el ciclo hidrológico es controlado más por la disponibilidad de energía que por la humedad. Con el calentamiento global la atmósfera contendrá mayor energía (mayor temperatura) y humedad. Esto evitará gradientes de humedad entre la superficie y la atmosfera. Esta disminución de gradientes limitará la evaporación de la superficie. Además con el debilitamiento de los sistemas de circulación previstos la precipitación debería

incrementarse en menor grado. Estas estricciones energéticas pueden explicar por qué se proyecta un cambio de PP promedio global de sólo 2 por ciento por grado de calentamiento ($2\%°C^{-1}$) a pesar del 7 $\%°C^{-1}$ de incremento del vapor de agua atmosférico (Held 2006).

Curiosamente, la intensidad de las lluvias extremas, a diferencia de la precipitación global media, probablemente aumente en un $7\%°C^{-1}$ (Vecchi 2006, White 2013). Esto implica que el calentamiento global puede provocar cambios en la precipitación regional (regiones que ya están experimentando fuertes lluvias pueden tener que hacer frente a las lluvias más extremas, mientras que las regiones que ya reciben poca lluvia pueden obtener incluso menos).

2.9 Modelo Físico Empírico

Para estimar la precipitación usando una simple aproximación de la realidad se plantea un modelo físico empírico que relaciona precipitación con la TSM de forma no lineal. Esta ecuación solo necesita dos parámetros, "a" y $Tcrit$, donde "a" es la pendiente de la ecuación y Tcrit es la temperatura umbral. De manera simple si la TSM excede la Tcrit la precipitación se estima con este ajuste lineal de los datos: $\mathrm{a} \cdot (TSM - \mathrm{Tcrit})$. De lo contrario, cuando la TSM es menor a la Tcrit la precipitación es cero. Este modelo empírico ha sido establecido por algunos autores como Xie y Philander en el año 1994.

Ecuación del Modelo Físico Empírico

$$\mathrm{PP} = \begin{cases} 0, & TSM < Tcrit \\ \mathrm{a} \cdot (TSM - \mathrm{Tcrit}), & TSM \geq Tcrit \end{cases} \quad ------\rightarrow (1)$$

La Tcrit en la ecuación 1 tiene una explicación física, es una medida de estabilidad atmosférica. La costa norte del Perú está cubierta por una capa de inversión casi permanente, por lo tanto el grado de estabilidad se mide por la ausencia o presencia de esta capa. Según la ecuación 1 la condición suficiente para inestabilidad ("romper" esta capa de inversión) es que la TSM exceda el umbral. A pesar de que la forma más confiable de conocer la estabilidad atmosférica es conociendo la diferencia de temperatura potencial en dos niveles (por encima de 700mb y la superficie), la Tcrit es un buen indicador ya que la temperatura por encima de 700mb es casi constante (Klein y Hartman, 1993).

III. MATERIALES Y METODOS

3.1 Datos

3.1.1 Datos observados.

Se utilizaron datos mensuales de precipitación en dos estaciones de la costa norte del Perú, una ubicada en Tumbes (Estación meteorológica El Salto, 3.4°S 80.2°W) y la otra en Piura (5.2°S 80.2°W). Los datos mensuales de TSM fueron obtenidos a partir de la NOAA ERSST V3b que pueden descargarse de su página web: http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCDC/.ERSST/.version3b/ y se encuentran en formato NetCDF.

Cuadro 2: Datos utilizados en el análisis estadístico de datos observados.

DATOS OBSERVADOS	UBICACIÓN	PERIODO	FUENTE
TSM	**5°S 82°W 6°S 82°W**	**1968 – 2005**	**NOAA ERSST V3b**
PRECIPITACION	**3.4°S 80.2°W (El Salto -Tumbes)**	**1968 – 2005**	**SENAMHI**
	5.2°S 80.2°W (Piura)		**CORPAC**

3.1.2 Datos de GCMs.

Se utilizaron datos del portal Earth System Grid Federation[2] (ESG), este portal almacena y distribuye conjuntos de datos que provienen de simulaciones de modelos climáticos océano - atmósfera acoplados CMIP5. Este estudio inicia con 39 GCMs (véase el Cuadro 3) con dos variables para cada uno.

[2]Se puede acceder a los del siguiente portal: http://www-pcmdi.llnl.gov/

Se utilizaron variables de TSM y PP para todos los 39 GCMs del experimento histórico (utilizado para el escenario del presente) y los GCMs del experimento RCP4.5 (utilizado para el escenario del futuro, Moss et al. 2008 y 2010). Para más detalles acerca del formato de datos ver Taylor et al. (2011). Cada GCM tiene diferente resolución espacial y temporal[3], es por eso que se ha buscado un periodo en común entre datos observados y GCMs del presente. Para solucionar el problema de las diferencias entre las resoluciones se ha realizado una interpolación bilineal. Se realizó un script de interpolación bilineal en Fortran 90 usando librerías NetCDF con la finalidad de uniformizar la grilla a 1° x 1°.

En la primera columna del Cuadro 3 se encuentran los nombres de los modelos, la segunda columna describe su ensemble, donde r1i1p1 significa que los datos obtenidos del modelo corresponden a su primera corrida (r1), con un método de inicialización (i1) que depende de cada centro de modelamiento y una versión de parametrización física (p1). Los modelos del Cuadro 3 que se encuentran coloreados de azul se eliminaron de este estudio debido a que no muestran la relación no lineal entre PP/TSM. El Cuadro 4 muestra la descripción de los principales forzamientos que incluyeron los modelos para la proyección del clima futuro y el Cuadro 5 muestra los tipos de forzamientos que usaron cada GCMs.

Cuadro 3: Modelos utilizados CMIP5.

Modelos	Ensemble	Resolución	Centro de Modelamiento
ACCESS1-0	r1i1p1	1.875 x1.25	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) and Bureau of Meteorology (BOM), Australia
ACCESS1-3	r1i1p1	1.875 x 1.25	
bcc-csm1-1	r1i1p1	2.8 x 1.4	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration
bcc-csm1-1-m	r1i1p1	1.25 x 1.12	
CCSM4	r1i1p1	1.25 x 0.94	National Center for Atmospheric Research
CESM1-BGC	r1i1p1	1.25 x 0.94	Community Earth System Model Contributors
CESM1-CAM5	r1i1p1	1.25 x 0.94	

[3] Se ha escogido un periodo en común a los observados, GCM presente (1850 – 2005) y GCM futuro (2050 – 2100), pero existen dos modelos con diferente periodo para el futuro. HadCM3 2006 – 2035) y MIROC4 (2006 – 2035), esto debido a que en el portal de la base de datos solo se encontró disponible este periodo.

CMCC-CM	r1i1p1	0.75 x 0.75	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici
CMCC-CMS	r1i1p1	1.875 x 1.85	
CNRM-CM5	r1i1p1	1.25 x 0.94	Centre National de RecherchesMétéorologiques / Centre Européen de Recherche et FormationAvancée en CalculScientifique
CSIRO-Mk3-6-0	r1i1p1	1.875 x 1.87	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence
GFDL-CM2p1	r1i1p1	2.5 x 2.02	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
GFDL-CM3	r1i1p1	2.5 x 2	
GFDL-ESM2G	r1i1p1	2.5 x 2.02	
GFDL-ESM2M	r1i1p1	2.5 x 2.02	
HadCM3	r1i1p1	3.75 x 2.5	Met Office Hadley Centre (additional HadGEM2-ES realizations contributed by InstitutoNacional de PesquisasEspaciais)
HadGEM2-AO	r1i1p1	1.875 x 1.25	
HadGEM2-CC	r1i1p1	1.875 x 1.25	
HadGEM2-ES	r1i1p1	1.875 x 1.25	
inmcm4	r1i1p1	2 x 1.5	InstituteforNumericalMathematics
IPSL-CM5A-LR	r1i1p1	3.75 x 2	Institut Pierre-Simon Laplace
IPSL-CM5A-MR	r1i1p1	2.5 x 1.27	
IPSL-CM5B-LR	r1i1p1	3.75 x 1.9	
MIROC4h	r1i1p1	0.5625x0.56	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
MIROC5	r1i1p1	1.4 x 1.4	University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
MPI-ESM-LR	r1i1p1	1.875 x 1.87	Max-Planck-InstitutfürMeteorologie (Max Planck Institute for Meteorology)
MPI-ESM-MR	r1i1p1	1.875 x 1.87	
MRI-CGCM3	r1i1p1	1.125 x1.121	MeteorologicalResearchInstitute
CanCM4	r1i1p1	2,8125x 2.79	CCCMA
CanESM2	r1i1p1	2,8125 x 2.79	
FGOALS-g2	r1i1p1	2.8125 x 3.172	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences and CESS,Tsinghua University

<< A continuación>>

GISS-E2-H	r1i1p1	2.5 x 2	NASA Goddard Institute for Space Studies
GISS-E2-H-CC	r1i1p1	2.5 x 2	
GISS-E2-R	r1i1p1	2.5 x 2	
GISS-E2-R-CC	r1i1p1	2.5 x 2	
MIROC-ESM	r1i1p1	2.8125 x 2.787	Japan Agency for Marine-Earth Science and Institute (The University of Tokyo), and National Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute for Environmental Studies
MIROC-ESM-CHEM	r1i1p1	2.8125 x 2.787	
NorESM1-ME	r1i1p1	2.5 x 1.9	Norwegian Climate Centre
NorESM1-M	r1i1p1	2.5 x 1.9	

Fuente: Earth System Grid Federation (http://www-pcmdi.llnl.gov/). Los datos son productos de los modelos que se encuentran disponibles para uso no comercial, investigación y propósitos educativos. Véase términos de uso en: http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/terms.html).

Cuadro 4: Descripción de los forzamientos.

Abrev.	**DESCRIPCION DE LOS FORZAMIENTOS**
Nat	Forzamiento natural(una combinación, no definida, que puede incluir por ejemplo, volcanes)
Ant	Forzamiento antropogénico (una mezcla, no definida, por ejemplo gases efecto invernadero, aerosoles, ozono, cambio de uso de suelo.
GHG	Gases de efecto invernadero (mezcla no explicita)
SD	Sulfatos, aerosoles antropogénicos, solo cuentan forzamientos directos.
SI	Sulfatos, aerosoles antropogénicos, solo cuentan forzamientos indirectos.
SA (=SD+SI)	Sulfatos y aerosoles de efectos directos e indirectos
TO	Ozono troposférico
SO	Ozono Estratosférico
Oz(=TO+SO)	Ozono (troposférico y estratosférico)
LU	Cambio de uso de suelo
Sl	Irradiancia solar
Vl	Aerosoles volcánicos
SS	Sal de mar
Dust	Polvo
BC	Carbón negro
MD	Polvo mineral
OC	Carbón orgánico
AA	Aerosoles antropogénicos (mezcla no definida)

Cuadro 5: Forzamientos de la proyección futura para cada GCM.

MODELO	FORZAMIENTOS
ACCESS1-0	GHG, Oz, SA, Sl, Vl, BC, OC, (GHG = CO2, N2O, CH4, CFC11, CFC12, CFC113, HCFC22, HFC125, HFC134a)
ACCESS1-3	GHG, Oz, SA, Sl, Vl, BC, OC, (GHG = CO2, N2O, CH4, CFC11, CFC12, CFC113, HCFC22, HFC125, HFC134a)
bcc-csm1-1	Nat Ant GHG SD Oz Sl Vl SS Ds BC OC
bcc-csm1-1-m	Nat Ant GHG SD Oz Sl Vl SS Ds BC OC
CanCM4	GHG,Oz,SA,BC,OC,LU,Sl,Vl (GHG incluye CO2,CH4,N2O,CFC11, CFC12 efectivo)
CanESM2	GHG,Oz,SA,BC,OC,LU,Sl,Vl (GHG incluye CO2,CH4,N2O,CFC11, CFC12 efectivo)
CCSM4	Sl, GHG ,Vl, SS, Ds, SD, BC, MD, OC, Oz, AA, LU
CESM1-BGC	Sl, GHG ,Vl, SS, Ds, SD, BC, MD, OC, Oz, AA, LU
CESM1-CAM5	Sl, GHG ,Vl, SS, Ds, SD, BC, MD, OC, Oz, AA, LU
CMCC-CM	Nat,Ant,GHG,SA,TO,Sl
CMCC-CMS	Nat,Ant,GHG,SA,Oz,Sl
CMCC-CMS	Nat,Ant,GHG,SA,Oz,Sl
CNRM-CM5	Sl, GHG, Vl, SS, Ds, SD, BC, MD, OC, Oz, AA, LU
CSIRO-Mk3-6-0	Ant,Nat (todos los forzamientos)
FGOALS-g2	GHG,Oz,SA,BC,Ds,OC,SS,Sl,Vl (GHG incluye CO2,CH4,N2O,CFC11, CFC12 efectivo. Los aerosoles además incluyen sulfato)
GFDL-CM2p1	GHG,SD,Oz,Sl,Vl,SS,BC,MD,OC (GHG incluye CO2, CH4, N2O)
GFDL-CM3	GHG,SA,Oz,LU,Sl,Vl,SS,BC,MD,OC (GHG incluye CO2, CH4, N2O, CFC11, CFC12, HCFC22, CFC113)
GFDL-ESM2G	GHG,SD,Oz,LU,Sl,Vl,SS,BC,MD,OC (GHG incluye CO2, CH4, N2O, CFC11, CFC12, HCFC22, CFC113)
GFDL-ESM2M	GHG,SD,Oz,LU,Sl,Vl,SS,BC,MD,OC (GHG incluye CO2, CH4, N2O, CFC11, CFC12, HCFC22, CFC113)
GISS-E2-H	GHG, LU, Sl, Vl, BC, OC, SA, Oz (además incluye cambios orbitales - BC en nieve - aerosoles de Nitrato)
GISS-E2-H-CC	GHG, LU, Sl, Vl, BC, OC, SA, Oz (además incluye cambios orbitales - BC en nieve - aerosoles de Nitrato)
GISS-E2-R	GHG, LU, Sl, Vl, BC, OC, SA, Oz (además incluye cambios orbitales - BC en nieve - aerosoles de Nitrato)
GISS-E2-R-CC	GHG, LU, Sl, Vl, BC, OC, SA, Oz (además incluye cambios orbitales - BC en nieve - aerosoles de Nitrato)
HadCM3	GHG, Oz, SA, Sl, Vl, (GHG = CO2, N2O, CH4, CFCs)
HadGEM2-AO	Nat, Ant, GHG, SA, Oz, LU, Sl, Vl, SS, Ds, BC, MD, OC
HadGEM2-CC	GHG, Oz, SA, Sl, Vl,BC,OC, LU (GHG = CO2, N2O, CH4, CFCs)

<< A continuación>>

HadGEM2-ES	GHG, Oz, SA, Sl, Vl,BC,OC, LU (GHG = CO2, N2O, CH4, CFCs)
inmcm4	N/A
IPSL-CM5A-LR	Nat, Ant, GHG, SA, Oz, LU, Sl, Vl, SS, Ds, BC, MD, OC, AA
IPSL-CM5A-MR	Nat, Ant, GHG, SA, Oz, LU, Sl, Vl, SS, Ds, BC, MD, OC, AA
IPSL-CM5B-LR	Nat, Ant, GHG, SA, Oz, LU, Sl, Vl, SS, Ds, BC, MD, OC, AA
MIROC-ESM	GHG,SA,Oz,LU,Sl, Vl, MD,BC,OC
MIROC-ESM-CHEM	GHG,SA,Oz,LU,Sl, Vl, MD,BC,OC (el ozono fue pronosticado)
MIROC4h	GHG, SA, Oz, LU, Sl, Vl, SS, Ds, BC, MD, OC (GHG incluye CO2, N2O, CH4 y fluorocarbonos; Oz incluye OH y H2O2)
MIROC5	GHG, SA, Oz, LU, Sl, Vl, SS, Ds, BC, MD, OC (GHG incluye CO2, N2O,CH4, y fluorocarbonos; Oz incluye OH y H2O2; LU excluye cambios en la fracción de lagos)
MPI-ESM-LR	GHG, Oz, SD, Sl, Vl, LU
MPI-ESM-MR	GHG, Oz, SD, Sl, Vl, LU
MRI-CGCM3	GHG, SA, Oz, LU, Sl, Vl, BC, OC (GHG incluye CO2, CH4, N2O, CFC-11, CFC-12, y HCFC-22)
NorESM1-M	GHG, SA, Oz, Sl, Vl, BC, OC
NorESM1-ME	GHG, SA, Oz, Sl, Vl, BC, OC

Agradezco a WCRP (World Climate Research Programme‟s) que es un Programa mundial de investigaciones climáticas el que es responsable del CMIP, y agradezco a los grupos de modelamiento(listado en el Cuadro 4) por producir y hacer disponible la salida de los datos de los modelos. Para el CMIP de EE.UU Departamento del programa de energía para el diagnóstico de modelos climáticos y la Intercomparación proporciona apoyo coordinado y desarrollo dirigido de infraestructura de software en colaboración con la Organización Global de los portales del Sistema Tierra.

3.2 Metodología

3.2.1 Estimación de parámetros de la ecuación del MFE en datos observados.

Para estimar la Tcrit se usó datos de PP observada y TSM observada. Se estableció un vector que contenía valores que iban a ser llamados Tcrit. Este vector tuvo 121 valores de TSM, el rango fue de 18°C hasta 30°C cada 0.1°C. Para cada Tcrit en el vector se estimó una nueva precipitación siguiendo las condiciones de la ecuación 1: si la TSM es mayor a la Tcrit, entonces la precipitación fue estimada como: a · $(TSM - \text{Tcrit})$, y si la TSM era menor a la Tcrit la PP fue cero. Para la primera condición de la ecuación 1, cuando la TSM supera la Tcrit, la PP se relaciona linealmente con la TSM y se obtiene una pendiente que los relaciona. Para la segunda condición, cuando la TSM es menor que la Tcrit, la pendiente en cero. Por lo tanto además de los 121 valores de Tcrit, también se obtuvieron 121 pendientes ("a"). Para cada Tcrit con su respectiva "a" se estimó la nueva precipitación y por último se estimó el RMSE (Raíz del error cuadrático medio).

El RMSE se estimó con la ecuación 2. Donde PP_{MFE} es la precipitación estimada con el MFE y PP_{obs} es la precipitación observada. Todos los estimados fueron realizados usando scripts en octave y/o Matlab. Esta medida de error es útil porque nos permite conocer cuando con cuanto de error se estimó la PP con el MFE.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(PP_{MFE} - PP_{obs})^2} \qquad ------\rightarrow (2)$$

Finalmente la Tcrit y "a" fue la que dio menor RMSE. Siguiendo el procedimiento anterior se estimó la Tcrit, "a", RMSE para cada punto en la figura 10. La grilla con el menor RMSE se eligió como el que mejor pronostica la PP en superficie. Sólo se utilizaron los 5 grillas de TSM más cercanos a la costa de Piura y Tumbes (véase la figura 10). Después se estimó la Tcrit, "a" la pendiente y RMSE, TSM promedio (TSM_{obs_prom}), precipitación observada promedio (PP_{obs_prom}) para cada estación.

3.2.2 Estimación de los parámetros de la ecuación del MFE en GCMs del experimento Histórico.

Se usaron datos de las variables TSM y PP para el periodo 1968 -2005 que coincide con el periodo de datos observados. Además se usaron las ubicaciones de las grillas de TSM encontradas previamente en la metodología anterior y para la PP se usó la ubicación de la estación de El Salto en Tumbes y de Piura. Posteriormente y con el fin de evaluar visualmente la relación entre ambas variables se realizó gráficos de dispersión entre TSM/PP. En primer lugar se eliminaron aquellos GCMs en la que la dispersión entre datos del modelo no coincidía con la dispersión de datos observados (relación no lineal entre ambas variables). Esta dispersión se realizó para los escenarios del presente y futuro.

Se estimó la Tcrit y "a" para cada modelo que si mostró la relación no lineal de PP/TSM. Con estos parámetros estimados se estimó la PP con el MFE y el RMSE. Adicionalmente se estimaron los promedios (1968 - 2005) del escenario del presente de: la temperatura superficial del mar (TSM_{GCM_prom}), precipitación del GCM (PP_{GCM_prom}), y la precipitación del MFE (PP_{MFE_prom}).

3.2.3 Estimación de parámetros de la ecuación del MFE en GCMs del experimento RCP4.5.

Se encontraron tres modelos que sólo tenían datos del 2006 al 2035 y los veinticinco restantes si contenían datos desde 2006 hasta 2100. Debido a esto se realizó el análisis para los tres modelos que simularían un cambio climático reciente (2006 - 2035) y los demás simularían un cambio climático remoto (2050 - 2100). Usando la misma metodología ya descrita se estimó la Tcrit y "a" para cada modelo. Con estos parámetros estimados se estimó la PP con el MFE y el RMSE. Adicionalmente se estimaron los promedios (2050 – 2100) del escenario del futuro de: la temperatura superficial del mar (TSM_{GCM_prom}), precipitación del GCM (PP_{GCM_prom}), y la precipitación del MFE (PP_{MFE_prom}).

3.2.4 Ajuste del Modelo Físico Empírico

Después de haber estimado los parámetros del MFE para ambos escenarios se realizó la estimación de Monte Carlo. Con este análisis se buscó establecer un intervalo de confianza para la Tcrit y pendiente estimada previamente. Usando este intervalo se puede cuantificar el error o incertidumbre de los resultados finales. Además se estimó el error relativo como una diferencia de la PP promedio estimada con MFE y la PP promedio del GCM dividida entre la PP promedio del GCM multiplicada por cien (como muestra la ecuación 2). Finalmente se realizaron correlaciones de la precipitación mensual, promedio trimestral de enero, febrero y marzo (DEF) y el promedio anual entre el MFE y GCM.

$$Error\ Relativo = \frac{PP_{MFE_PROM} - PP_{GCM_PROM}}{PP_{GCM_PROM}}\ X\ 100\ \ ----\rightarrow (3)$$

a. Método de Bootstrap o Estimación de Monte Carlo.

El objetivo de este método consiste en que podemos obtener un rango o intervalo de confianza de valores para cada parámetro ya que la recta estimada en primera aproximación no siempre es la que se ajusta mejor a los datos. La estimación de Monte Carlo es un método de re muestreo no paramétrico propuesto por Bradley Efron en 1979. La idea central del método consiste; dada una muestra con "N" observaciones dicha muestra es tratada como si fuera toda la población de la cual se extrae "n" muestras aleatorias con reemplazamiento (Wilks 2006). En este estudio "N" fue el número de datos de TSM para ambos escenarios; es decir la cantidad de datos en el periodo 1968 – 2005 y 2050 - 2100 y cada sub-muestra fue el 25 por ciento del total de datos. Posteriormente se estimó "n" veces la Tcrit, "a" y RMSE para cada sub-muestra extraída. Donde "n" fue el número de repeticiones (10000) o el número de sub-muestras extraídas aleatoriamente y con reemplazo.

b. Correlación Lineal

La correlación lineal indica fuerza y la dirección de una relación lineal y proporcionalidad entre dos variables estadísticas. Se considera que dos variables están correlacionadas cuando los valores de una de ellas varían sistemáticamente con respecto a los valores homónimos de la otra. La mejor representación de esta medida es la línea de mejor ajuste, trazada a partir de una nube de puntos. (Matemática y Estadística 1951).

Se realizó la correlación lineal mensual, promedio trimestral (diciembre, enero y febrero, DEF) y el promedio anual para ambos escenarios y zonas de estudio entre los datos de los GCMs y los estimados con el MFE.

3.2.5 Validación del MFE

La validación es el proceso de verificación y/o evaluación de la variable estimada. Se realizó la validación de la PP estimada con el MFE comparando estos resultados con la PP de los GCMs.

a. ¿El MFE puede reproducir el cambio en la precipitación de los GCM?

Para la validación del ajuste del MFE a los GCMs se realizó regresiones simples de los promedios de la precipitación de los GCMs y los estimados a partir del MFE.

- Se realizó una regresión lineal simple entre los promedios de precipitación de cada GCMs con los promedios del PP estimada con el MFE del escenario del presente.
- Se realizó una regresión lineal simple entre los promedios de precipitación de cada GCMs con los promedios del PP estimada con el MFE del escenario del futuro.
- Se realizó una regresión lineal simple entre los cambios de la precipitación de los GCMs y el cambio de la PP estimada con el MFE. Se entiende como cambio a la diferencia entre el periodo del futuro menos el presente.

b. ¿Qué tan parecidos son los parámetros estimados de los GCM a los observados?

- Se realizó un gráfico de dispersión entre la $Tcrit_{GCM}$ versus la PP_{GCM_prom} de cada modelo. En este mismo gráfico se incluyó los respectivos valores observados con el objetivo de contrastarlos.

- Se realizó otro gráfico de dispersión entre ($Tcrit_{GCM}$ menos TSM_{GCM_prom}) versus la PP_{GCM_prom} de cada modelo. En este mismo gráfico se incluyó los respectivos valores observados con el objetivo de contrastarlos.

- Se realizó un tercer gráfico de dispersión entre la a_{GCM} versus la PP_{GCM_prom} de cada modelo. En este mismo gráfico se incluyó la pendiente observada con la PP promedio observada.

c. *¿Cuál es el cambio de los parámetros en el futuro?*

- El cambio se refiere a la diferencia del parámetro estimado en el escenario del futuro con el parámetro estimado en el escenario del presente ($parámetro_{(futuro)} - parámetro_{(presente)}$).

- Se realizó un diagrama de dispersión para el cambio de Tcrit,TSM_{GCM_prom}, "a", ($Tcrit_{GCM}$ menos TSM_{GCM_prom}) versus el cambio de PP_{GCM_prom}.

3.2.6 Análisis de Sensibilidad

Se llevó a cabo el análisis de sensibilidad a través de la 'perturbación de parámetros' , es decir, se varió un parámetro del modelo mientras el resto permanecen constantes, de modo que las variaciones sufridas en las variables de estado reflejan la sensibilidad de la solución al parámetro modificado (Chapra 1997). Con la finalidad de reproducir la relación 1:1 entre la PP_{GCM_prom} y PP_{MFE_prom} perturbando los parámetros y/o variables de la ecuación del MFE se plantearon las siguientes preguntas buscando reproducir el aumento de PP que muestran los GCMs en el futuro.

a. ***¿Qué pasaría con el cambio de PP si solo se cambia la Tcrit en el futuro?***

Para responder esta pregunta se volvió a estimar la precipitación del futuro de esta manera:

$$PP_{est_presente} = a_{pre} * \left(TSM_{GCM_{pre}} - Tcrit_{GCM_{pre}}\right) \quad ----\rightarrow (4)$$

$$PP_{est_futuro} = a_{pre} * \left(TSM_{GCM_{pre}} - \mathbf{Tcrit_{GCM_{fut}}}\right) ----\rightarrow (5)$$

b. ***¿Qué pasaría con el cambio de PP si solo se calentara el mar (incremento de TSM), es decir si para nuestras condiciones viviéramos en un Niño permanente?***

En este caso la Tcrit y "a" permanecerían constantes en el futuro, solo habría un calentamiento del mar. Se realizó una regresión simple entre:

$$PP_{est_presente} = a_{pre} * \left(TSM_{GCM_{pre}} - Tcrit_{GCM_{pre}}\right) ----\rightarrow (4)$$

$$PP_{est_futuro} = a_{pre} * \left(\mathbf{TSM_{GCM_{fut}}} - Tcrit_{GCM_{pre}}\right) ----\rightarrow (6)$$

c. ***¿Qué pasaría con el cambio de PP si solo se cambia la pendiente ("a") en el futuro?***

Se realizó una regresión simple entre:

$$PP_{est_presente} = a_{pre} * \left(TSM_{GCM_{pre}} - Tcrit_{GCM_{pre}}\right) \quad ----\rightarrow (4)$$

$$PP_{est_futuro} = \mathbf{a_{fut}} * \left(TSM_{GCM_{pre}} - Tcrit_{GCM_{pre}}\right) ----\rightarrow (7)$$

d. ***¿Qué pasaría con el cambio de PP si solo se cambia la TSM y Tcrit en el futuro?***

Con este cambio se busca conocer el efecto neto del incremento entre ambas variables.

$$PP_{est_presente} = a_{pre} * \left(TSM_{GCM_{pre}} - Tcrit_{GCM_{pre}}\right) ----\rightarrow (4)$$

$$PP_{est_futuro} = a_{pre} * \left(\mathbf{TSM_{GCM_{fut}}} - \mathbf{Tcrit_{GCM_{fut}}}\right) ----\rightarrow (8)$$

3.2.7 Corrección de los errores sistemáticos de los GCMs.

En primera lugar; se asumió que la pendiente "a_{obs}" no cambia en el futuro. Se estimó la precipitación del presente usando el MFE con datos observados y se estimó la precipitación del futuro usando los mismos datos de TSM observados pero sumando el cambio de TSM y los otros parámetros de cada modelo. La ecuación 9 permitió estimar la PP del presente mientras que la ecuación 10 permitió estimar la PP del futuro. Finalmente después de los cálculos se obtuvieron dos series de tiempo de precipitación y TSM para cada modelo. La primera es la misma para todos los modelos (TSM_{obs} y PP_{MFE}). La segunda varía porque depende del "cambio" de cada modelo.

$$\boldsymbol{PP(presente)} = \begin{cases} \mathbf{0}\ , & \boldsymbol{TSMobs} < Tcrit \\ \mathbf{aobs} \cdot (\boldsymbol{TSMobs} - \mathbf{Tcrit(obs)}), & \mathbf{TSM}\boldsymbol{obs} \geq \boldsymbol{Tcrit} \end{cases} \quad ----\rightarrow (\mathbf{9})$$

$$\boldsymbol{PP(futuro)} = \begin{cases} \mathbf{.0}, & \boldsymbol{si} \ \rightarrow \ \mathbf{Tobs} + \Delta\boldsymbol{TSM}_{(GCMs)} < \boldsymbol{Tcrit(obs)} + \Delta\boldsymbol{Tcrit(GCMs)} \\ a_{obs} \cdot \left(TSM_{obs} + \Delta TSM_{PROM_{GCM}} - (Tcrit_{obs} + \Delta Tcrit_{GCM}\right) & \boldsymbol{si} \rightarrow \ TSM_{obs} + \Delta TSM_{GCM_prom} \geq Tcrit_{obs} + \Delta Tcrit_{GCM} \end{cases} \quad --\rightarrow (\mathbf{10})$$

Del análisis de sensibilidad se encontró que el cambio de la pendiente influye en los resultados de estimación. Además las pendientes del presente y futuro muestran una relación de 1 a 1.3 como se verá en los resultados. Debido a esto se realizó otra estimación de PP usando un cambio de pendientes. Se reemplazó "$\boldsymbol{a_{obs}}$" de la ecuación 10 por la siguiente expresión: $\boldsymbol{a_{obs}} \times \frac{a_{futuro}}{a_{presente}}$.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados se dividen en siete partes y cada una de ellas está en concordancia con la metodología. Se discutirán los resultados de cada una de las siete partes por separado haciendo énfasis de los resultados más importantes.

4.1.1 Relación empírica entre la precipitación (PP) mensual y la temperatura de la superficie del mar (TSM) mensual con datos observados.

Se estimaron los parámetros del MFE (Tcrit y "a") usando datos de TSM de cada grilla numerada que está ilustrada en la Figura 9 y la PP en la estación de El Salto y la estación de Piura. Se estimó una nueva PP usando los parámetros (Tcrit y "a") y se calculó el RMSE entre la PP observada y la PP estimada con el MFE. Los resultados se encuentran en el Cuadro 5.

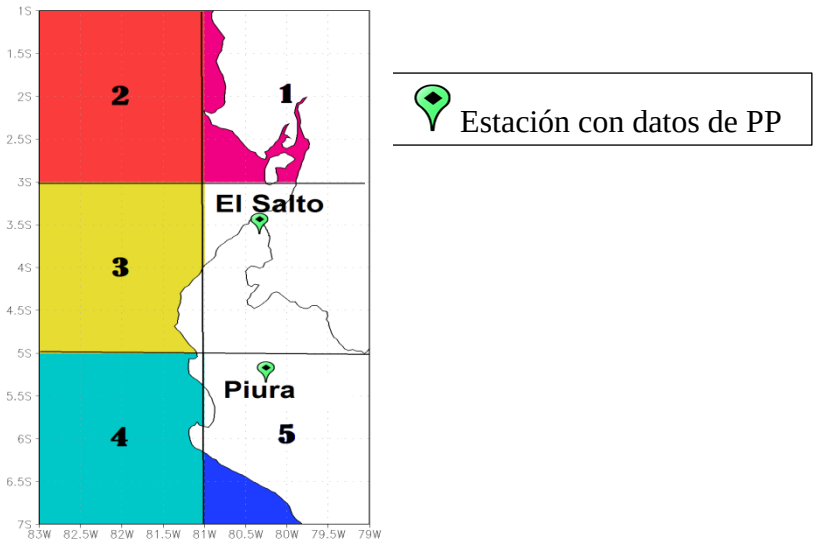


Figura 9: Zona de Estudio.

Los resultados que se muestran en el Cuadro 6, mostraron que la precipitación observada en el Salto y la estimada con la TSM de la grilla tres (82 °W 4°S) tiene un RMSE de 56.18 mm mes-1 , el más bajo para esta estación. De la misma manea, para la estación Piura se encontró

un RMSE de 31.91 mm mes-1 al relacionar la precipitación de esta estación con la estimada con la TSM de la grilla 4.

Cuadro 6: Parámetros del MFE estimados en datos observados.

			EL SALTO – TUMBES		CORPAC - PIURA	
	POSICION		RMSE (mm mes-1)	Tcrit (°C)	RMSE (mm mes-1)	Tcrit(°C)
1	80 °W	2°S	66.0213	25.8	46.6316	26.8
2	82 °W	2°S	58.7378	25.7	41.7655	26.4
3	82 °W	4°S	56.1843	25.2	35.6960	26.1
4	82 °W	6°S	58.0730	25.0	31.9179	25.9
5	80 °W	6°S	57.5477	24.2	32.0495	25.1

Se realizaron diagramas de dispersión entre la TSM de la grilla 3 con la PP mensual de El Salto en Tumbes y la TSM de la grilla 4 con la PP mensual de la estación de Piura. En la Figura 10 se muestra la PP estimada con el MFE (línea roja) y los parámetros estimados para cada zona respectivamente. Tumbes y Piura difieren ligeramente entre ellos en los parámetros estimados, pero el ajuste visual de la PP calculado con el MFE es bastante bueno. La Tcrit para que ocurra precipitación en Tumbes es 25.2°C y para Piura es de 25.9°C. Por otro lado la pendiente ("a") de Tumbes es 191.91 mm °C-1 y la pendiente de Piura es 197.15 mm° C-1.

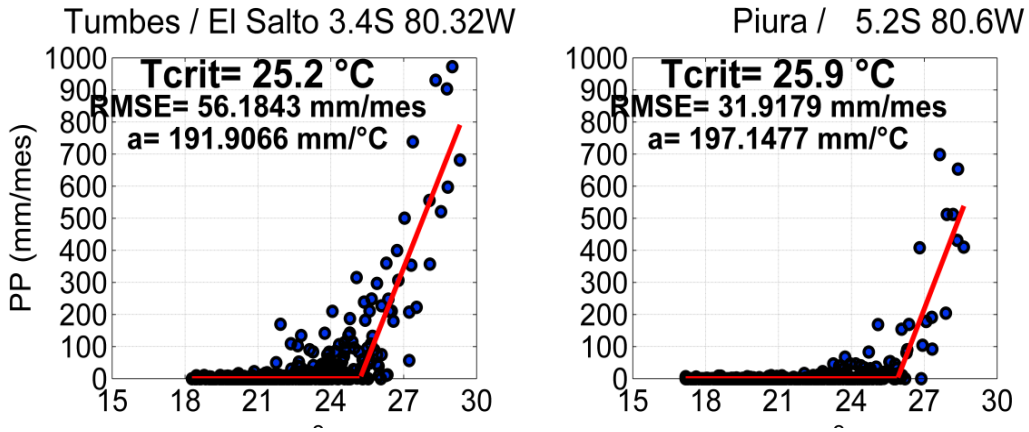


Figura 10: Diagramas de dispersión entre : la TSM (82 °W 4°S) y PP en el Salto (3.4°S 80.32°W) en la izquierda y la TSM (82 °W 6°S) y PP en Piura (5.2°S 80.6°W) en la derecha.

A pesar de tener la misma caracterización climática, la cantidad de PP promedio multianual en Tumbes y Piura es diferente (Figura 1 ubicada en la sección 2.2). En Tumbes se observa más cantidad de precipitación que en Piura. Sin embargo y de acuerdo a los parámetros encontrados, si la TSM se elevara un grado por encima de la Tcrit se esperaría mayor precipitación en Piura que en Tumbes dado que su pendiente es mayor.

El grado de ajuste entre el MFE y los datos observados (línea roja a lo largo de los datos observados) es una forma de evaluar visualmente el comportamiento de este modelo. Si tiene buen ajuste con los datos observado será bueno porque representa la realidad (asumiendo que tus datos observados son buenos) y de lo contrario no es bueno.

La PP promedio observada en Tumbes es 37 mm mes^{-1} y la estimada con el MFE es 27 mm mes^{-1}. En el caso de Piura, la PP promedio observada es 14 mm mes^{-1}, mientras que la estimada con MFE es 9 mm mes^{-1}. En ambos casos el MFE subestima la PP promedio estimada, esto se debe a que este modelo asume que la PP es cero cuando la TSM no alcanza o supera la Tcrit. Sin embargo en la realidad sí puede haber lluvia asociada a otros mecanismos físicos cuando la TSM es menor a la Tcrit.

Entonces, la PP estimada con el MFE se ajusta mejor a los datos observados en Piura, mientras que en Tumbes parecen existir otros mecanismos que favorecen la PP (no convectiva). Por otro lado, la relación lineal a partir de la Tcrit y su ajuste es bastante buena en ambos lugares.

4.2 Relación de temperatura superficial del mar (TSM) y la precipitación (PP) en los GCMs.

Para analizar las precipitaciones y su grado de relación con la TSM (de los mismos modelos) se realizaron gráficos de dispersión entre estas 2 variables para los escenarios de presente y futuro. Se utilizó la grilla 3 para obtener los valores de PP y TSM relacionados a Tumbes y la grilla 4 para Piura.

Los diagramas de dispersión entre los datos de TSM y de PP sirvieron para categorizar a los modelos. Esta categorización consistió en buscar la relación no lineal entre la TSM y la PP, si

se encontraba una relación similar a la que se encontró en datos observados entonces fue llamado de buen ajuste. Si por lo menos presentaba una relación no lineal entre la TSM y PP pero no tan obvia, se llamó de relativo ajuste y finalmente si no presentaba la relación observada de TSM y PP, se eliminaron.

Se encontró 9 modelos con buen ajuste, estos son: ACCESS1-0, ACCESS1-3, HadGEM2-AO, HadGEM2-CC, HadGEM2-ES, MIROC5, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR, MRI-CGCM3; sus gráficos de dispersión se muestran en las Figuras 11, 12 y 13 para Tumbes y para ambos escenarios, para el escenario del presente (azul) y del futuro (rojo).

Por otro los modelos con relativo ajuste son: bcc-csm1-1, bcc-csm1-1-m, CCSM4, CESM1-BGC, CESM1-CAM5, CMCC-CM, CMCC-CMS, CNRM-CM5, CSIRO-Mk3-6-0, GFDL-CM2p1, GFDL-CM3, GFDL-ESM2G, GFDL-ESM2M, HadCM3, Inmcm4, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR, IPSL-CM5B-LR, MIROC4h. Sus diagramas de dispersión se muestran en las Figuras 14, 15, 16, 17, 18 y 19.

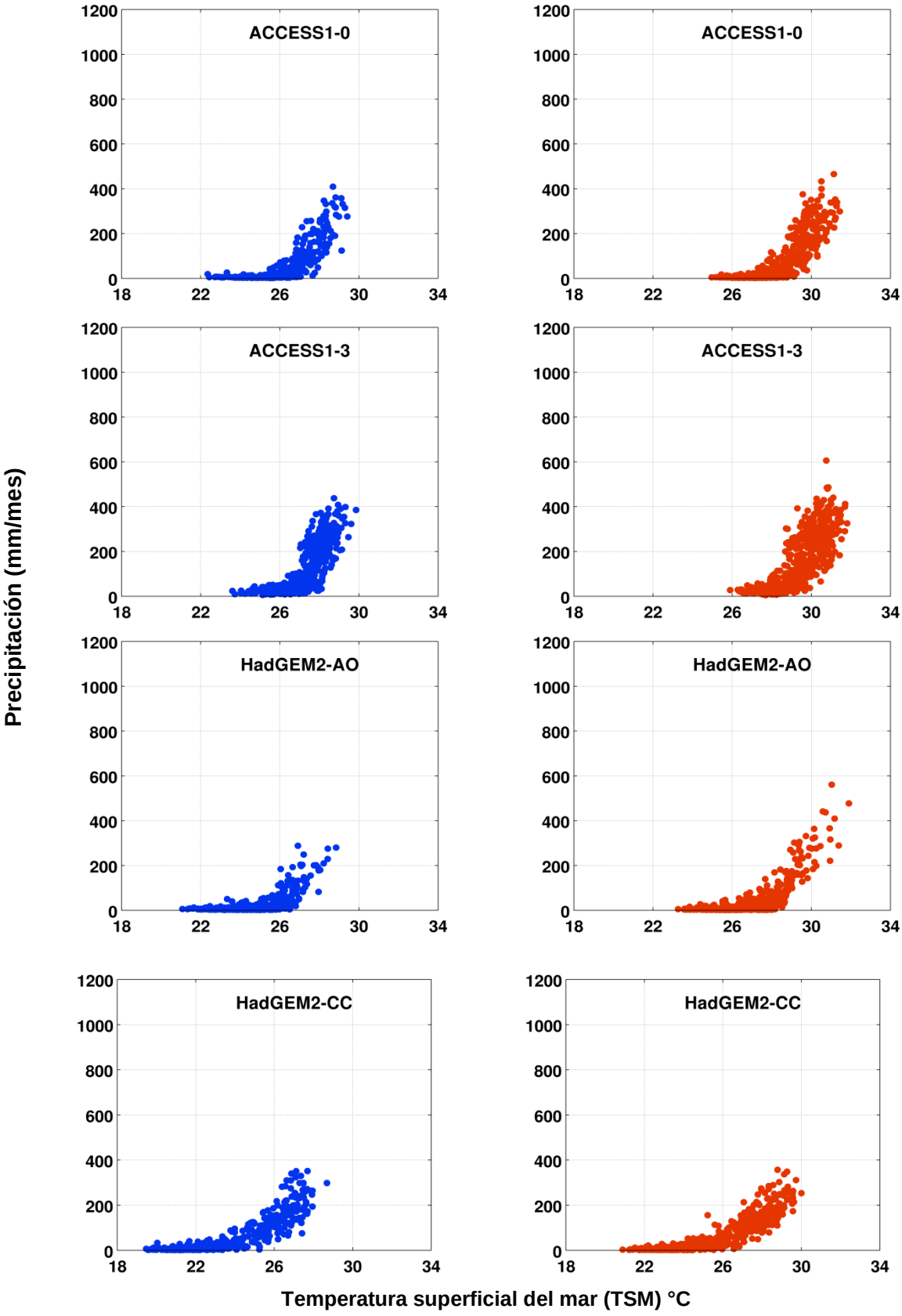


Figura 11: Diagrama de dispersión entre TSM y PP para modelos con buen ajuste para Tumbes. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro.

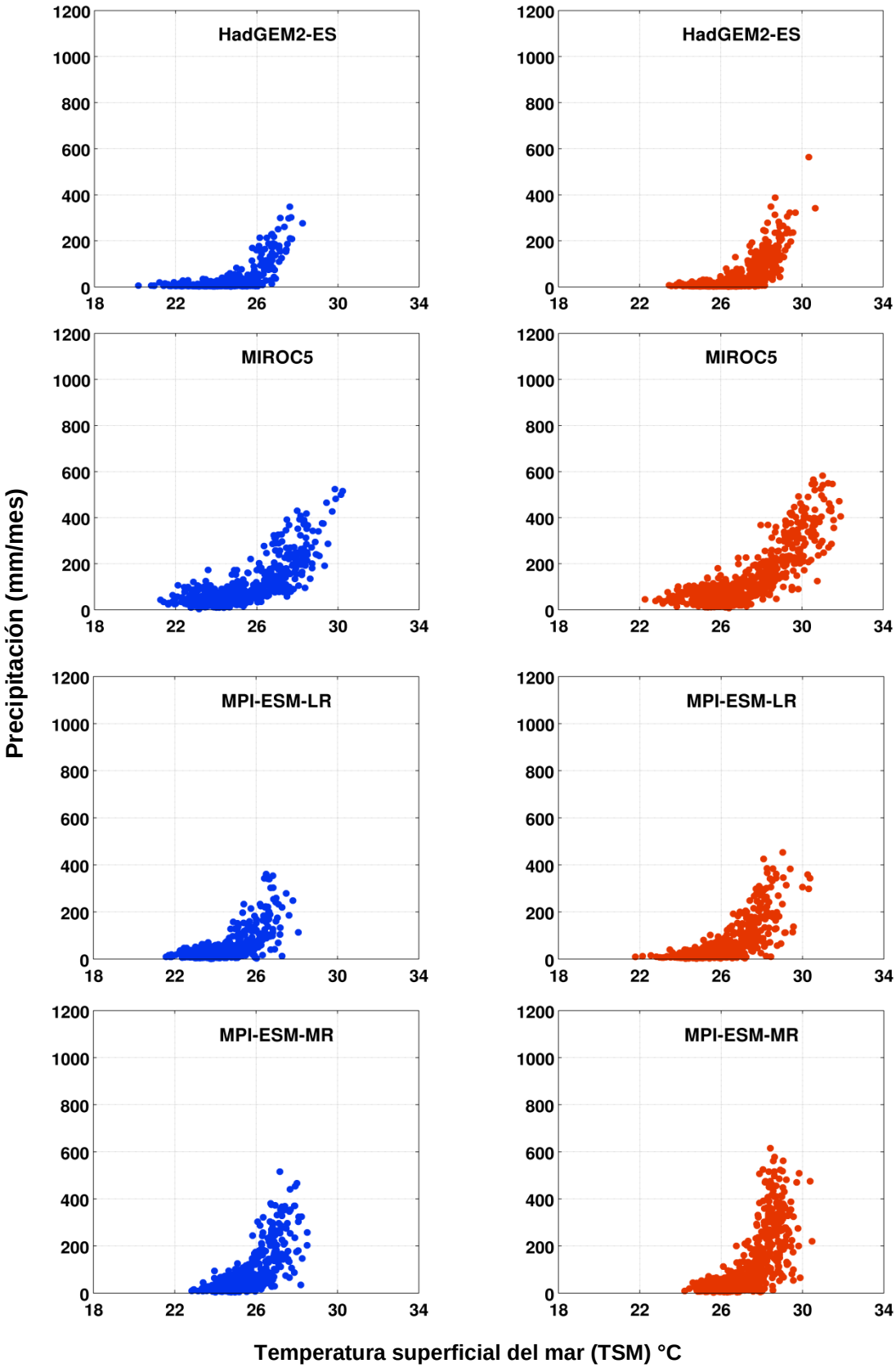


Figura 12: Diagrama de dispersión entre TSM y PP para modelos con buen ajuste para Tumbes. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro.

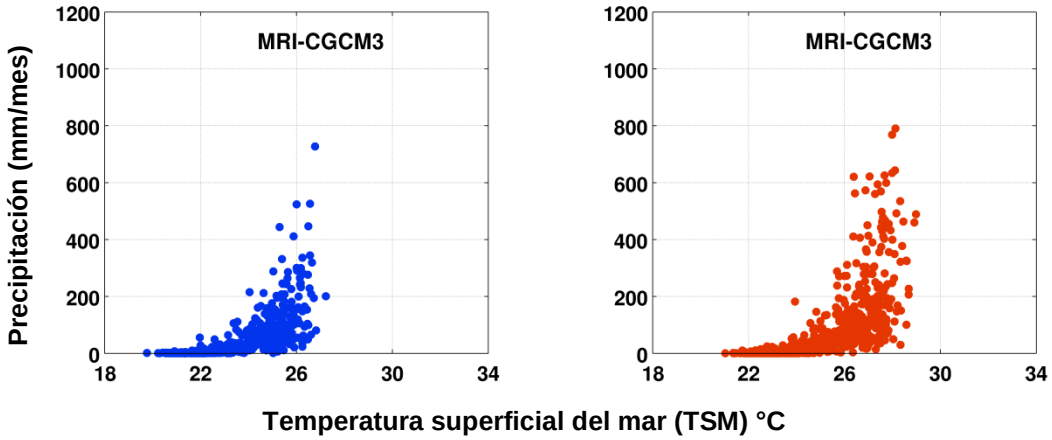


Figura 13: Diagrama de dispersión entre TSM y PP para modelos con buen ajuste para Tumbes. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro.

→→→→ De aquí en adelante, los modelos con relativo ajuste.

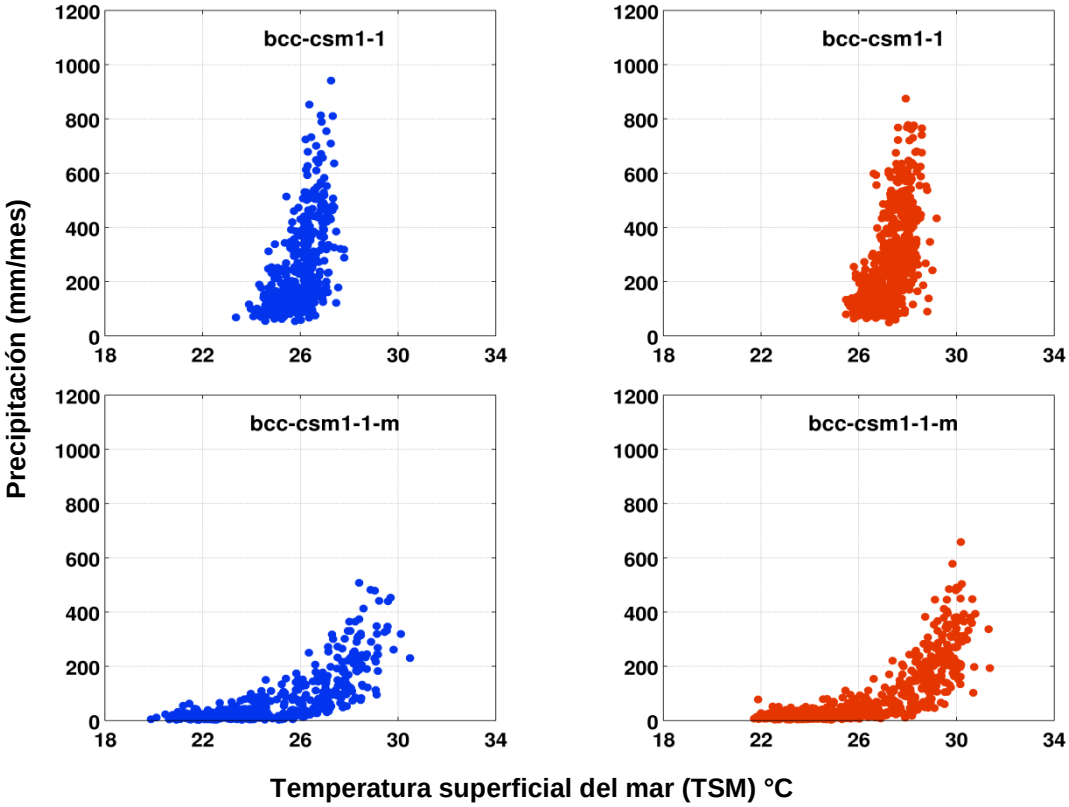


Figura 14: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos con relativo ajuste para Tumbes. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro.

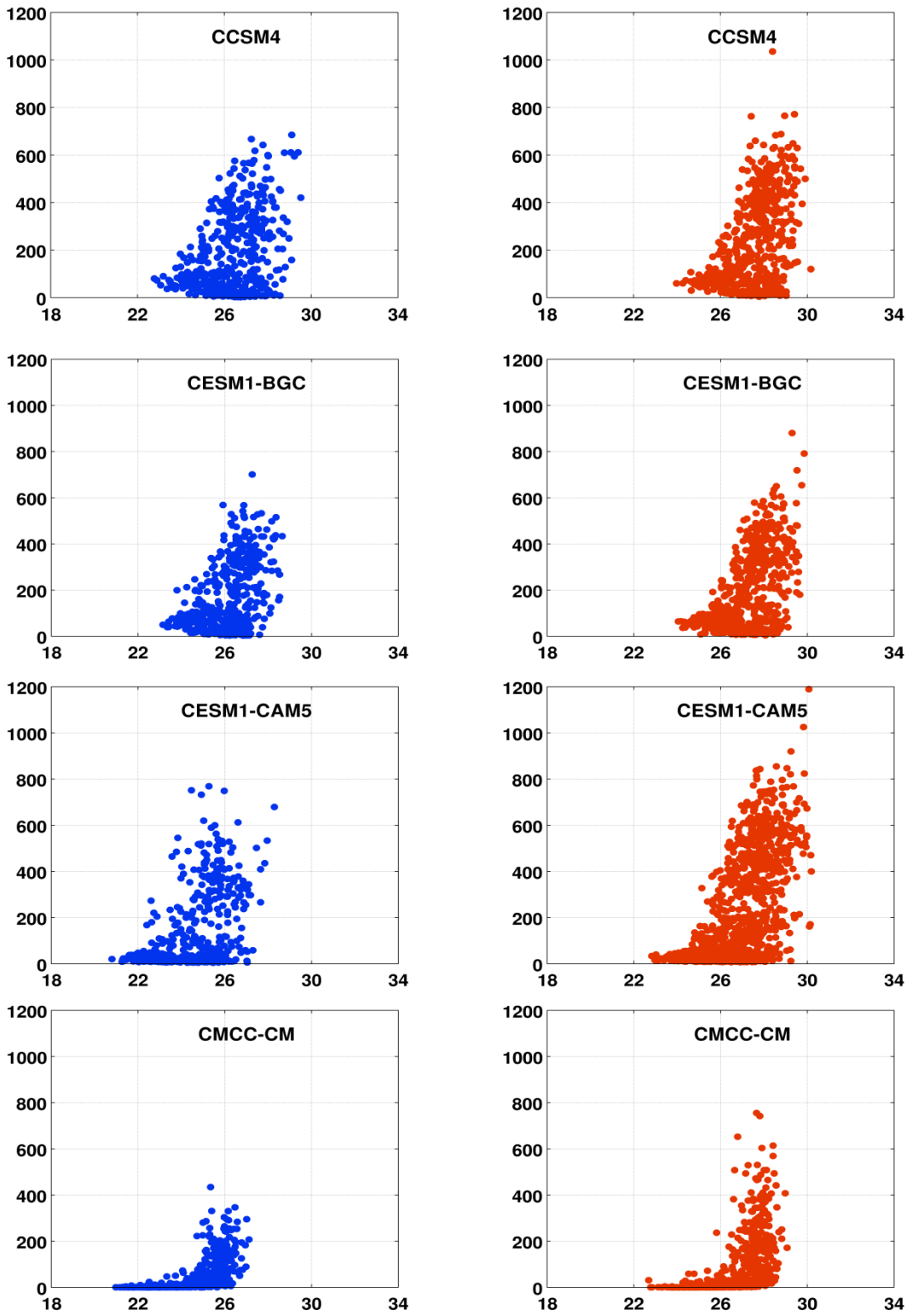


Figura 15: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos con relativo ajuste para Tumbes. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro.

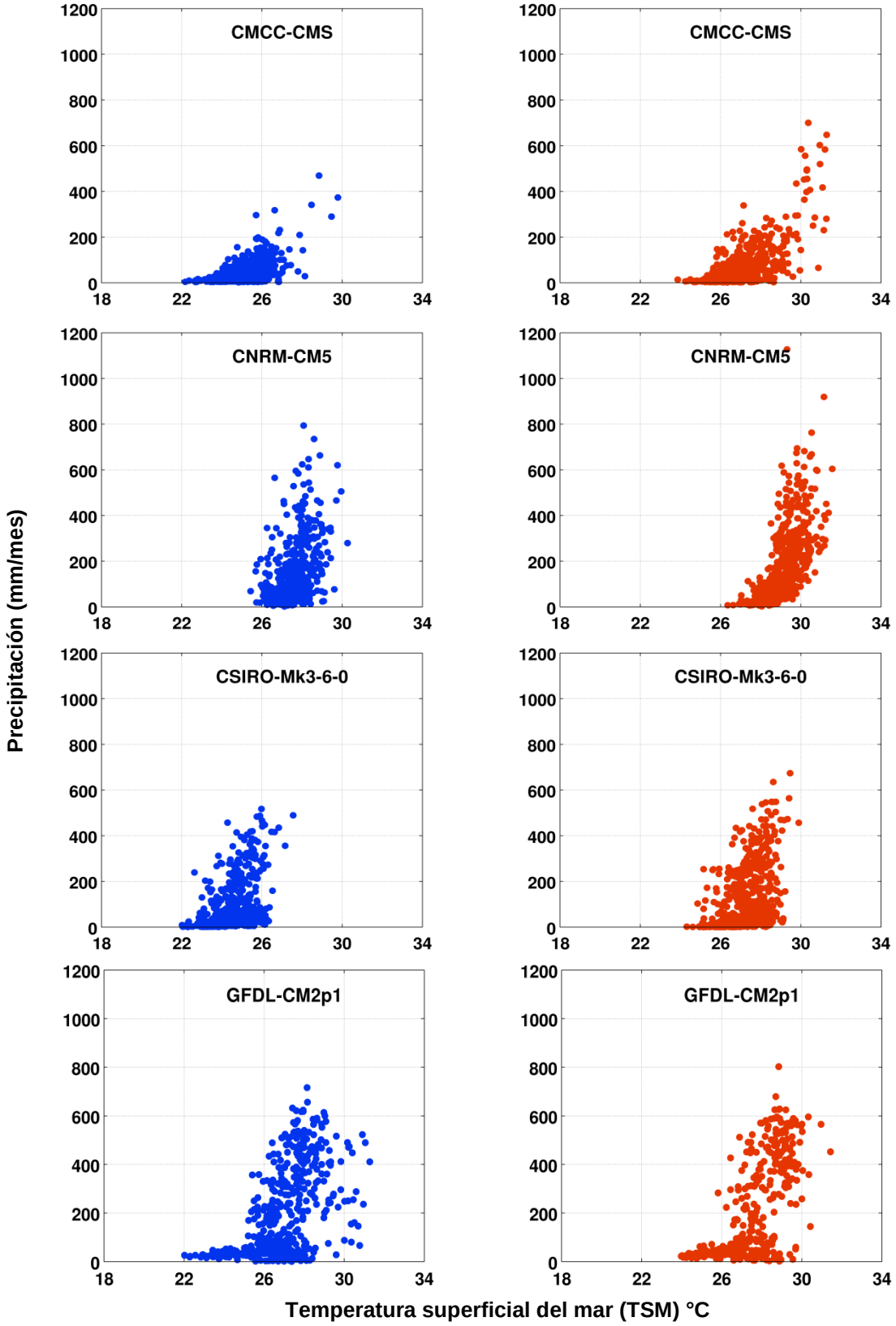


Figura 16: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos con relativo ajuste para Tumbes. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro.

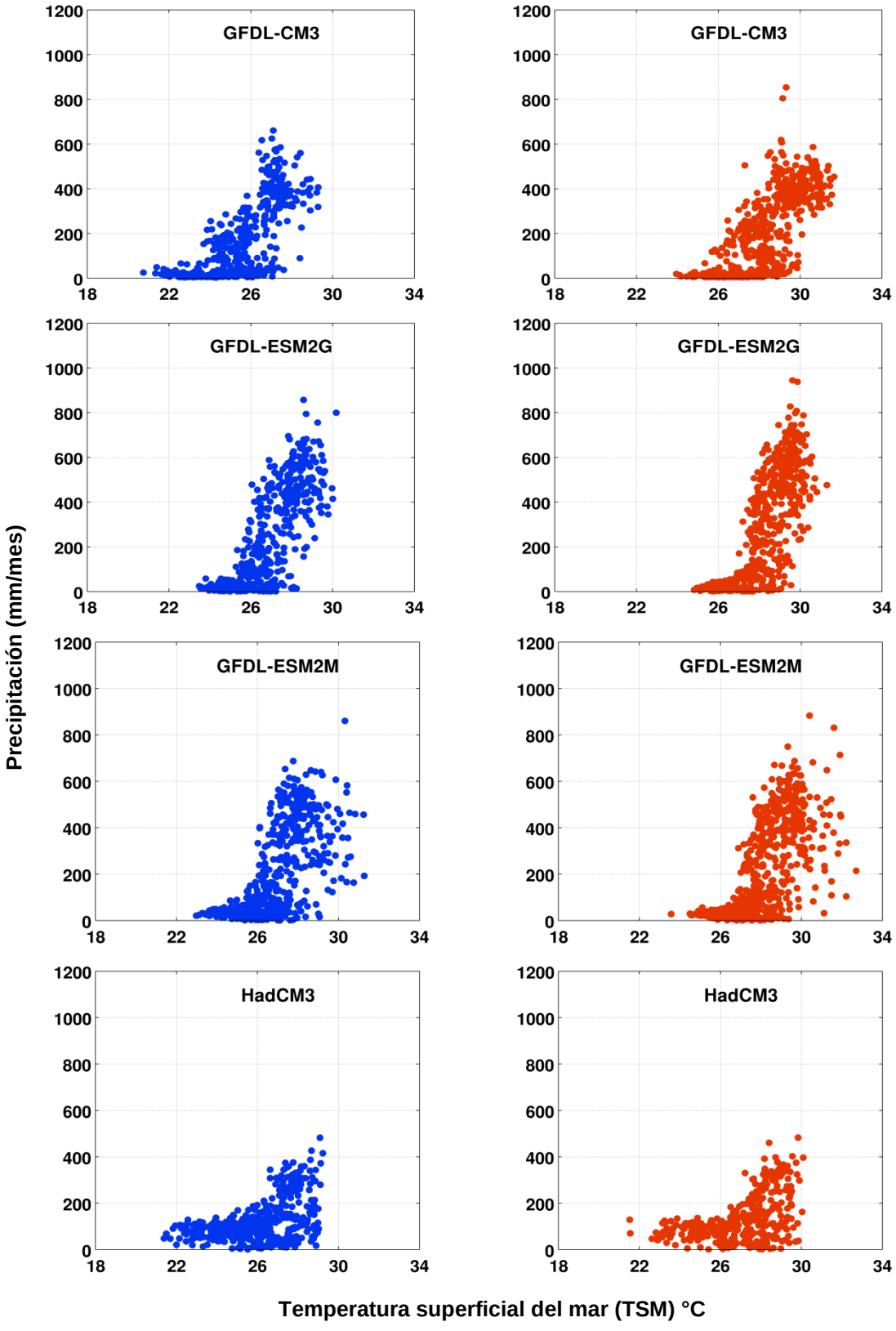


Figura 17: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos con relativo ajuste para Tumbes. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro.

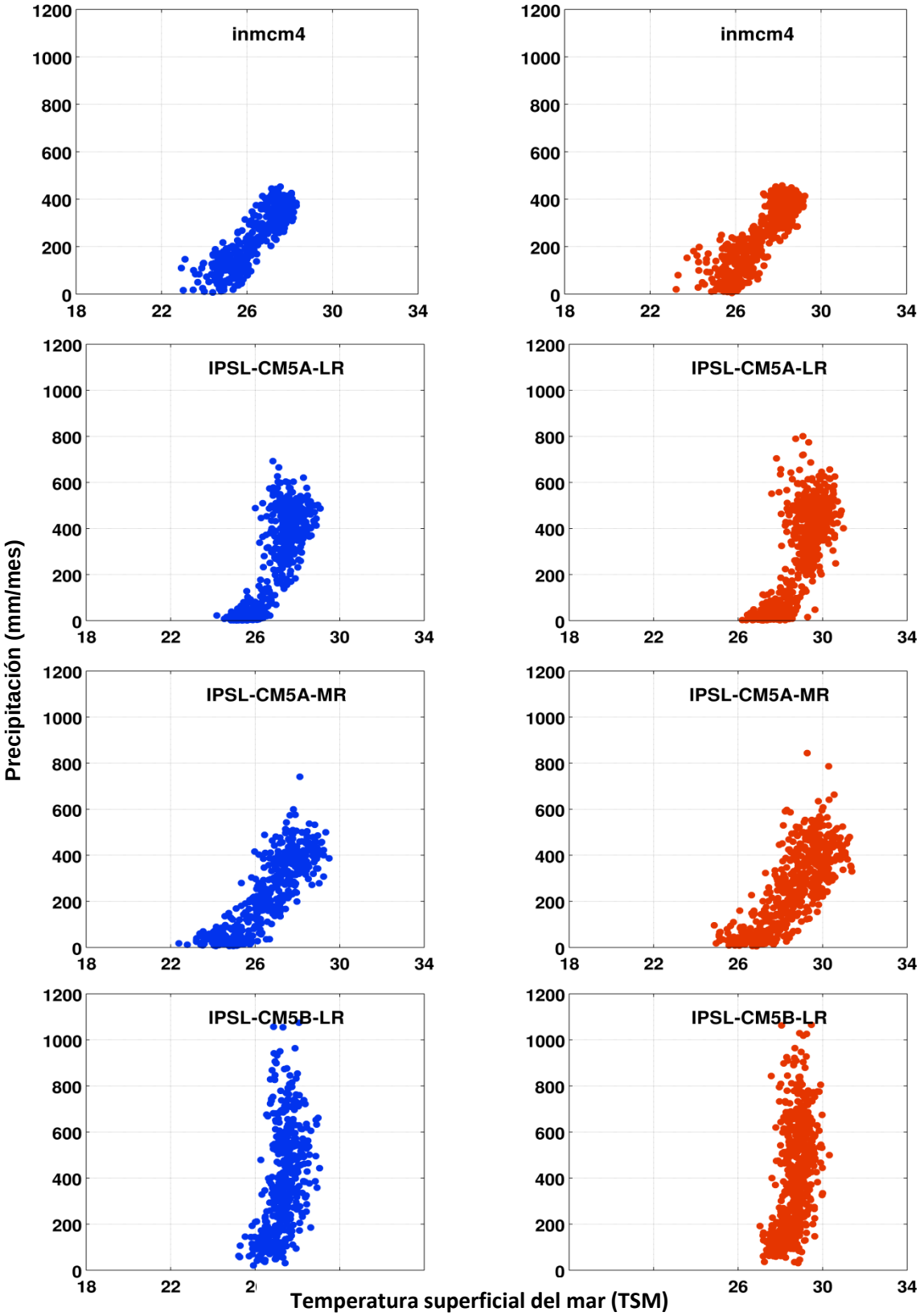


Figura 18: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos con relativo ajuste para Tumbes. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro.

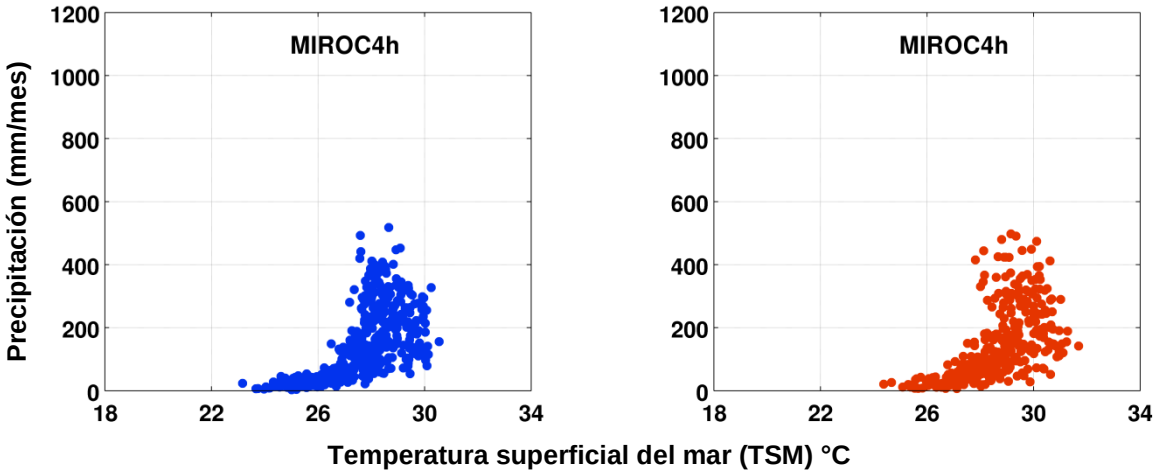


Figura 19: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos con relativo ajuste para Tumbes. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro.

Finalmente los modelos que fueron eliminados por no presentar la relación de TSM y PP parecido al encontrado en datos observados son: CanCM4, CanESM2, FGOALS-g2, GISS-E2-H, GISS-E2-H-CC, GISS-E2-R, GISS-E2-R-CC, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, NorESM1-ME, NorESM1-M. Sus diagramas de dispersión se muestran en las Figuras 20, 21, 22,23.

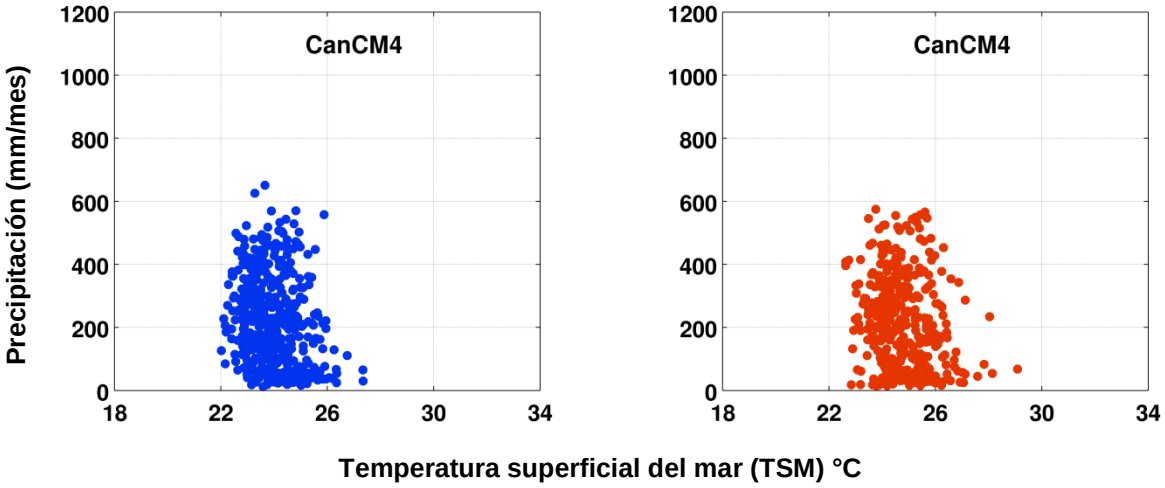


Figura 20: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos eliminados para Tumbes. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro.

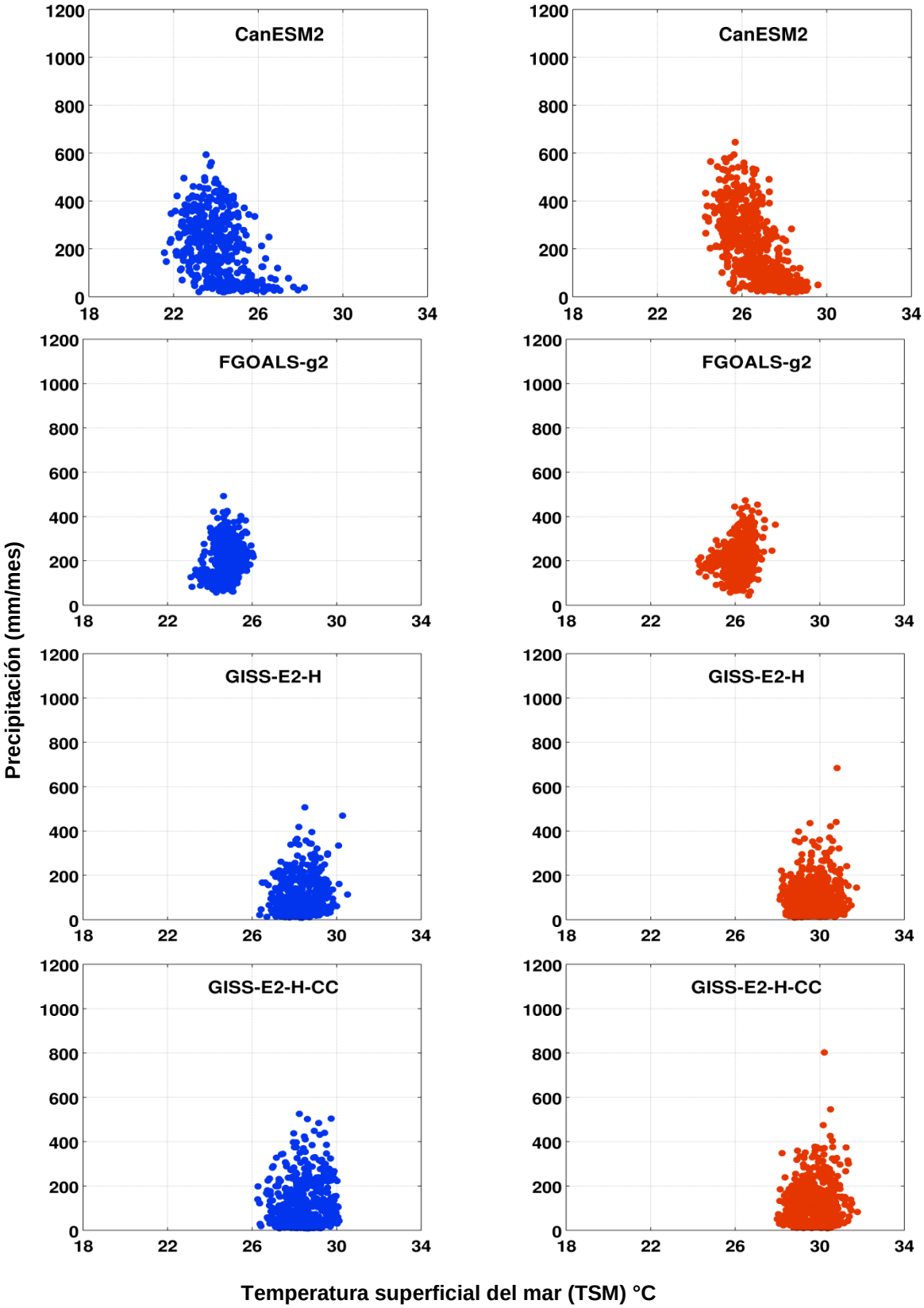


Figura 21: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos eliminados para Tumbes. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro.

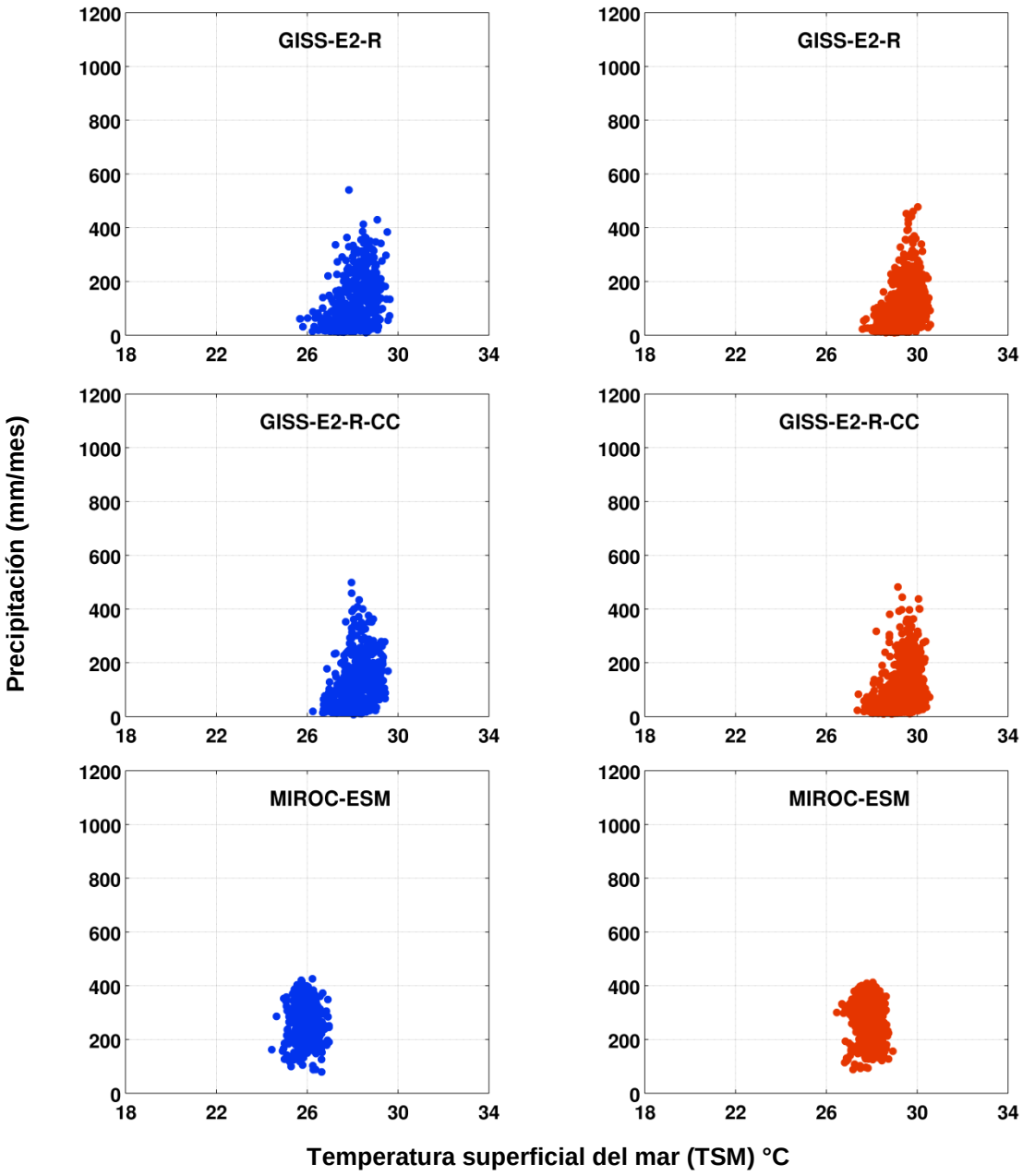


Figura 22: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos eliminados para Tumbes. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro.

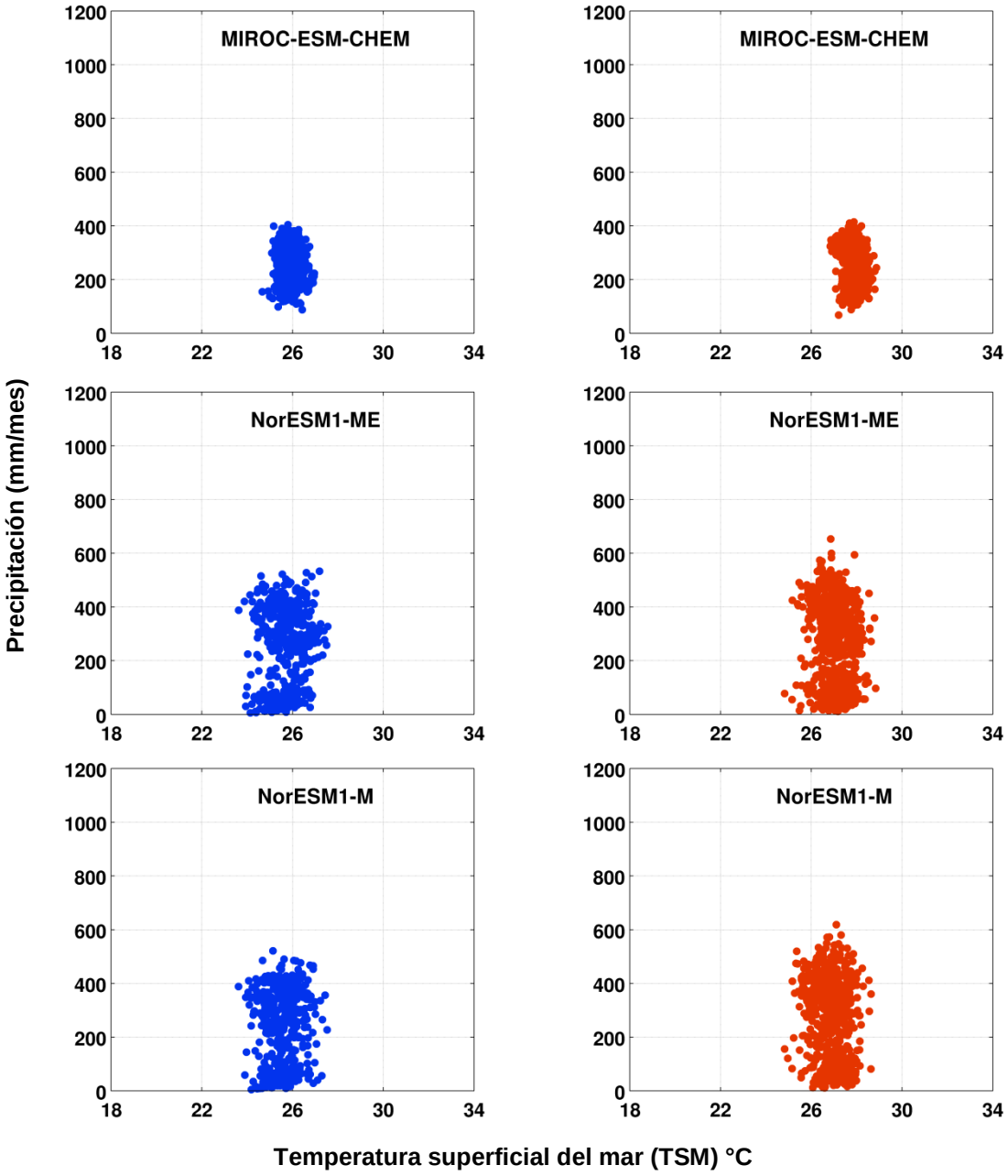


Figura 23: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos eliminados para Tumbes. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro.

Los resultados para Piura, en la que se obtuvieron los mismos modelos por clasificación se muestran en las siguientes figuras. Los modelos con buen ajuste se ilustran en la Figuras 24,25 y 26.

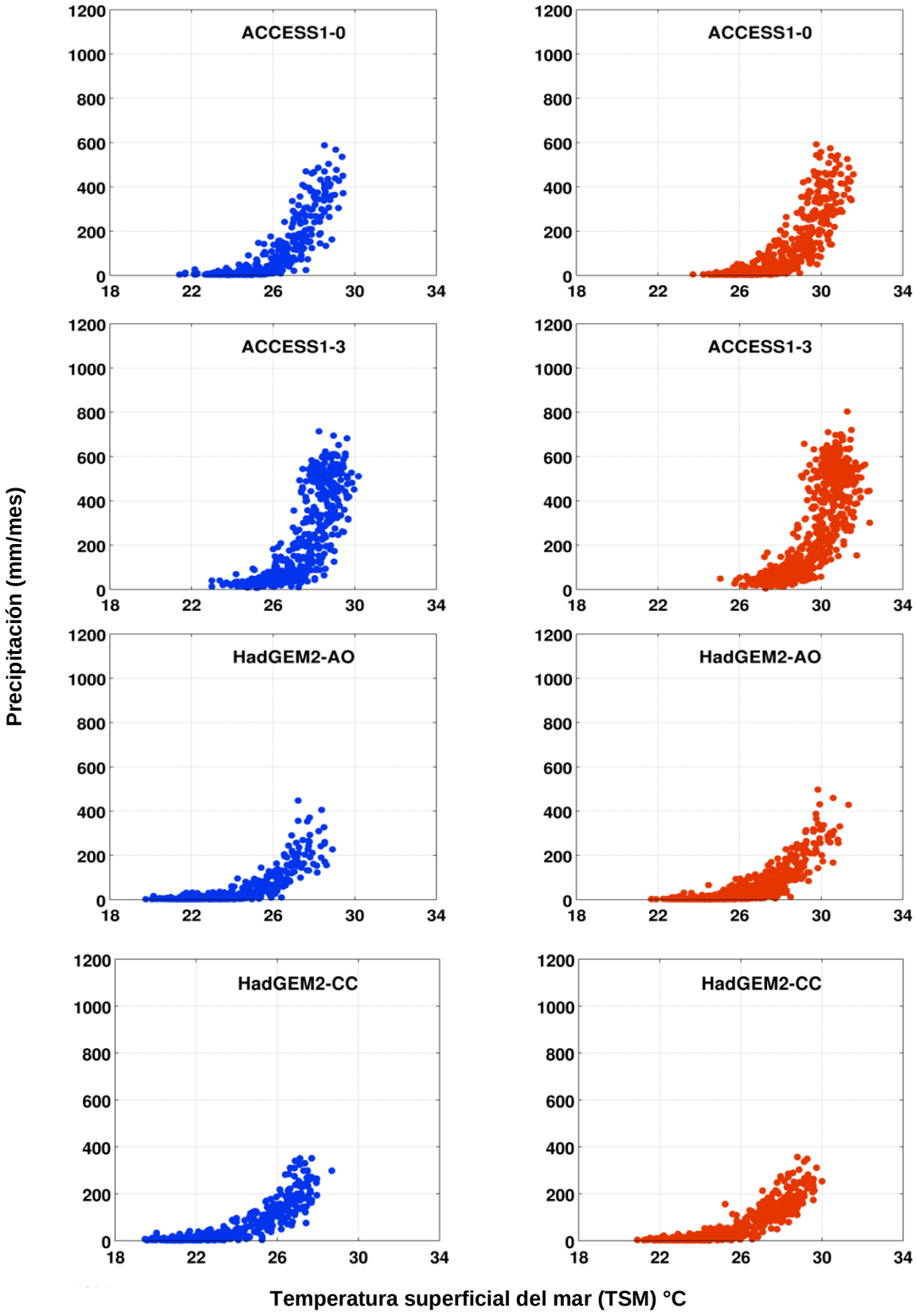


Figura 24: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos con buen ajuste para Piura. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro.

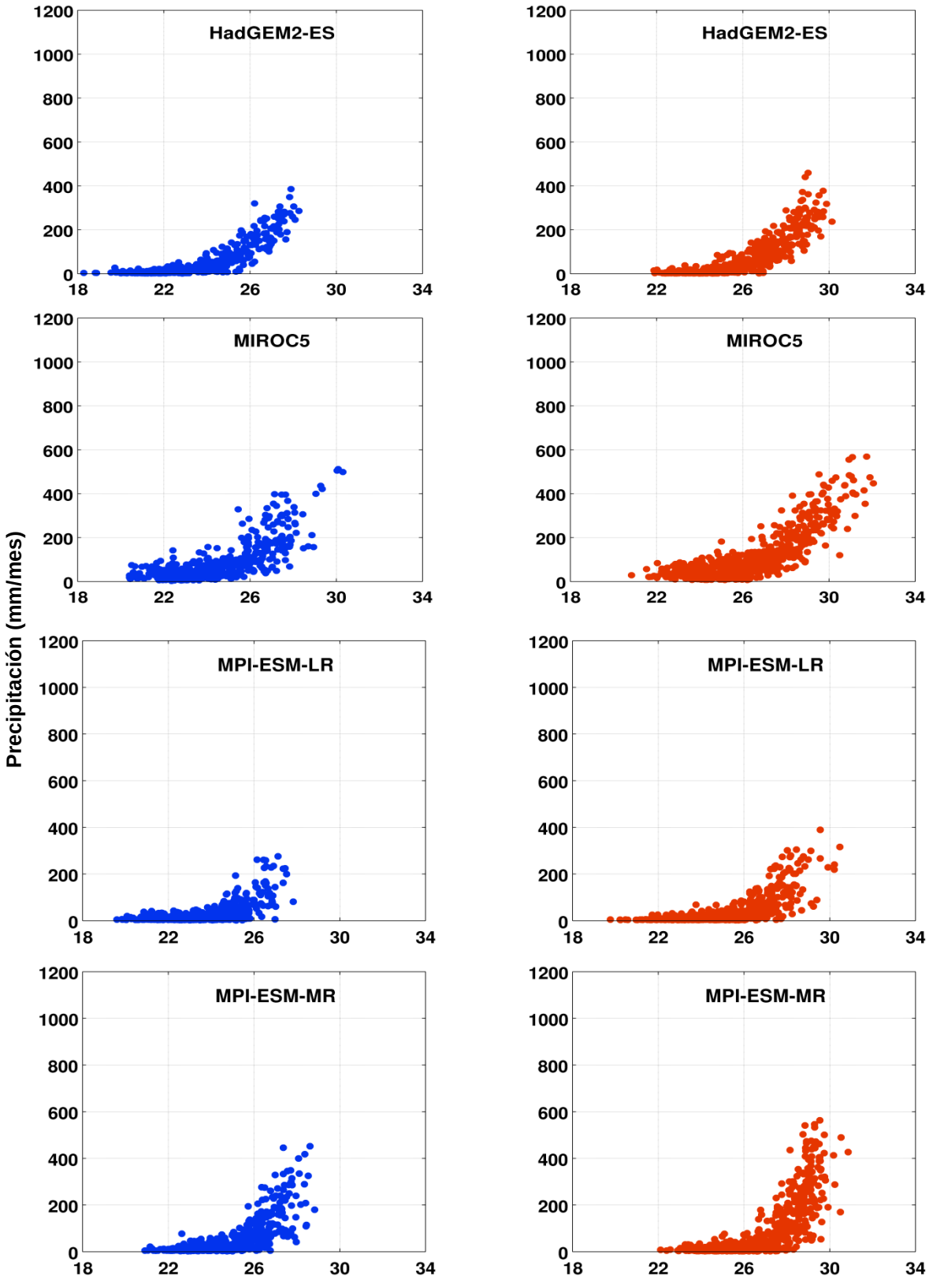


Figura 25: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos con buen ajuste para Piura. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro.

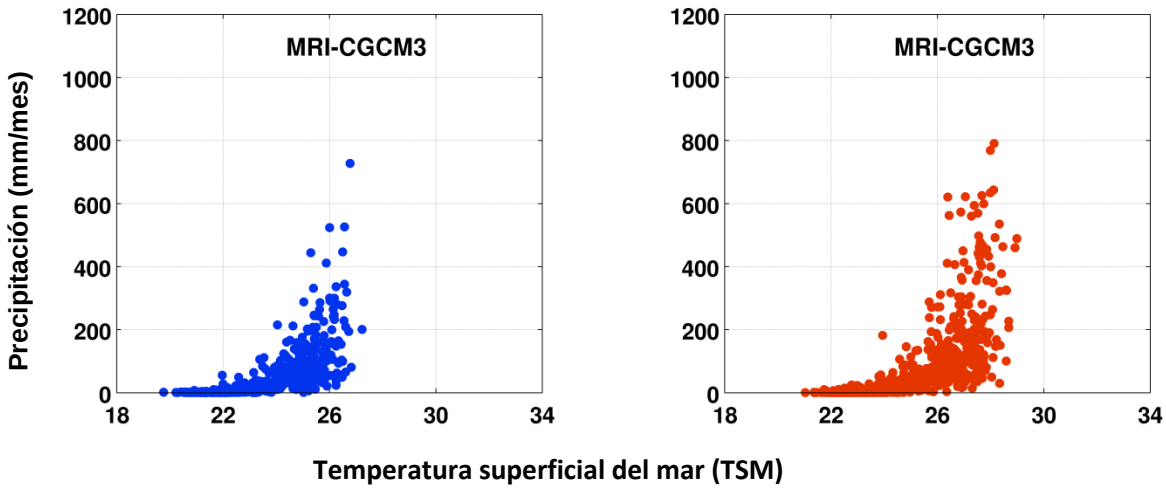


Figura 26: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos con buen ajuste para Tumbes. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro.

Los modelos con relativo ajuste para Piura se muestran en las Figuras 27, 28

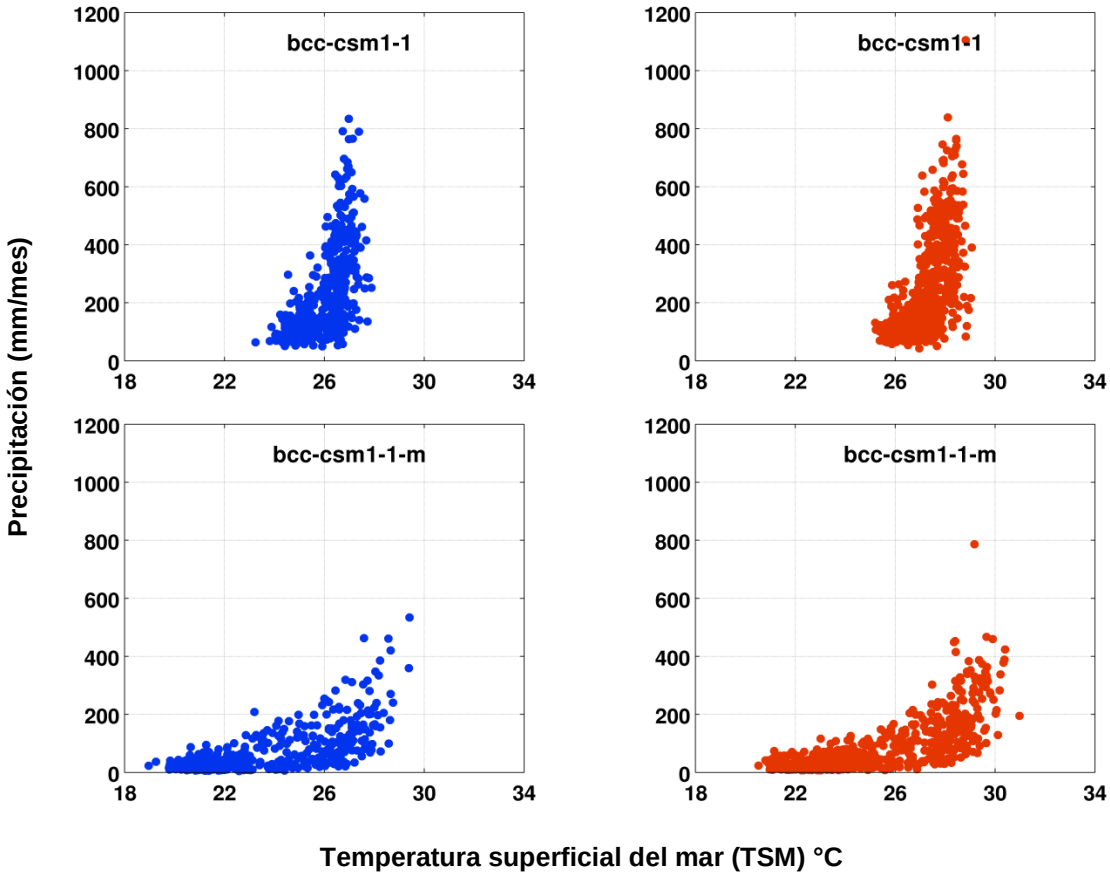


Figura 27: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos con relativo ajuste para Piura. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro.

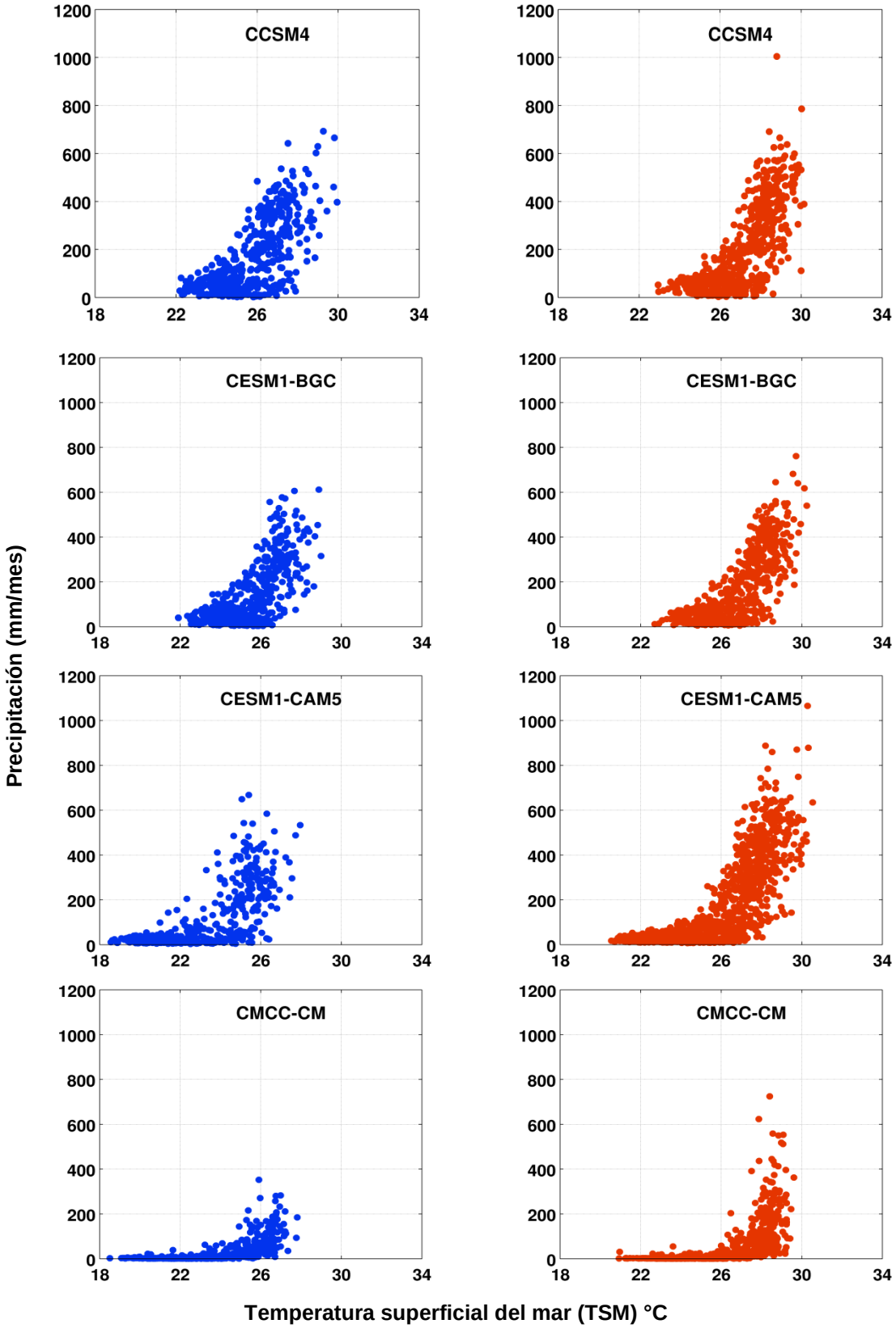


Figura 28: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos con relativo ajuste para Piura. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro.

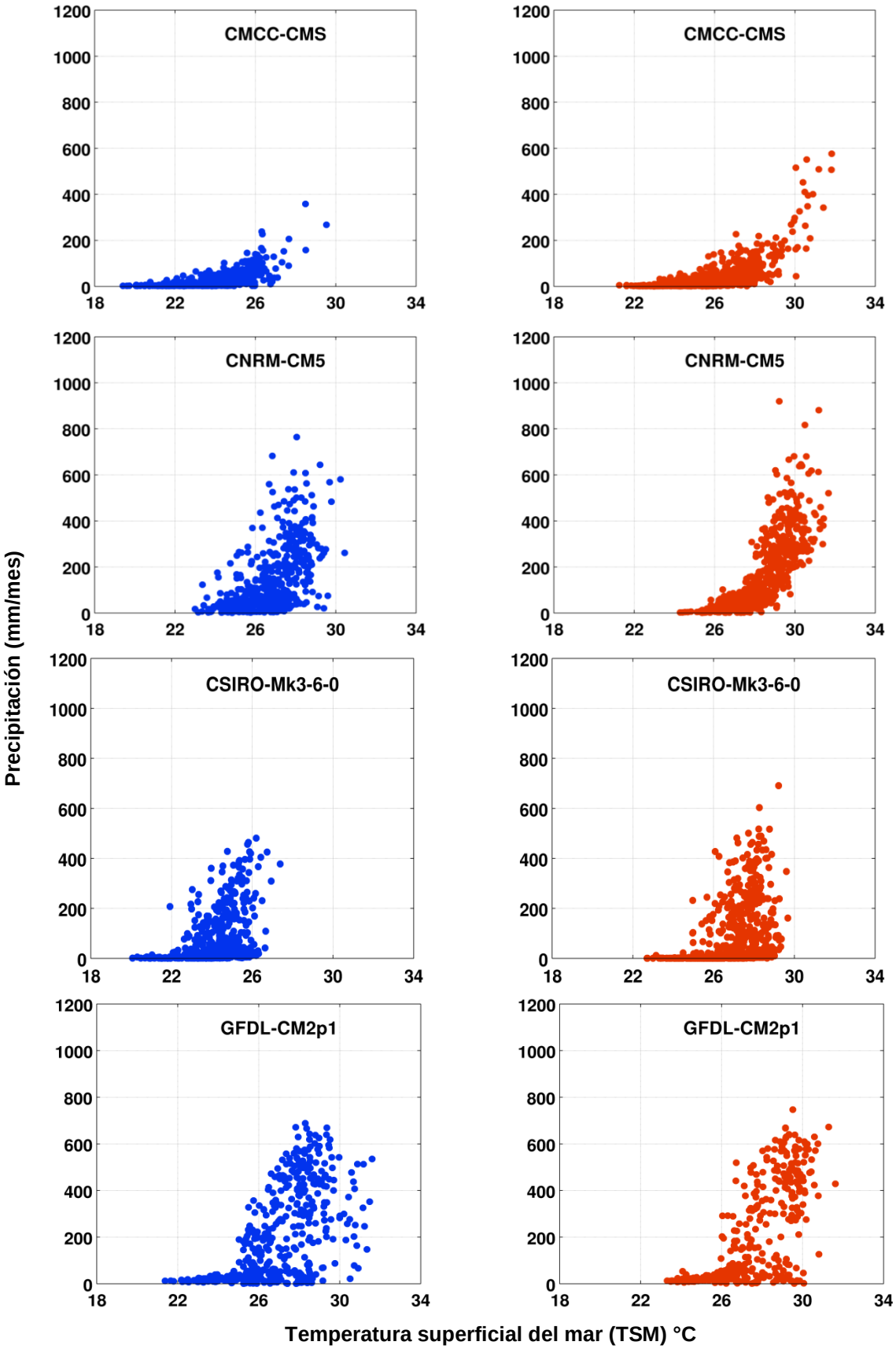


Figura 29: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos con relativo ajuste para Piura. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro.

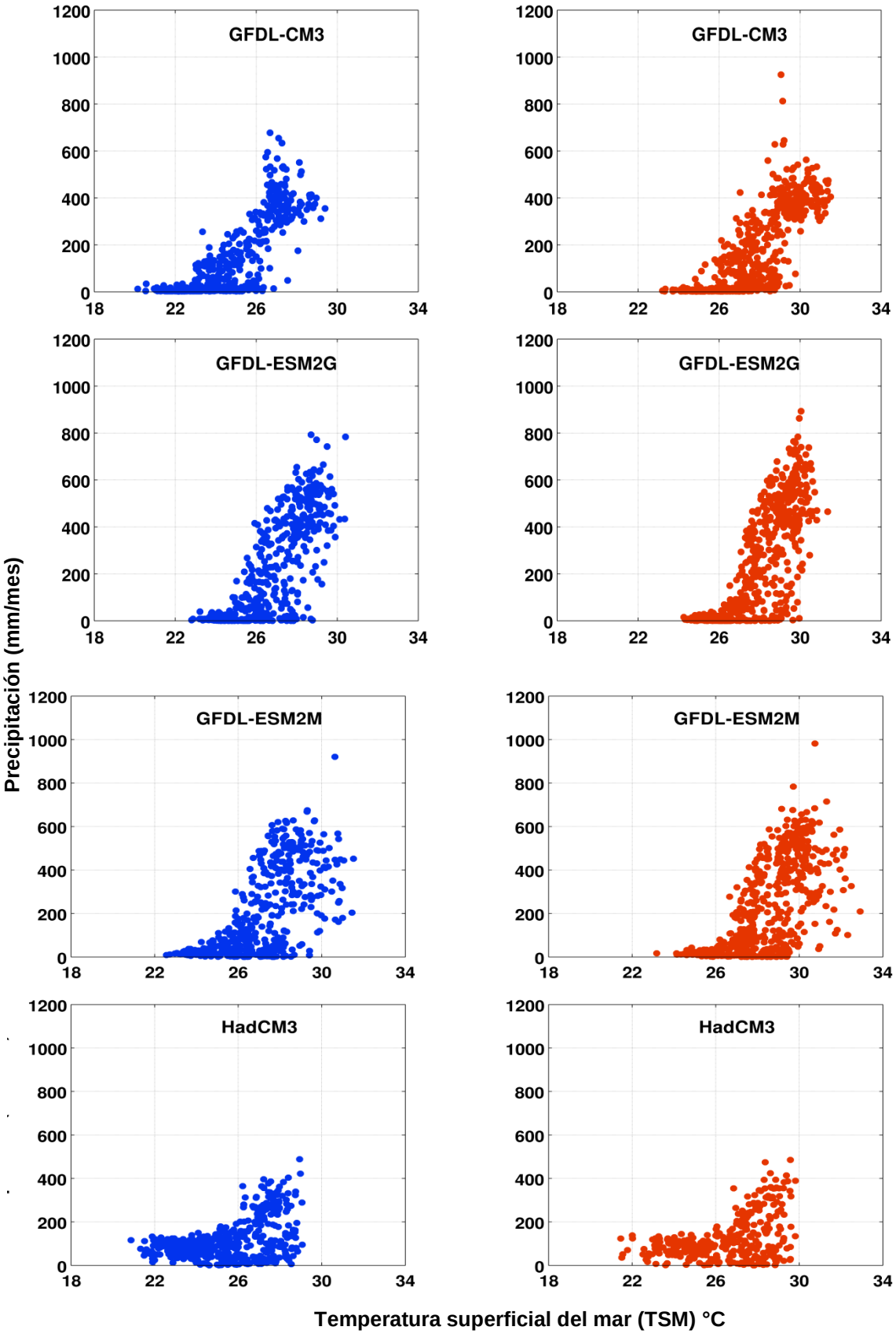


Figura 30: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos con relativo ajuste para Piura. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro.

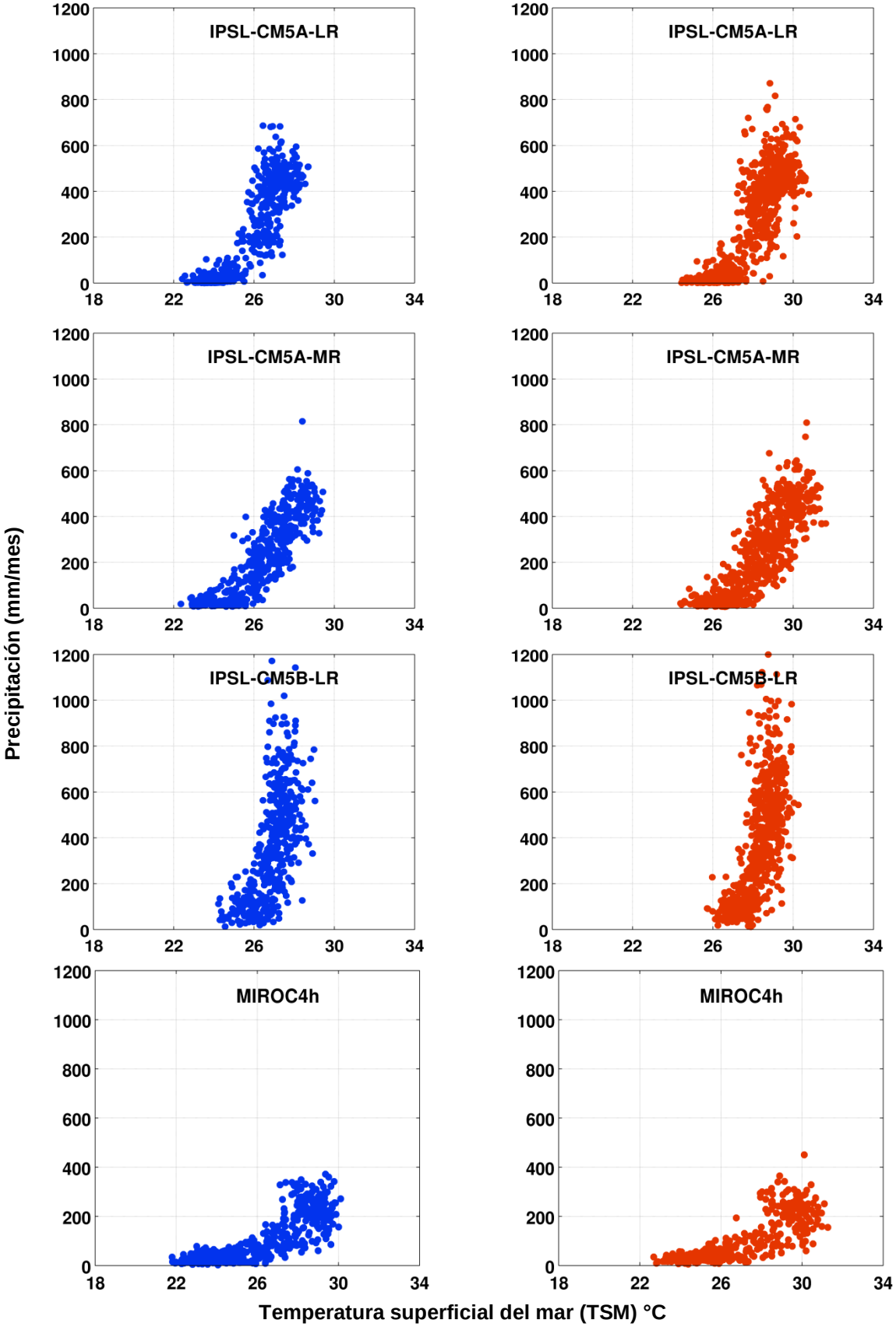


Figura 31: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos con relativo ajuste para Piura. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro.

Finalmente la dispersión entre TSM y PP de modelos que fueron eliminados para Piura se muestran en las Figuras 32, 33 y 34.

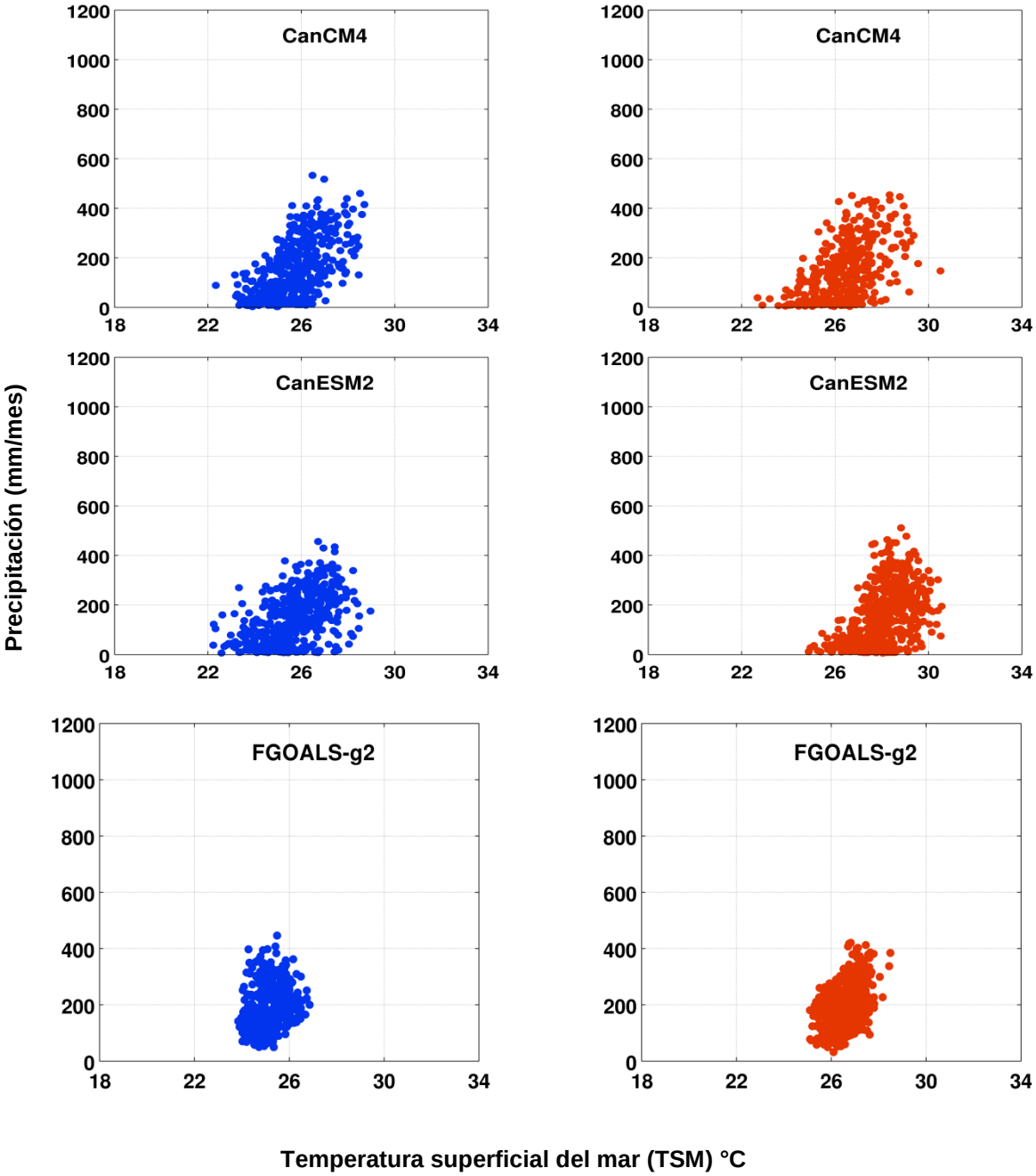


Figura 32: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos eliminados para Piura. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro.

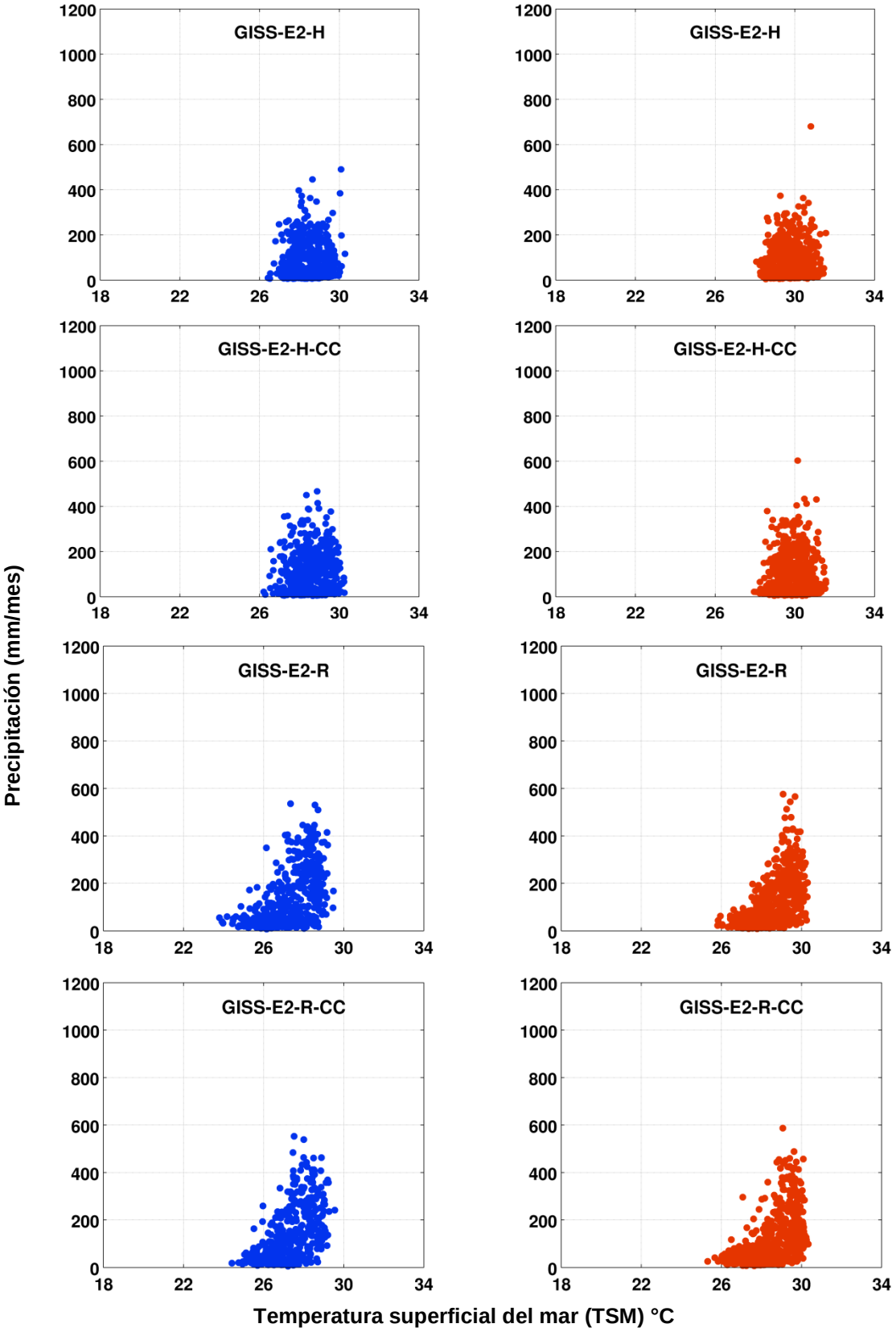


Figura 33: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos eliminados para Piura. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro.

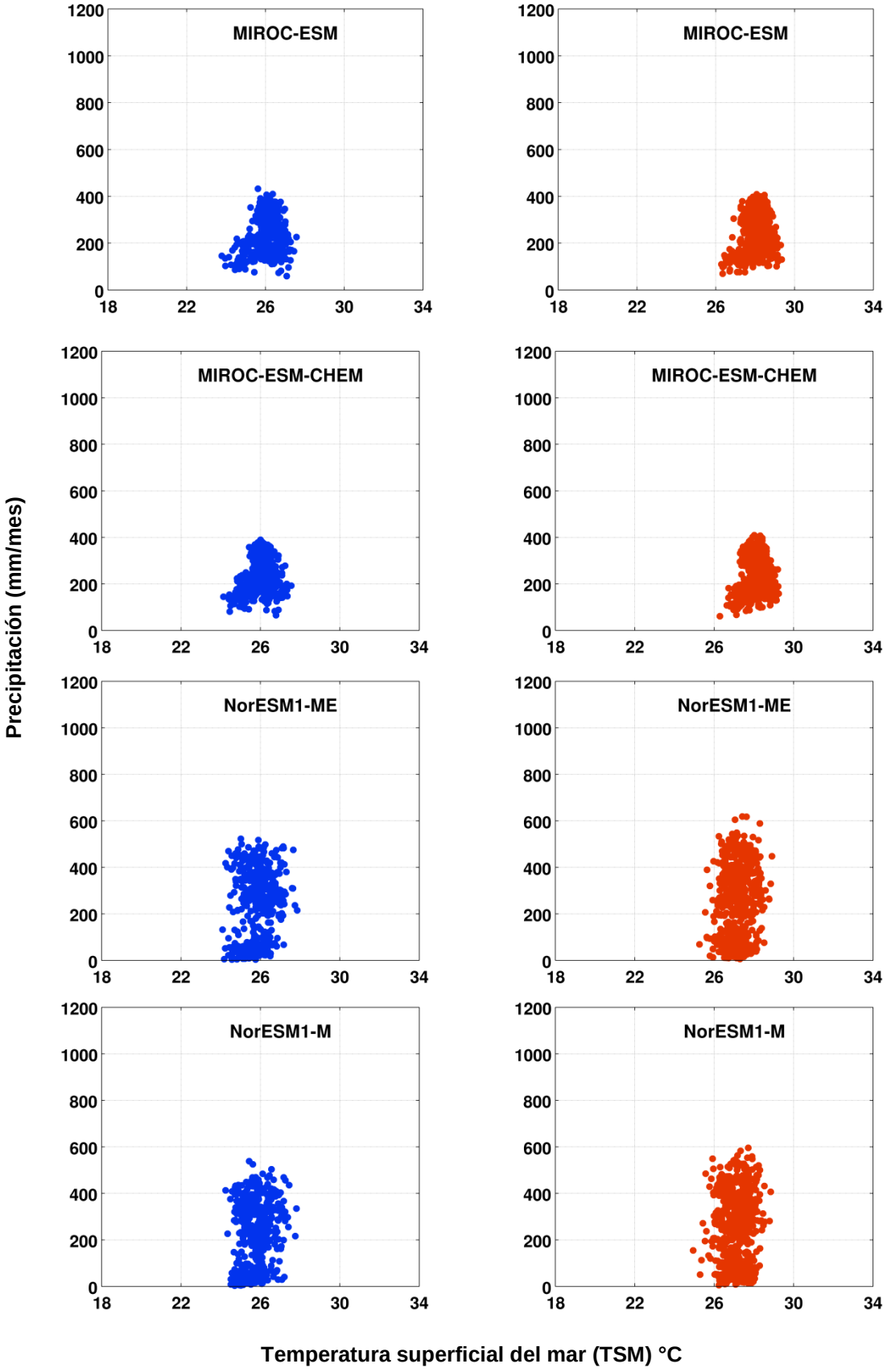


Figura 34: Diagramas de dispersión entre PP y TSM para los modelos eliminados para Piura. El color azul corresponde al escenario del presente y el rojo al escenario del futuro.

De acuerdo al grado de relación no lineal entre la TSM y PP se dividieron los 39 GCMs en tres grupos. El Cuadro 7 muestra los resultados de esta división, 9 mostraron buena relación, 19 relativa relación y 11 mala relación. Solo se continuará la explicación de aquellos GCMs que no fueron eliminados (28 GCMs). Los modelos GFDL-CM2-p1; HadCM3; MIROC4h mostrados en el Cuadro 7 se acompaña de asteriscos porque estos simulan un cambio climático reciente, debido a que su periodo de tiempo para el futuro es 2006 – 2035.

Cuadro 7: Lista de Modelos

UTILIZADOS		**ELIMINADOS**
Buen ajuste	**Relativo ajuste**	
1. ACCESS1-0 2. ACCESS1-3 17. HadGEM2-AO 18. HadGEM2-CC 19. HadGEM2-ES 25. MIROC5 26. MPI-ESM-LR 27. MPI-ESM-MR 28. MRI-CGCM3	3. bcc-csm1-1 4. bcc-csm1-1-m 5. CCSM4 6. CESM1-BGC 7. CESM1-CAM5 8. CMCC-CM 9. CMCC-CMS 10. CNRM-CM5 11. CSIRO-Mk3-6-0 12. GFDL-CM2p1(*) 13. GFDL-CM3 14. GFDL-ESM2G 15. GFDL-ESM2M 20. HadCM3(*) 21. inmcm4 22. IPSL-CM5A-LR 23. IPSL-CM5A-MR 24. IPSL-CM5B-LR 25. MIROC4h(*)	FGOALS-g2 GISS-E2-H GISS-E2-H-CC GISS-E2-R GISS-E2-R-CC CanCM4 CanESM2 MIROC-ESM MIROC-ESM-CHEM NorESM1-ME NorESM1-M

Después de haber evaluado la relación de TSM y PP en los modelos se pasó a evaluar el ajuste de la PP estimada con el MFE y los datos de PP de los propios GCMs. Se realizaron diagramas de dispersión entre los datos de TSM y PP de cada GCM incluyendo la PP estimada con el MFE para evaluar visualmente el grado de ajuste. Las Figuras 35, 36 y 37 muestran la dispersión entre los datos TSM versus la PP en Tumbes. Estos 9 GCMs fueron considerados previamente como de buen ajuste. La linea negra muestra claramente la relación no lineal entre TSM y PP del MFE y su buen ajuste a los datos de los GCMs. Además en la misma figura se observan los parámetros estimados (Tcrit, “a”), y RSME. A pesar de las diferencias

de la magnitud entre los parámetros estimados algunos se parecen a los estimados a partir de datos observados.

Por ejemplo la Tcrit de los modelos HadGEM2-AO(25.3°C), HadGEM2-CC(25°C) y HadGEM2-ES (25.4°C) son bastante cercanos a la Tcrit en Tumbes (25.2°C). Por otro lado hay mas diferencias en las pendientes estimadas ("a") y todas son menores al estimado para tumbes (191.9mm°C^{-1}).

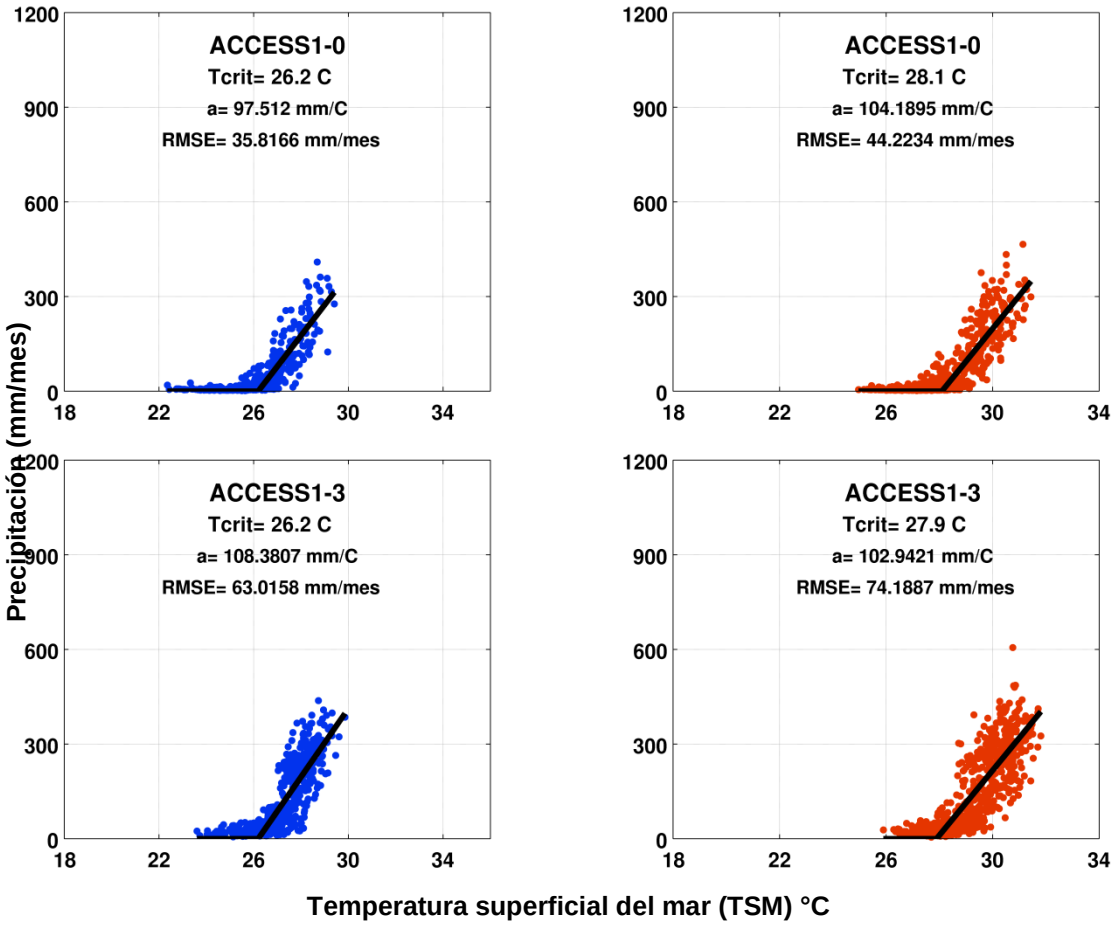


Figura 35: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Tumbes de los modelos con buen ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios.

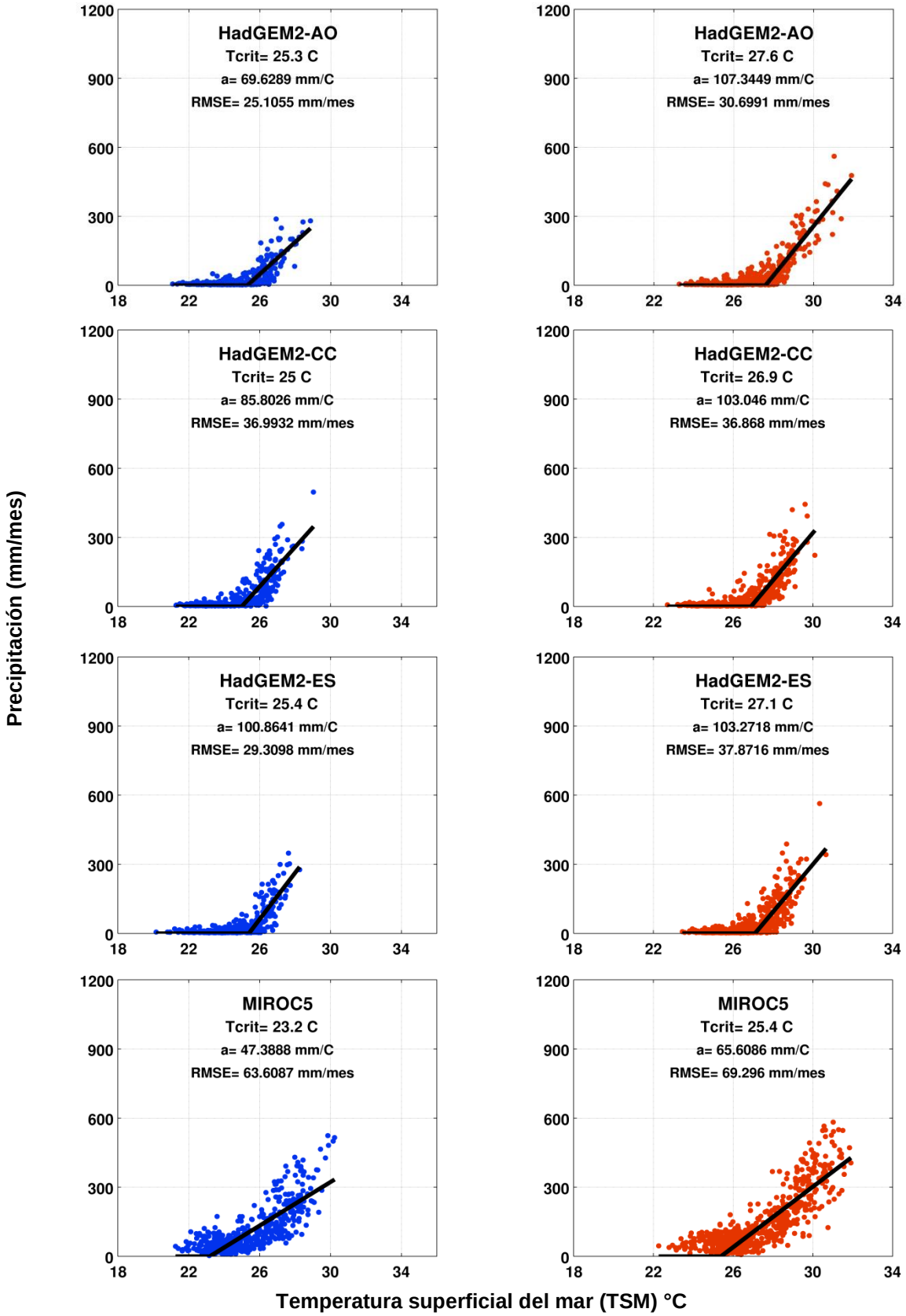


Figura 36: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Tumbes de los modelos con buen ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios.

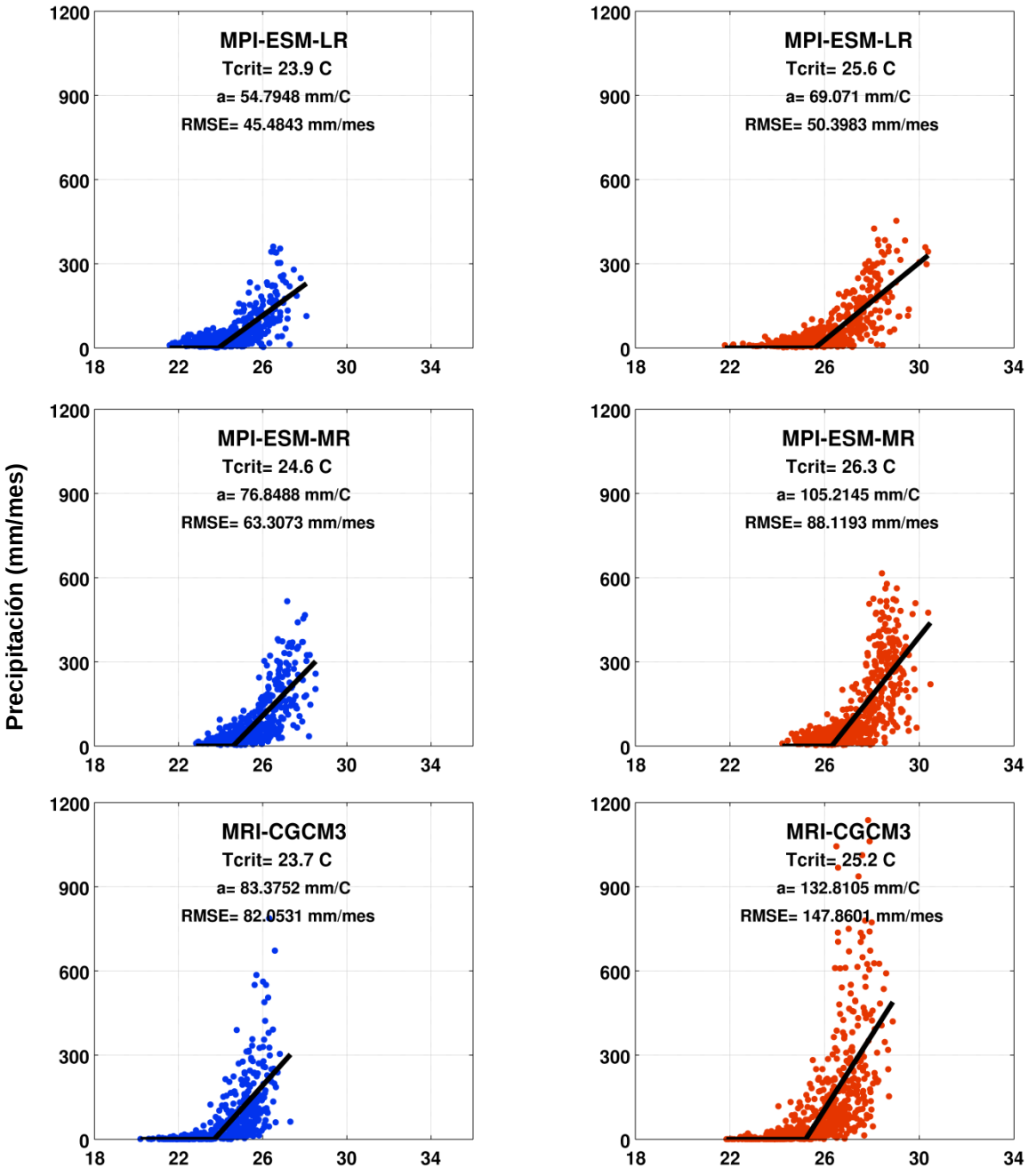


Figura 37: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Tumbes de los modelos con buen ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios.

Las Figuras 38, 39, 40, 41, 42 y 43 muestran los gráficos de dispersión para los datos de los GCMs del escenario del presente (azul) con relativa relacion no lineal entre su TSM y PP en Tumbes. Estos 19 modelos muestran claramente que no existe un muy buen ajuste entre la PP estimada con el MFE (negro) con la PP del mismo GCM. Estos modelos son aún mas diferentes entre ellos, por ejemplo el ajuste del MFE a los datos del GCM no es buena en los modelos bcc-csm1-1, CCSM4, CESM1-BGC , CNRM-CM5, HadCM3, inmcm4 y IPSL-CM5B-LR . En estos 7 modelos la relación no lineal no es clara, parece ser que siempre hay precipitación en ellos. Además las temperaturas críticas (Tcrits) y pendientes estimadas en estos 19 GCMs son mucho menores a los observados. En todos los 28 GCMs la forma de la relación entre la TSM y PP del escenario del futuro es similar al escenario del presente, y además en todos los modelos se observa un incremento de la PP y TSM.

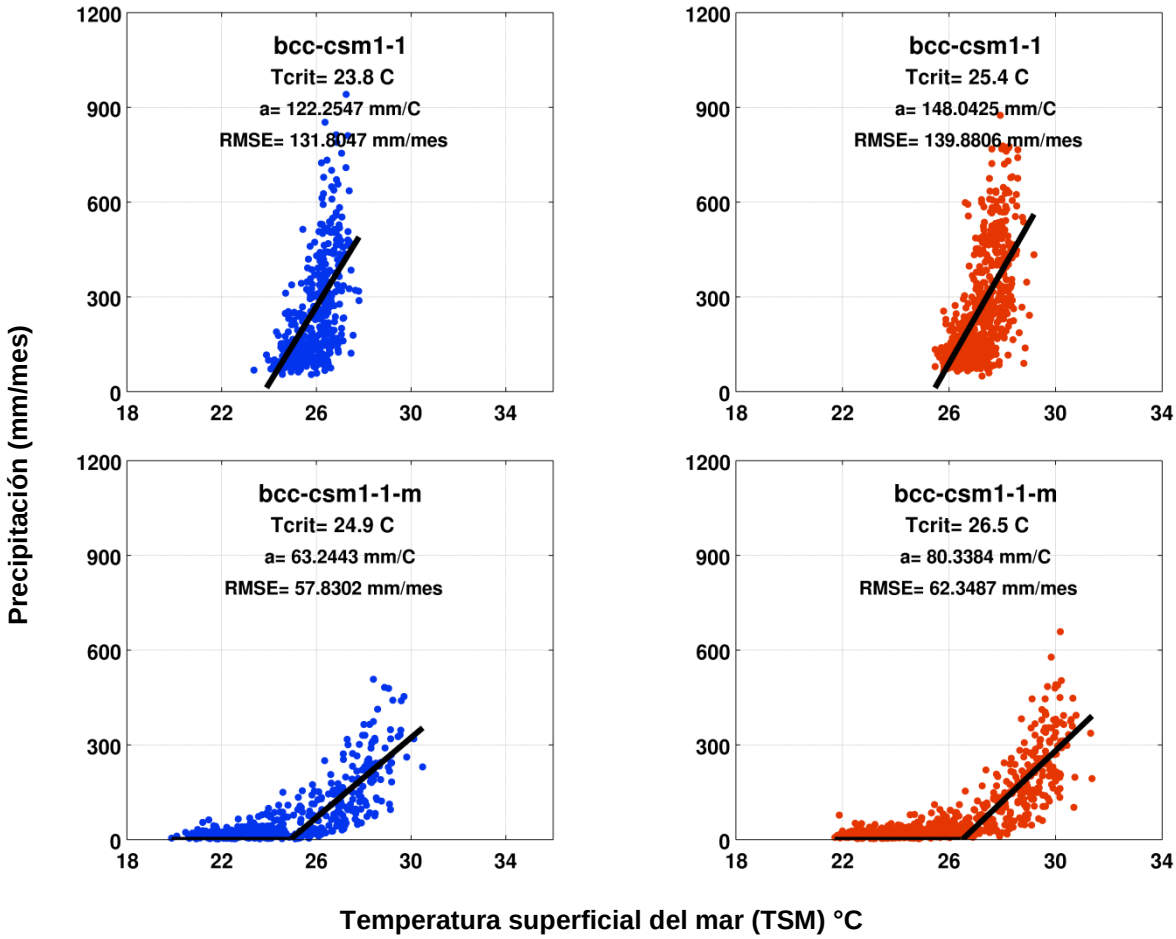


Figura 38: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Tumbes de los modelos con relativo ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios.

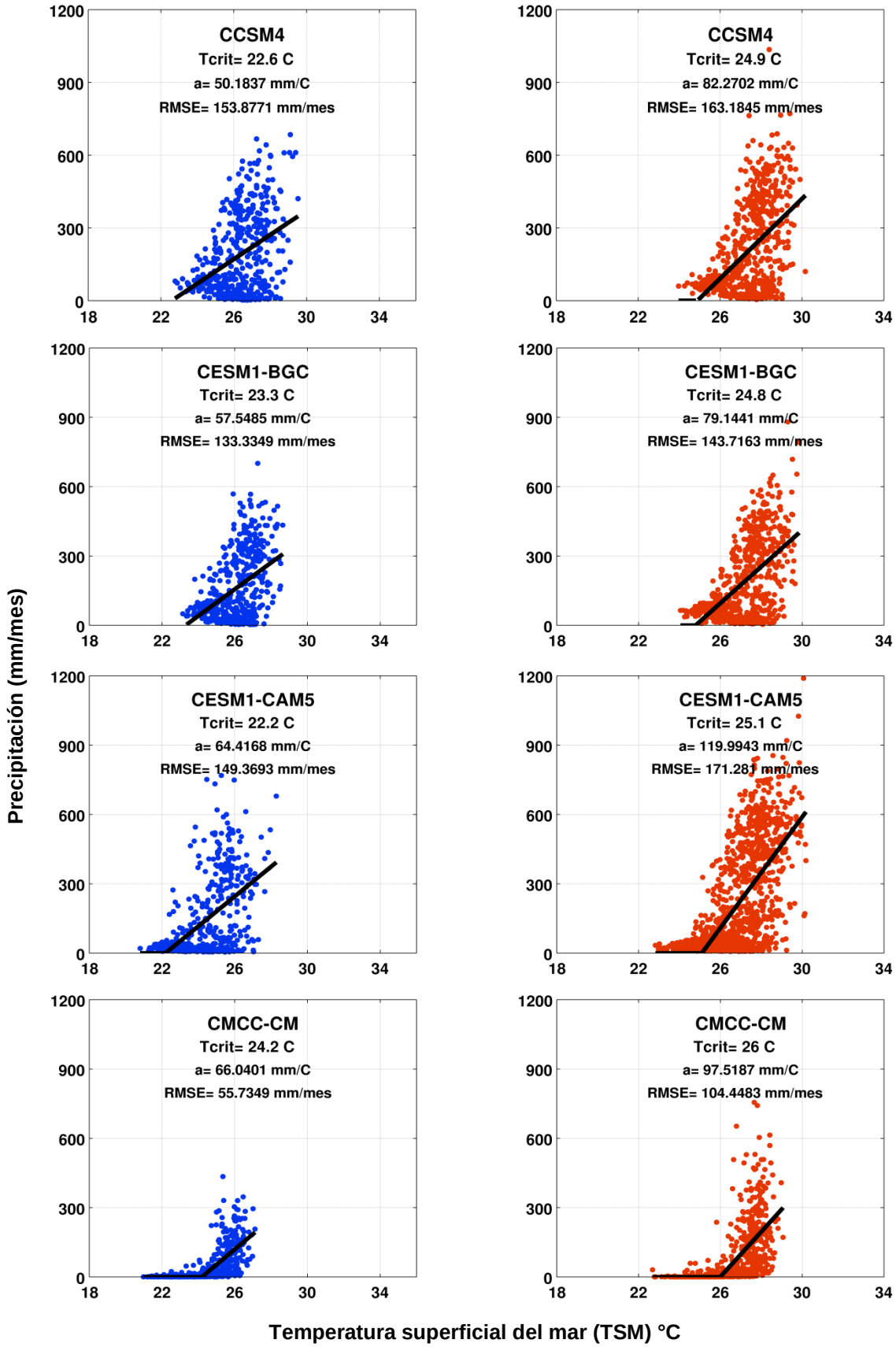


Figura 39: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Tumbes de los modelos con relativo ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios.

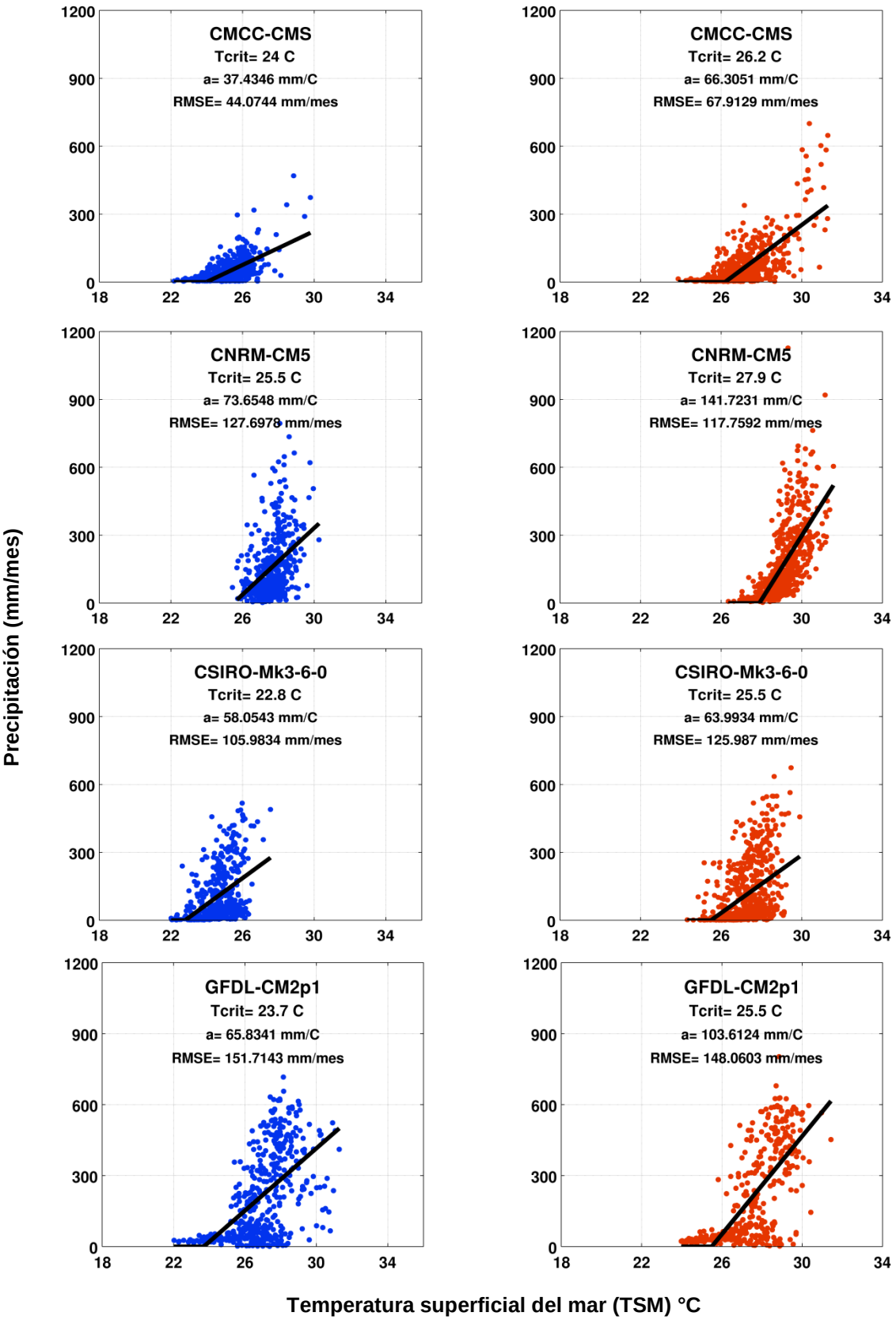


Figura 40: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Tumbes de los modelos con relativo ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios.

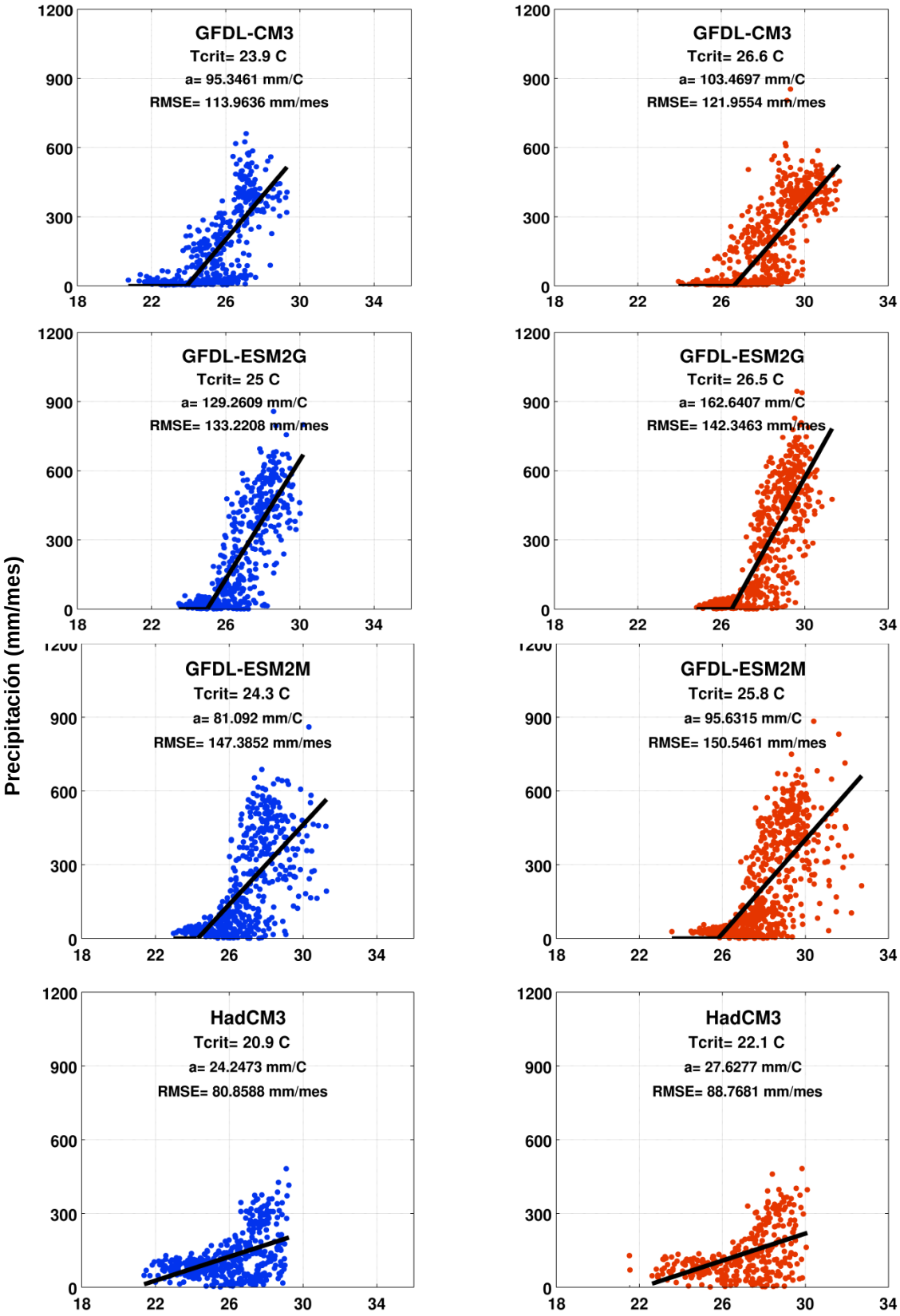


Figura 41: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Tumbes de los modelos con relativo ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios.

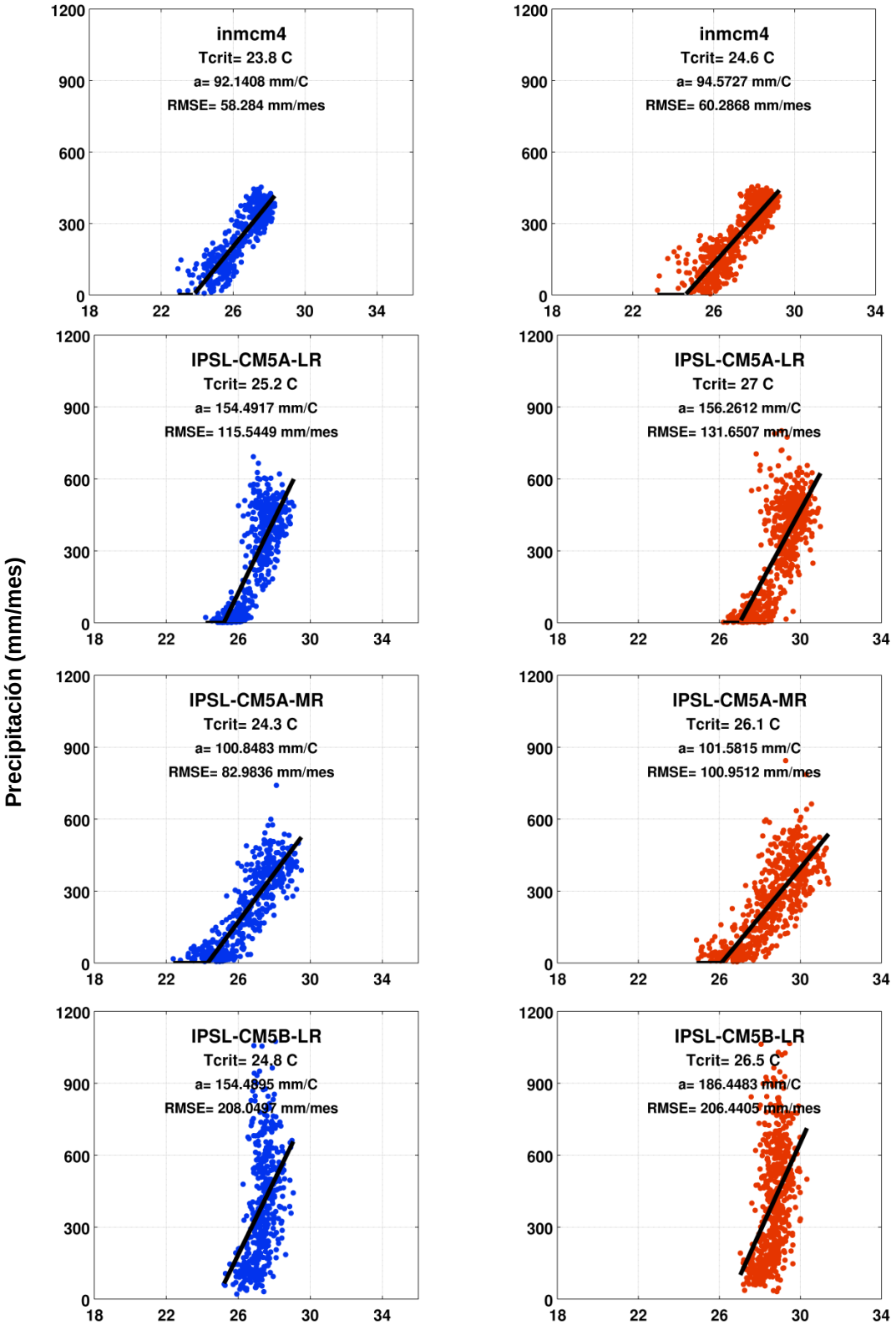


Figura 42: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Tumbes de los modelos con relativo ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios.

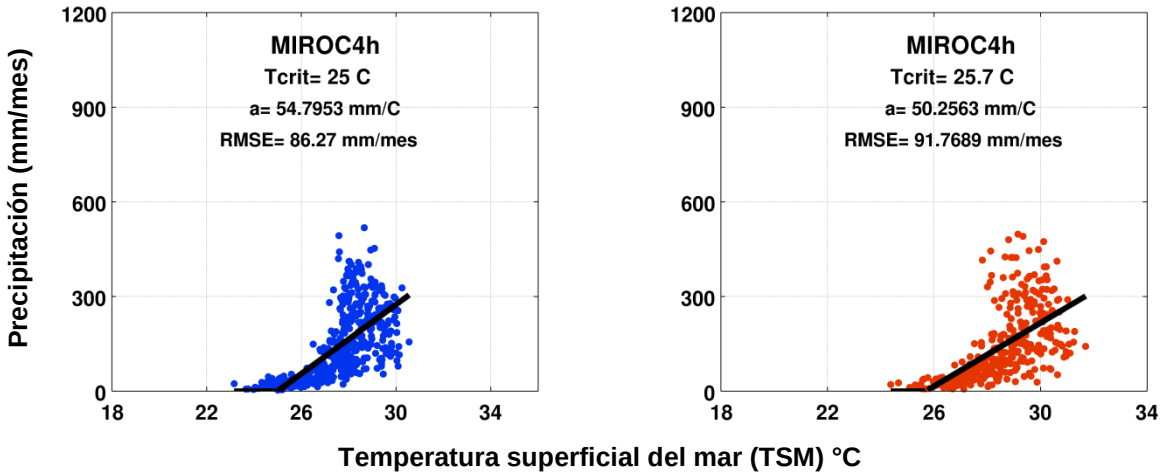


Figura 43: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Tumbes de los modelos con relativo ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios.

Figuras 44, 45 y 46 muestran los resultados para Piura. La Figura 44 muestra los 9 modelos que mostraron la relación no lineal de PP y TSM, además se observa en ellos un buen ajuste entre la PP estimada con el MFE y la PP de los propios GCMs. Por un lado la Tcrit estimada en estos modelos es menor a la observada, solo el modelo ACCESS1-3 (25.8°C) es cercano al observado en Piura (25.9°C). Por otro lado las pendientes estimadas también son menores al observado (197mm°C^{-1}).

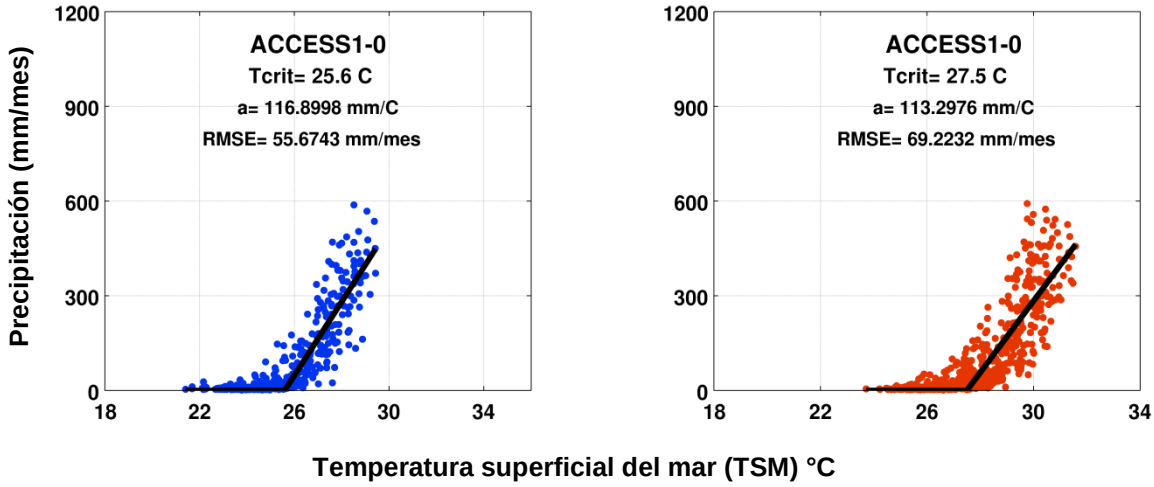


Figura 44: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Piura de los modelos con buen ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios.

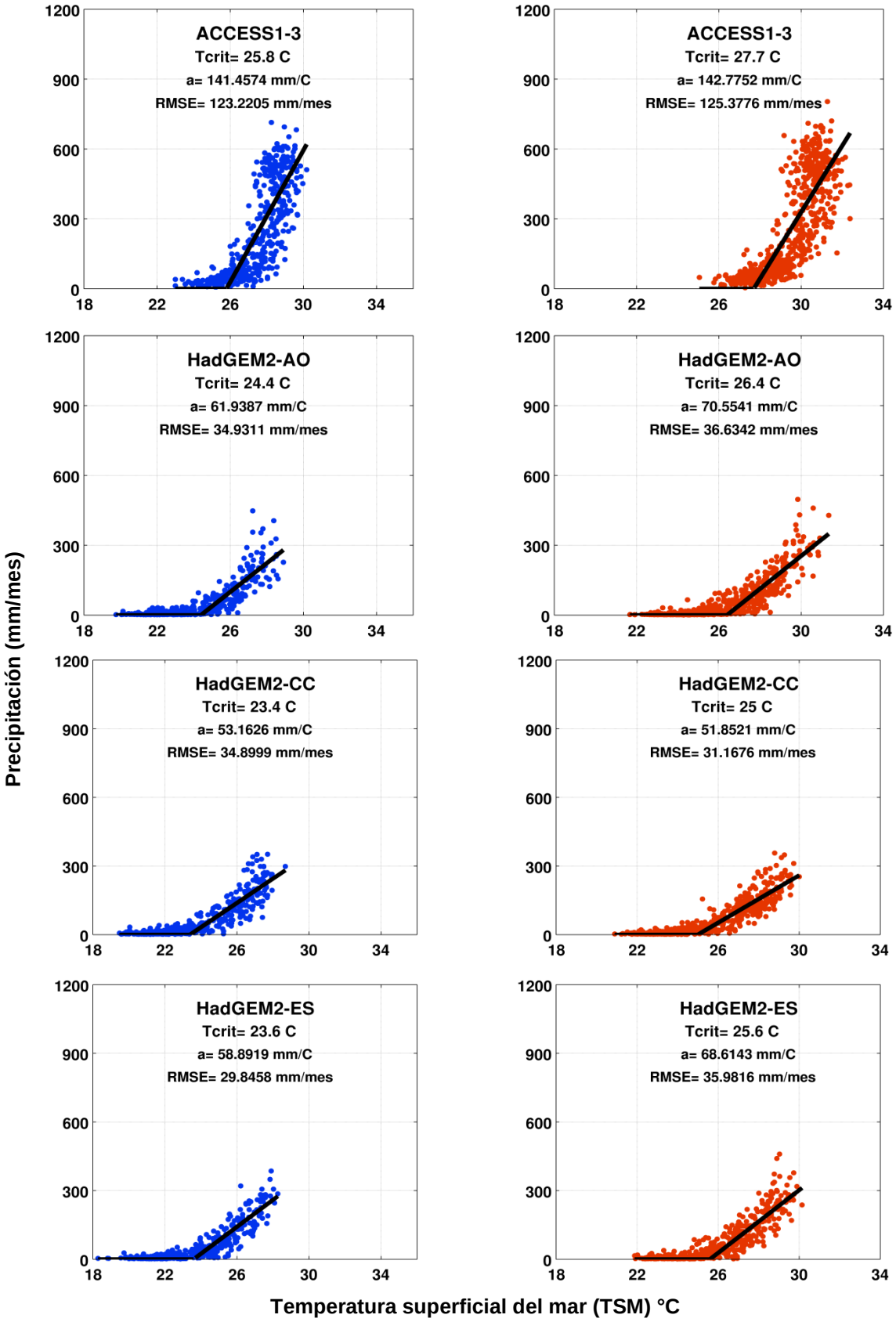


Figura 45: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Piura de los modelos con buen ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios.

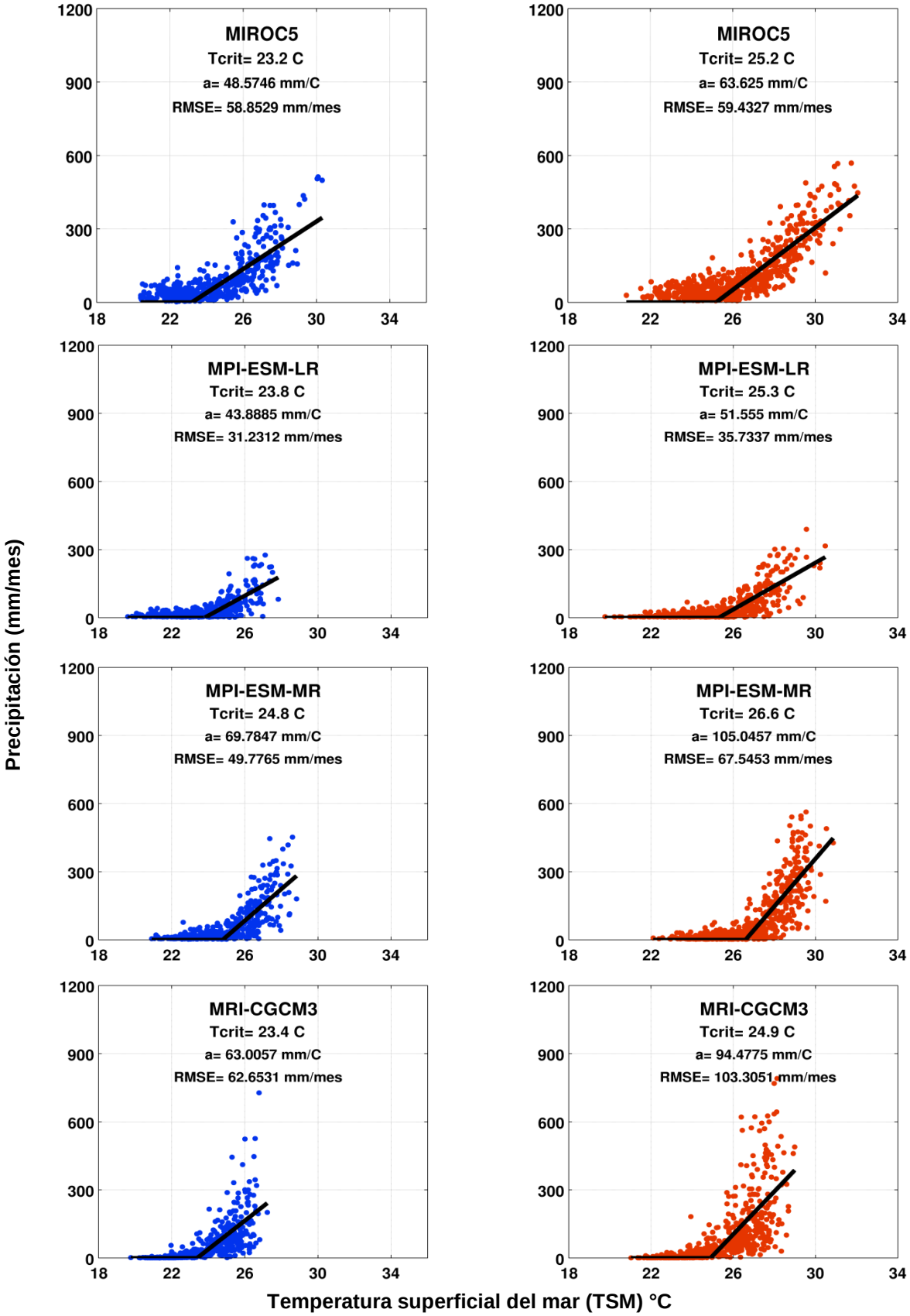


Figura 46: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Piura de los modelos con buen ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios.

Las figuras 47, 48, 49 , 50 22 muestran los 19 GCMs que tienen relativo ajuste entre la PP estimada con el MFE y la PP de cada GCM. Estos también subestiman la Tcrit y pendiente. Esta vez solo tres modelos mostraron un muy bajo ajuste, HadCM3, IPSL-CM5B-LR y inmcm4 debido a que no existe lluvia por debajo de su Tcrit.

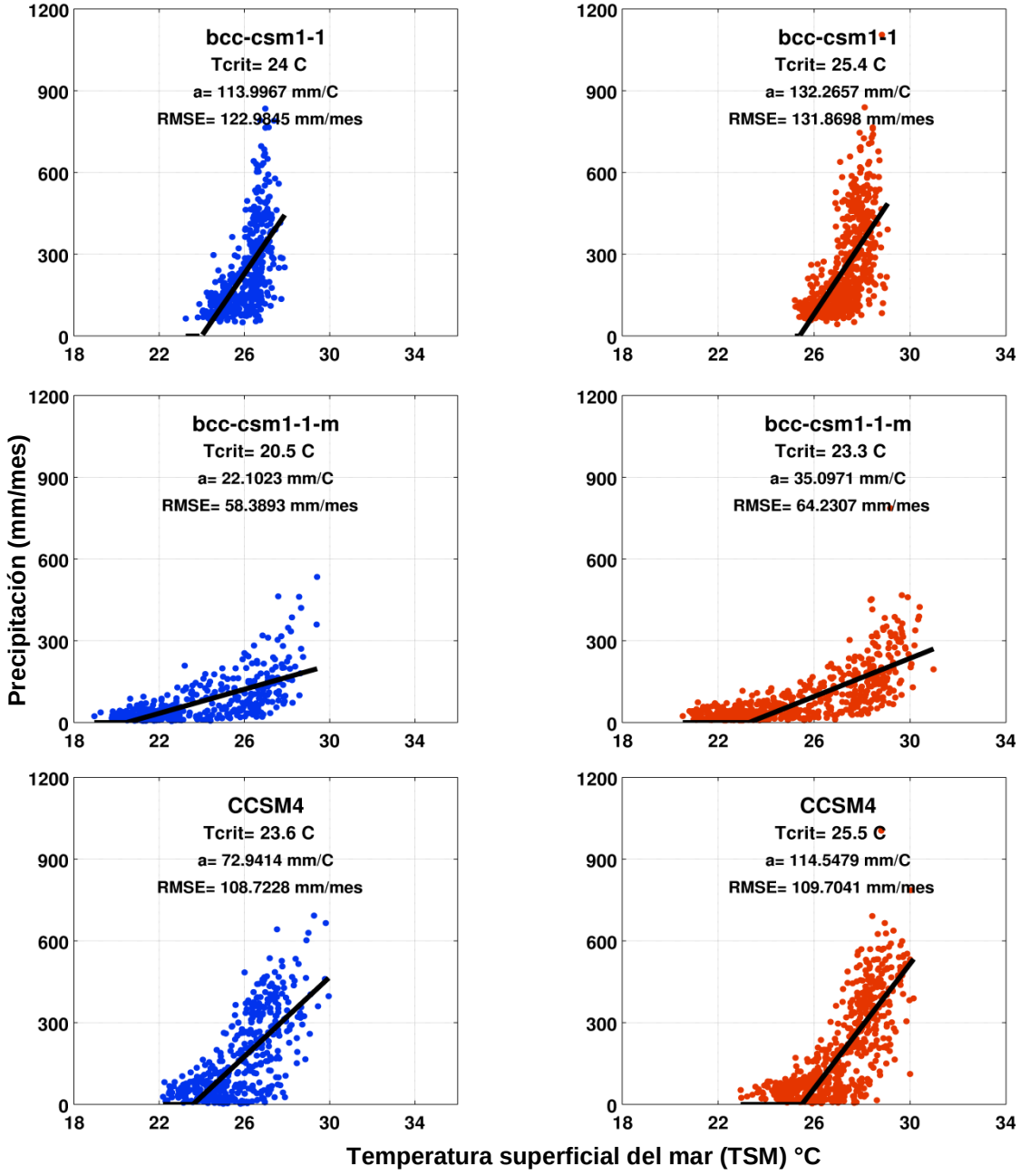


Figura 47: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Piura de los modelos con relativo ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios.

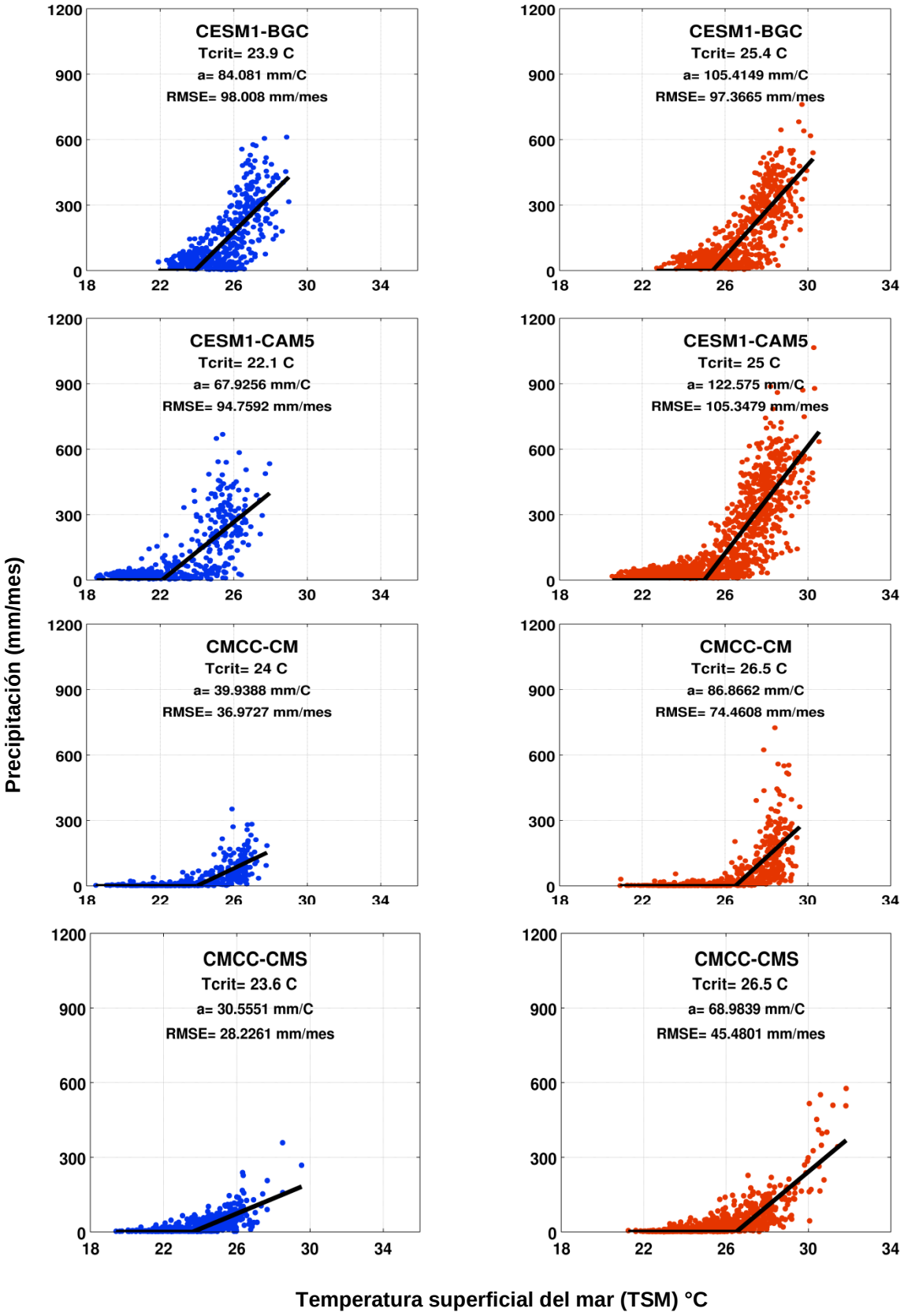


Figura 48: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Piura de los modelos con relativo ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios.

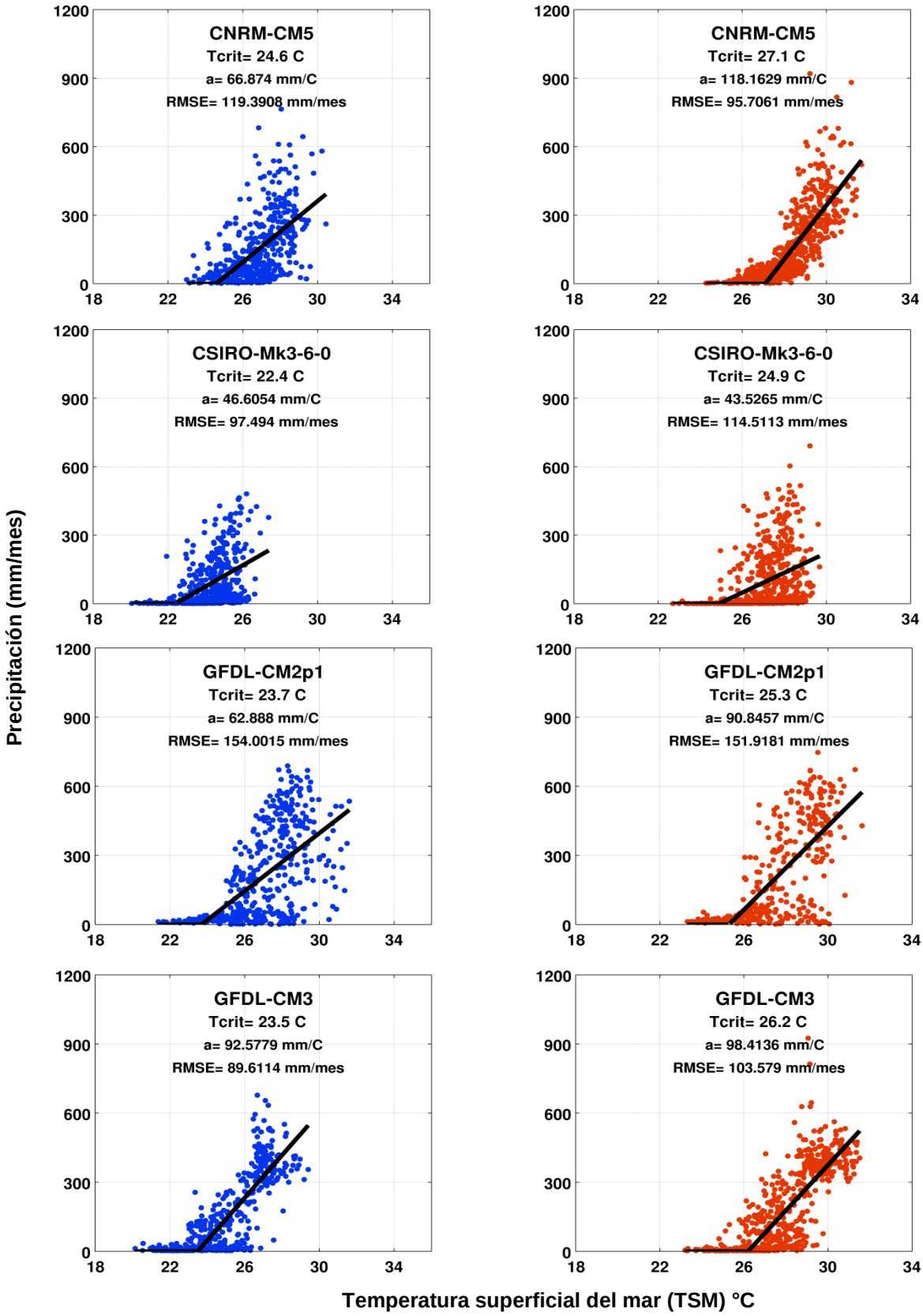


Figura 49: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Piura de los modelos con relativo ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios.

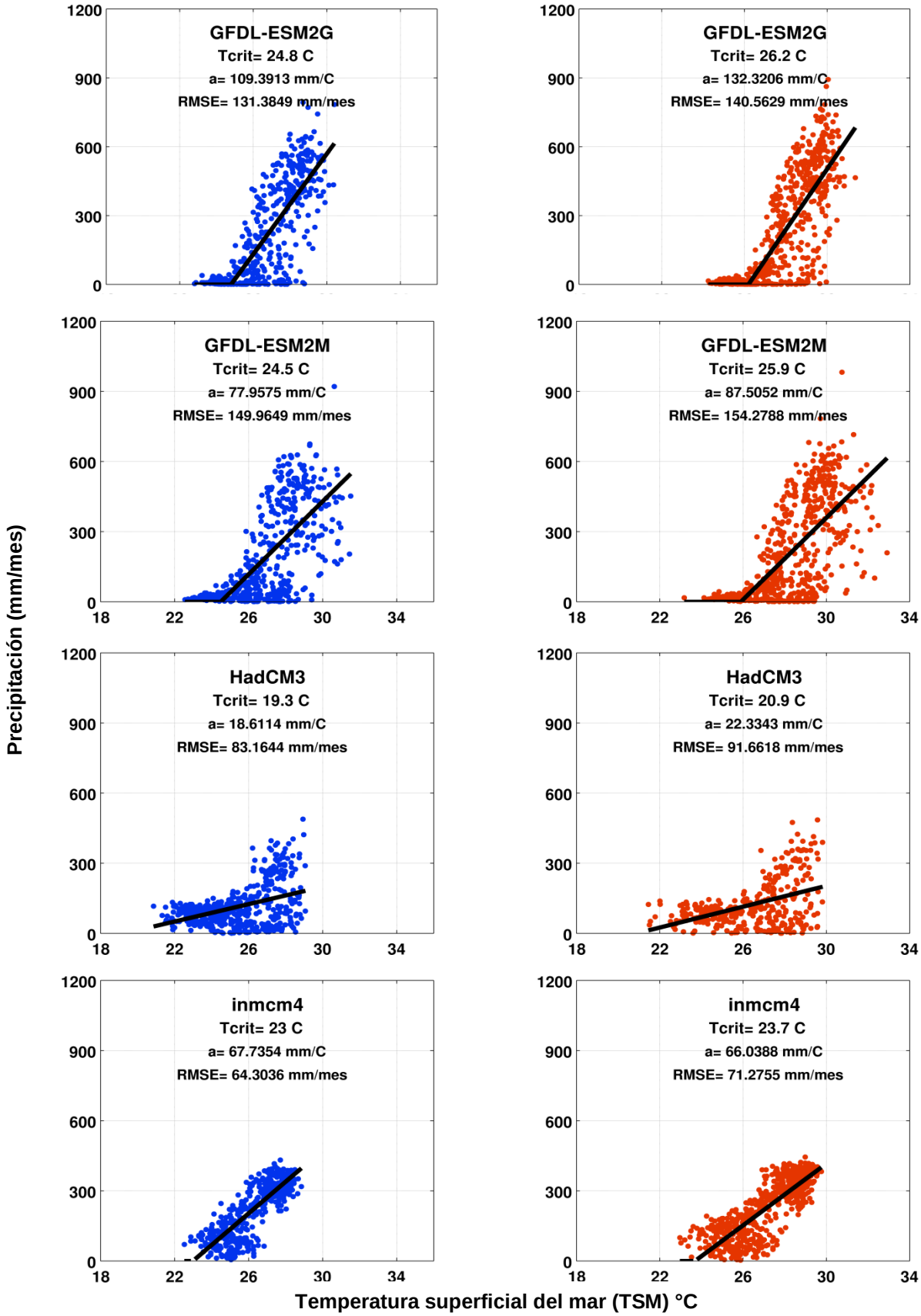


Figura 50: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Piura de los modelos con relativo ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios.

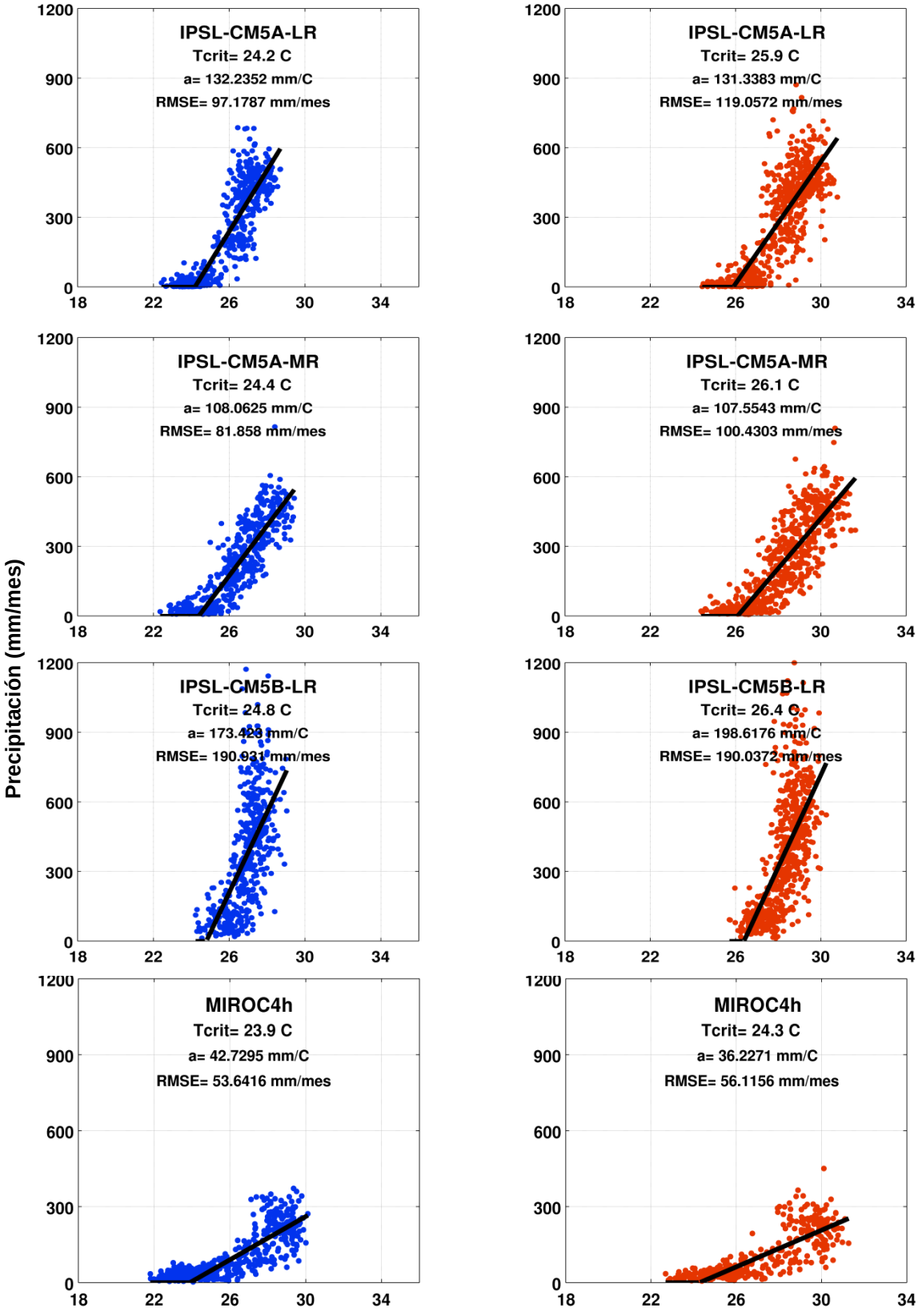


Figura 51: Dispersión de TSM y PP para cada GCM del escenario del presente (azul) y del futuro (rojo) en Piura de los modelos con relativo ajuste. Dispersión de las mismas variables para el MFE (negro) para ambos escenarios.

Los cuadros 8, 9 muestran los resultados de los parámetros estimados, RMSE, TSM_{GCM_prom}, PP_{MFE_prom}, PP_{GCM_prom}estimados para Tumbes para el escenario del presente y el escenario del futuro respectivamente. De igual forma para los Cuadros 10 y 11 pero para Piura.

Cuadro 8: Resultados de los parámetros estimados además de la TSM promedio, la PP promedio estimado con el MFE y PP promedio de cada GCM correspondiente al experimento del Presente para Tumbes.

PRESENTE - Tumbes							
N°	Modelos	Tcrit (°C)	a ($mm°C^{-1}$)	RMSE ($mm\ mes^{-1}$)	TSM prom (°C)	PP MFE prom (mm mes-1)	PP GCM prom (mm mes-1)
1	**ACCESS1-0**	**26.2**	**97.5**	**35.8**	**25.9**	**44.6**	**49.7**
2	**ACCESS1-3**	**26.2**	**108.4**	**63.0**	**27.2**	**129.6**	**135.4**
3	bcc-csm1-1	23.8	122.3	131.8	25.9	255.1	250.1
4	bcc-csm1-1-m	24.9	63.2	57.8	24.7	66.3	79.5
5	CCSM4	22.6	50.2	153.9	26.3	187.9	186.0
6	CESM1-BGC	23.3	57.5	133.3	26.1	162.9	163.1
7	CESM1-CAM5	22.2	64.4	149.4	24.4	146.1	148.9
8	CMCC-CM	24.2	66.0	55.7	24.4	46.8	48.6
9	CMCC-CMS	24.0	37.4	44.1	25.2	46.1	48.0
10	CNRM-CM5	25.5	73.7	127.7	27.6	158.1	157.9
11	CSIRO-Mk3-6-0	22.8	58.1	106.0	24.6	107.2	106.4
12	GFDL-CM2p1(*)	23.7	65.8	151.7	26.8	204.7	206.7
13	GFDL-CM3	23.9	95.3	114.0	25.5	173.3	176.8
14	GFDL-ESM2G	25.0	129.3	133.2	26.8	245.7	246.2
15	GFDL-ESM2M	24.3	81.1	147.4	26.9	217.3	219.3
16	HadCM3(*)	20.9	24.2	80.9	26.0	123.5	124.4
17	**HadGEM2-AO**	**25.3**	**69.6**	**25.1**	**24.5**	**22.4**	**27.5**
18	**HadGEM2-CC**	**25.0**	**85.8**	**37.0**	**24.4**	**37.3**	**42.0**
19	**HadGEM2-ES**	**25.4**	**100.9**	**29.3**	**24.3**	**24.2**	**31.7**
20	inmcm4	23.8	92.1	58.3	26.6	256.0	257.9
21	IPSL-CM5A-LR	25.2	154.5	115.5	27.0	284.2	283.5
22	IPSL-CM5A-MR	24.3	100.8	83.0	26.6	236.8	240.9
23	IPSL-CM5B-LR	24.8	154.5	208.1	27.3	389.0	387.5
24	MIROC4h(*)	25.0	54.8	86.3	27.6	142.6	143.8
25	**MIROC5**	**23.2**	**47.4**	**63.6**	**25.3**	**103.7**	**110.1**
26	**MPI-ESM-LR**	**23.9**	**54.8**	**45.5**	**24.5**	**45.5**	**53.1**
27	**MPI-ESM-MR**	**24.6**	**76.8**	**63.3**	**25.5**	**78.4**	**85.1**
28	**MRI-CGCM3**	**23.7**	**85.7**	**82.1**	**24.1**	**72.9**	**75.1**

Cuadro 9: Resultados de los parámetros estimados además de la TSM promedio, la PP promedio estimado con el MFE y PP promedio de cada GCM correspondiente al experimento del Presente para Piura.

PRESENTE - Piura							
N°	Modelos	Tcrit (°C)	a ($mm°C^{-1}$)	RMSE ($mm\ mes^{-1}$)	TSM prom (°C)	PP MFE prom (mm mes-1)	PP GCM prom (mm mes-1)
1	**ACCESS1-0**	**25.6**	**116.9**	**55.7**	**25.5**	**78.7**	**85.3**
2	**ACCESS1-3**	**25.8**	**141.5**	**123.2**	**27.4**	**245.4**	**246.1**
3	bcc-csm1-1	24.0	114.0	123.0	26.0	224.1	230.1
4	bcc-csm1-1-m	20.5	22.1	58.4	23.6	70.3	72.7
5	CCSM4	23.6	72.9	108.7	25.7	157.2	161.8
6	CESM1-BGC	23.9	84.1	98.0	25.4	139.5	147.4
7	CESM1-CAM5	22.1	67.9	94.8	23.1	105.1	116.3
8	CMCC-CM	24.0	39.9	37.0	23.6	30.3	33.5
9	CMCC-CMS	23.6	30.6	28.2	23.9	27.1	30.1
10	CNRM-CM5	24.6	66.9	119.4	26.8	146.9	149.8
11	CSIRO-Mk3-6-0	22.4	46.6	97.5	24.1	84.5	84.4
12	GFDL-CM2p1(*)	23.7	62.9	154.0	26.8	198.5	201.7
13	GFDL-CM3	23.5	92.6	89.6	24.8	151.4	154.6
14	GFDL-ESM2G	24.8	109.4	131.4	26.7	223.5	227.1
15	GFDL-ESM2M	24.5	78.0	150.0	27.1	210.2	209.7
16	HadCM3(*)	19.3	18.6	83.2	25.4	114.4	114.2
17	**HadGEM2-AO**	**24.4**	**61.9**	**34.9**	**23.9**	**43.2**	**47.7**
18	**HadGEM2-CC**	**23.4**	**53.2**	**34.9**	**23.6**	**57.3**	**62.7**
19	**HadGEM2-ES**	**23.6**	**58.9**	**29.8**	**23.3**	**48.6**	**52.4**
20	inmcm4	23.0	67.7	64.3	26.3	222.7	222.3
21	IPSL-CM5A-LR	24.2	132.2	97.2	26.1	257.8	262.6
22	IPSL-CM5A-MR	24.4	108.1	81.9	26.4	228.1	235.0
23	IPSL-CM5B-LR	24.8	173.4	190.9	26.9	360.9	368.5
24	MIROC4h(*)	23.9	42.7	53.6	26.0	99.3	106.2
25	**MIROC5**	**23.2**	**48.6**	**58.9**	**24.4**	**74.3**	**86.9**
26	**MPI-ESM-LR**	**23.8**	**43.9**	**31.2**	**23.5**	**25.5**	**32.8**
27	**MPI-ESM-MR**	**24.8**	**69.8**	**49.8**	**24.8**	**50.5**	**59.0**
28	**MRI-CGCM3**	**23.7**	**63.0**	**62.7**	**23.6**	**55.9**	**59.3**

Cuadro 10: Resultados de los parámetros estimados además de la TSM promedio, la PP promedio estimado con el MFE y PP promedio de cada GCM correspondiente al experimento del futuro para Tumbes.

FUTURO - TUMBES							
N°	Modelos	Tcrit (°C)	a ($mm°C^{-1}$)	RMSE ($mm\ mes^{-1}$)	TSM prom (°C)	PP MFE prom (mm mes-1)	PP GCM prom (mm mes-1)
1	**ACCESS1-0**	**28.1**	**104.2**	**44.2**	**28.1**	**61.3**	**67.1**
2	**ACCESS1-3**	**27.9**	**102.9**	**74.2**	**29.4**	**160.5**	**162.0**
3	bcc-csm1-1	25.4	148.0	139.9	27.2	267.4	261.7
4	bcc-csm1-1-m	26.5	80.3	62.3	26.2	79.9	94.6
5	CCSM4	24.9	82.3	163.2	27.4	208.2	210.9
6	CESM1-BGC	24.8	79.1	143.7	27.2	192.3	193.9
7	CESM1-CAM5	25.1	120.0	171.3	26.7	205.2	213.6
8	CMCC-CM	26.0	97.5	104.4	26.5	84.6	86.9
9	CMCC-CMS	26.2	66.3	67.9	27.1	69.0	72.2
10	CNRM-CM5	27.9	141.7	117.8	29.1	167.5	169.2
11	CSIRO-Mk3-6-0	25.5	64.0	126.0	27.3	116.5	118.0
12	GFDL-CM2p1(*)	25.6	105.0	148.5	27.5	210.5	217.9
13	GFDL-CM3	26.6	103.5	122.0	28.2	177.1	182.0
14	GFDL-ESM2G	26.5	162.6	142.3	27.9	256.5	257.4
15	GFDL-ESM2M	25.8	95.6	150.5	28.1	225.1	224.5
16	HadCM3(*)	22.1	27.6	88.8	27.0	135.9	136.6
17	**HadGEM2-AO**	**27.6**	**107.3**	**30.7**	**26.5**	**30.4**	**39.0**
18	**HadGEM2-CC**	**26.9**	**103.0**	**36.9**	**26.2**	**36.6**	**43.5**
19	**HadGEM2-ES**	**27.1**	**103.3**	**37.9**	**26.5**	**32.5**	**39.3**
20	inmcm4	24.6	94.6	60.3	27.4	263.6	266.2
21	IPSL-CM5A-LR	27.0	156.3	131.7	28.9	302.1	300.8
22	IPSL-CM5A-MR	26.1	101.6	101.0	28.5	248.2	254.1
23	IPSL-CM5B-LR	26.5	186.4	206.4	28.7	407.6	404.5
24	MIROC4h(*)	25.7	50.3	91.8	28.6	147.5	146.6
25	**MIROC5**	**25.4**	**65.6**	**69.3**	**27.2**	**130.1**	**141.7**
26	**MPI-ESM-LR**	**25.6**	**69.1**	**50.4**	**26.1**	**56.4**	**63.2**
27	**MPI-ESM-MR**	**26.3**	**105.2**	**88.1**	**27.2**	**112.0**	**117.0**
28	**MRI-CGCM3**	**25.2**	**133.4**	**147.9**	**25.6**	**120.0**	**123.4**

Cuadro 11: Resultados de los parámetros estimados además de la TSM promedio, la PP promedio estimado con el MFE y PP promedio de cada GCM correspondiente al experimento del Futuro para Piura.

FUTURO - PIURA							
N°	Modelos	Tcrit (°C)	a ($mm°C^{-1}$)	RMSE ($mm\ mes^{-1}$)	TSM prom (°C)	PP MFE prom (mm mes-1)	PP GCM prom (mm mes-1)
1	**ACCESS1-0**	**27.5**	**113.3**	**69.2**	**27.7**	**96.8**	**103.3**
2	**ACCESS1-3**	**27.7**	**142.8**	**125.4**	**29.5**	**276.0**	**277.4**
3	bcc-csm1-1	25.4	132.3	131.9	27.2	242.9	242.1
4	bcc-csm1-1-m	23.3	35.1	64.2	25.1	76.7	86.0
5	CCSM4	25.5	114.5	109.7	26.9	179.3	187.5
6	CESM1-BGC	25.4	105.4	97.4	26.7	159.8	171.4
7	CESM1-CAM5	25.0	122.6	105.3	25.6	159.5	173.4
8	CMCC-CM	26.5	86.9	74.5	26.0	60.0	62.3
9	CMCC-CMS	26.5	69.0	45.5	25.9	37.9	47.0
10	CNRM-CM5	27.1	118.2	95.7	28.3	157.5	163.3
11	CSIRO-Mk3-6-0	24.9	43.5	114.5	26.9	88.5	88.3
12	GFDL-CM2p1(*)	25.4	91.6	151.4	27.5	207.6	213.3
13	GFDL-CM3	26.2	98.4	103.6	27.6	162.0	164.0
14	GFDL-ESM2G	26.2	132.3	140.6	27.8	230.9	237.7
15	GFDL-ESM2M	25.9	87.5	154.3	28.3	212.9	215.0
16	HadCM3(*)	20.9	22.3	91.7	26.5	124.5	123.8
17	**HadGEM2-AO**	**26.4**	**70.6**	**36.6**	**25.9**	**50.0**	**56.6**
18	**HadGEM2-CC**	**25.0**	**51.9**	**31.2**	**25.3**	**56.0**	**61.2**
19	**HadGEM2-ES**	**25.6**	**68.6**	**36.0**	**25.5**	**55.0**	**60.7**
20	inmcm4	23.7	66.0	71.3	27.2	233.4	234.6
21	IPSL-CM5A-LR	25.9	131.3	119.1	28.0	278.0	278.3
22	IPSL-CM5A-MR	26.1	107.6	100.4	28.4	247.9	248.0
23	IPSL-CM5B-LR	26.4	198.6	190.0	28.3	376.1	378.8
24	MIROC4h(*)	24.3	36.2	56.1	27.1	104.1	106.7
25	**MIROC5**	**25.2**	**63.6**	**59.4**	**26.2**	**96.2**	**113.2**
26	**MPI-ESM-LR**	**25.3**	**51.6**	**35.7**	**25.1**	**34.2**	**39.7**
27	**MPI-ESM-MR**	**26.6**	**105.0**	**67.5**	**26.6**	**80.0**	**87.8**
28	**MRI-CGCM3**	**24.9**	**94.5**	**103.3**	**25.2**	**90.5**	**93.7**

4.3 Resultados y análisis de los parámetros estimados y los promedios de PP y TSM.

Para evaluar los resultados estimados previamente se realizó un gráfico de dispersión de la precipitación promedio de cada GCM y la precipitación promedio estimada con el MFE para cada modelo. Ahora bien, la Figura 52 muestra que la relación entre ambos promedios es casi de 1 a 1 lo que indica un buen ajuste entre ambos, tanto para el escenario del presente (azul) como para el escenario del futuro (rojo). La relación de 1 a 1 (1:1) indica que el promedio de PP del MFE es casi igual a la PP promedio del GCM. Los coeficientes de correlación ("r") para ambos escenarios se observan en la misma figura, estos son bastante altos (0.9) para Tumbes y Piura.

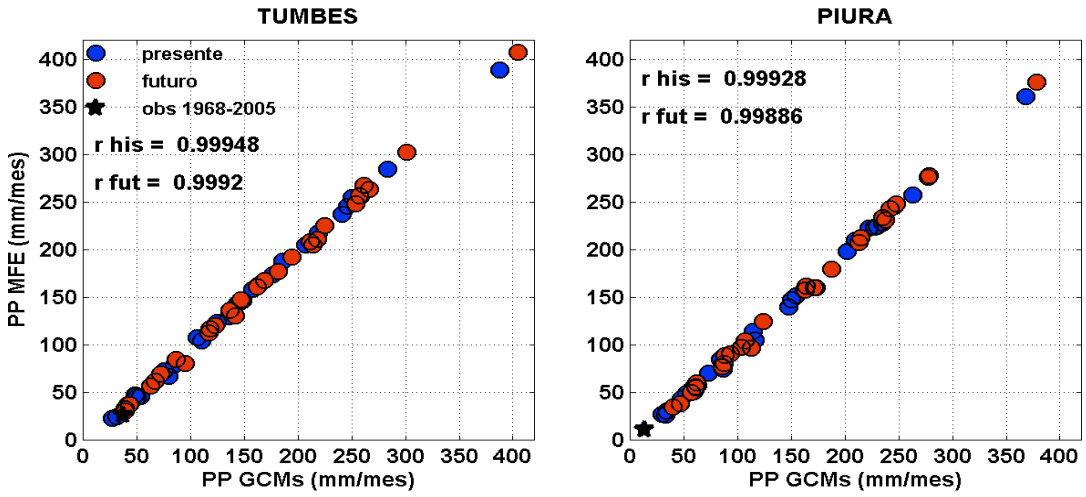


Figura 52: Regresión Lineal entre la PP promedio de cada GCM versus PP promedio estimado a partir del MFE. Para los experimentos Histórico (presente) y RCP4.5 (futuro).

A pesar de que el coeficiente de correlación es alto y positivo se observan grandes diferencias entre los GCMs. La precipitación promedio varía desde 35mm mes-1 hasta 380mm mes-1 en el escenario del presente en Tumbes, mientras que en Piura el rango de variación va desde 25mm mes-1 hasta 360mm mes-1 para el mismo escenario. Por otro lado el rango para el escenario del futuro varía 60mm mes-1 hasta más de 400mm mes-1 en Tumbes y de 30mm mes-1 hasta 380mm mes-1 en Piura. En general se observa un incremento de precipitación en el futuro tanto en el MFE como en cada GCM, el cambio de precipitación (futuro menos presente) de cada GCM se observa en la Figura 53.

Los modelos con relativo ajuste se identifican con círculos y los demás marcadores identifican a los modelos con buen ajuste. El cambio de PP promedio del MFE presenta buen ajuste con el cambio de PP promedio del GCM (Figura 53), la relación entre ambos es casi 1:1. Este buen ajuste resulta en un alto coeficiente de correlación lineal (0.9) en Tumbes y Piura.

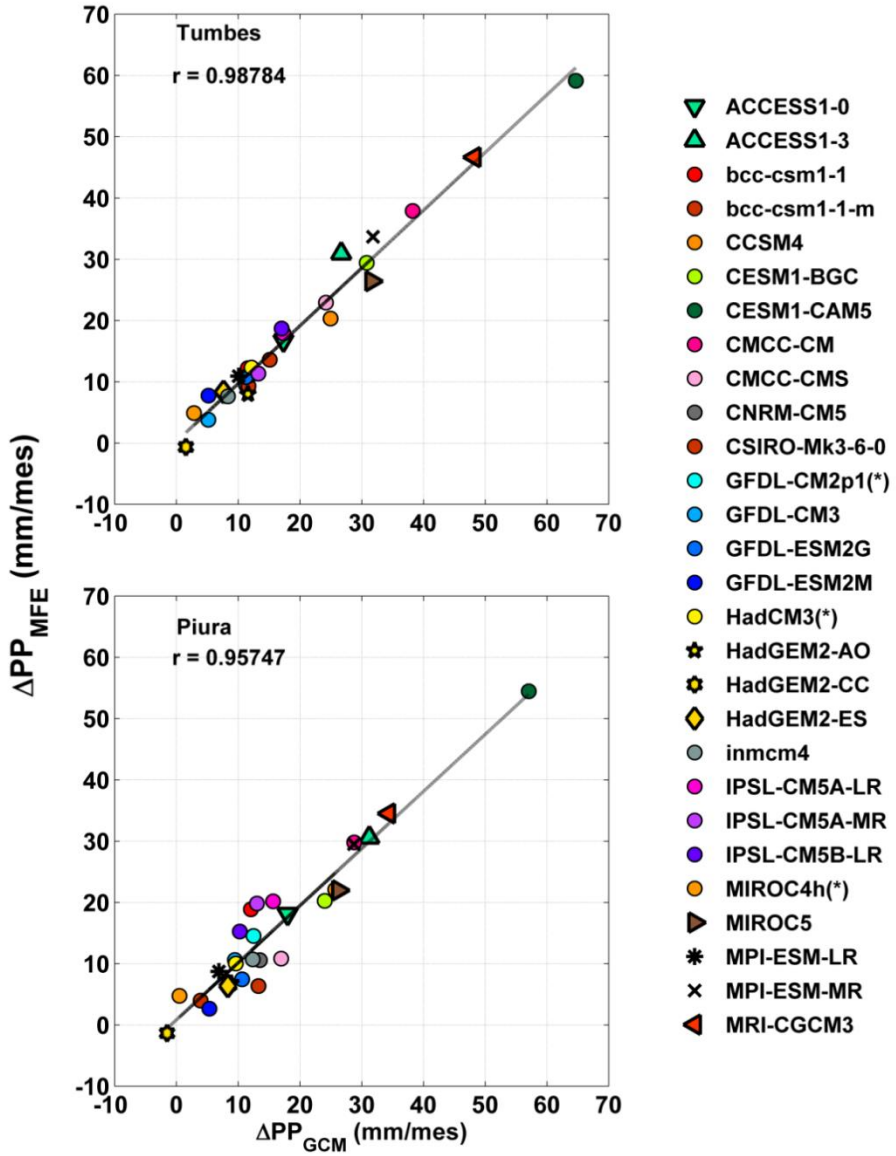


Figura 53: Dispersión entre el cambio de PP promedio (Futuro menos Presente) de los GCM y el cambio de PP promedio estimado con el MFE para Tumbes y Piura. Los modelos con relativo ajuste están identificados con círculos mientras que los de buen ajuste con otros marcadores.

A pesar de este buen ajuste, las diferencias entre cada modelo son visibles; el cambio de precipitación promedio que muestran los GCMs varía de 0 hasta 70mm mes-1 en Tumbes y de -1.5mm mes-1 hasta 60mm mes-1 en Piura. Entonces, hay un consenso entre los GCMs en cuanto al incremento de PP promedio en el escenario del futuro en Tumbes y Piura. El modelo HadGEM2-CC es el único que más bien disminuye ligeramente su precipitación promedio en el escenario del futuro en Piura.

4.3.1 Análisis de Tcrit y Temperatura Superficial promedio.

Existen dos características importantes extraídas a partir de datos observados. La primera es que la TSM promedio observada es baja (aguas frías) y el segundo es que la Tcrit es bastante alta (gran estabilidad). Estas dos características hacen que la diferencia de Tcrit y TSM promedio sea negativa. Si se mantienen todos los factores iguales y la Tcrit es baja, un aumento ligero de la TSM ocasionará desestabilización de la atmosfera (precipitación); pero si por el contrario la Tcrit es alta, es necesario un mayor incremento de TSM para la desestabilización.

Los GCMs no representan ninguna de estas dos características observadas. En Tumbes la Tcrit es 25.2°C mientras que la TSM promedio es 22°C y en Piura la Tcrit es 25.9°C mientras que la TSM promedio es 21°C. Esto conlleva a que la diferencia de TSM promedio y Tcrit sea negativa, en Tumbes es -3.2°C mientras que en Piura es -4.9°C.

La Figura 54 muestra la dispersión entre la Tcrit estimada y la PP promedio de los GCMs para Tumbes y Piura del escenario del presente. El objetivo es contrastar los resultados de los GCMs con la Tcrit observada que está graficada como un hexágono con contorno negro y color rojo. La parte superior de esta misma figura muestra los resultados para Tumbes, donde la mayoría de los modelos presentan una Tcrit menor al observado y solo los modelos HadGEM2-AO, HadGEM2-CC, HadGEM2-ES se encuentran más cercanos al observado. Los modelos ACCESS1-0, ACCESS1-3, CNRM-CM5 presentan su Tcrit mayor al observado.

En la parte inferior de la misma figura se observa los resultados para Piura, se observa que existe un consenso entre todos los modelos ya que la Tcrit es menor al observado en todos ellos. Las Tcrit más cercanas al observado son los estimados de los modelos ACCESS1-0 y ACCESS1-3. El modelo que presenta la Tcrit más baja en Tumbes y Piura es el HadCM3 que es uno de relativo ajuste.

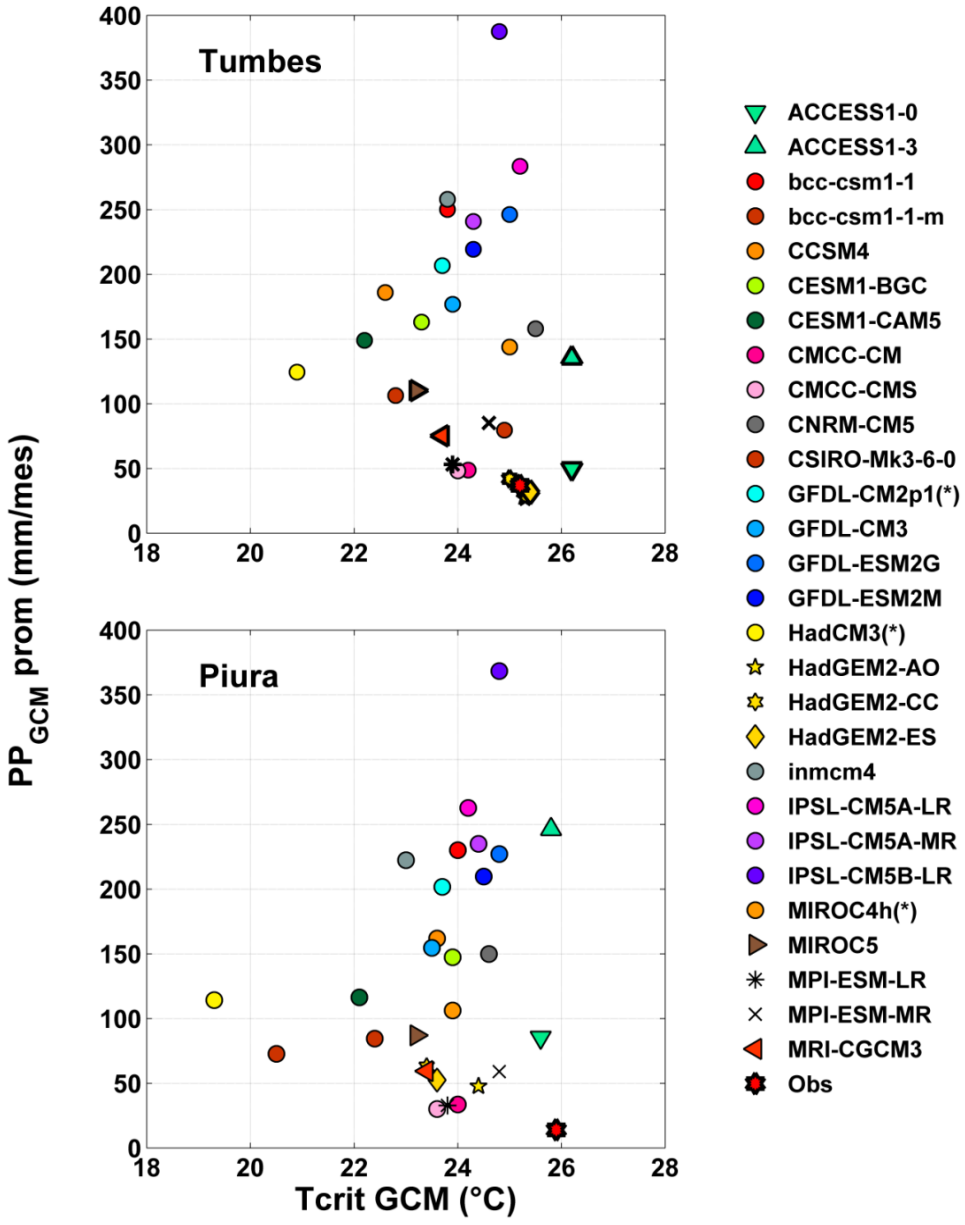


Figura 54 : Dispersión entre la Tcrit versus la PP promedio de los GCMs.

En el futuro se espera un calentamiento del mar en respuesta al incremento de GEI en la atmósfera, aunque este calentamiento no sea espacialmente homogéneo los GCMs muestran gran sensibilidad a este incremento (Vecchi y Soden 2007). Por ejemplo, desde fines del siglo XIX se ha observado un debilitamiento del gradiente zonal de presión en el Pacífico ecuatorial, en especial en las últimas tres décadas (~0,4Pa.año–1) (Vecchi y Soden 2007). Esto resulta en un debilitamiento de la circulación de Walker, lo que a su vez debilita también los vientos alisios del este y finalmente también el afloramiento ecuatorial. Por consiguiente tanto la TSM como la Tcrit incrementarán, pero tal vez en diferente medida. Por esta razón, el cambio de PP dependerá de cuál de los dos incremente más.

La figura 55 muestra la dispersión entre la Tcrit del presente y la del futuro con sus respectivas precipitaciones promedios; se observa que la mayoría de los GCMs incrementan su Tcrit en el futuro en alrededor de 1.8 °C en promedio. A pesar del incremento de Tcrit que muestran los GCMs, algunos modelos muestran incluso en el futuro una Tcrit menor al observado.

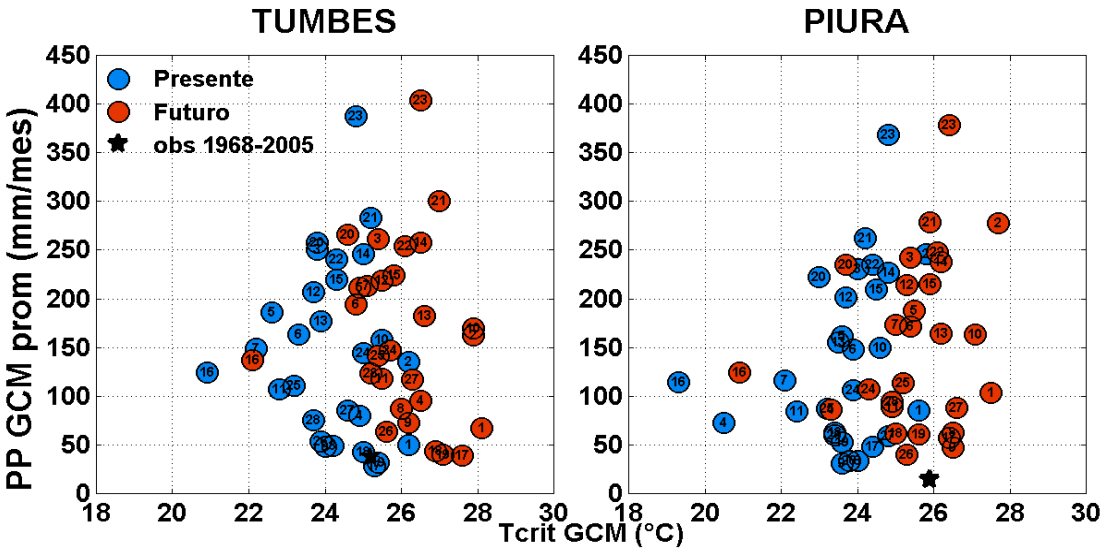


Figura 55: Dispersión de la Tcrit del presente y Futuro versus la PP promedio de los GCMs.

La Figura 56 muestra la dispersión entre el cambio de Tcrit y el cambio de precipitación de los GCMs; se observa en esta figura que el rango de variación de la Tcrit para los modelos con buen ajuste varía de 1.5 hasta 2.5 °C en Tumbes y en Piura.

Para un mayor cambio de Tcrit (más estabilidad atmosférica) se esperaría un menor cambio de PP. Sin embargo esta relación (indirecta) no es evidente en los GCMs, como se observa en la Figura 56. Para un mismo cambio de Tcrit en Tumbes los modelos MPI-ESM-MR, MPI-ESM-MR, ACCESS1-3 y HadGEM2-AO muestran diferentes cambios de precipitación, esta diferencia entre ellos se debe a factores intrínsecos de estos modelos.

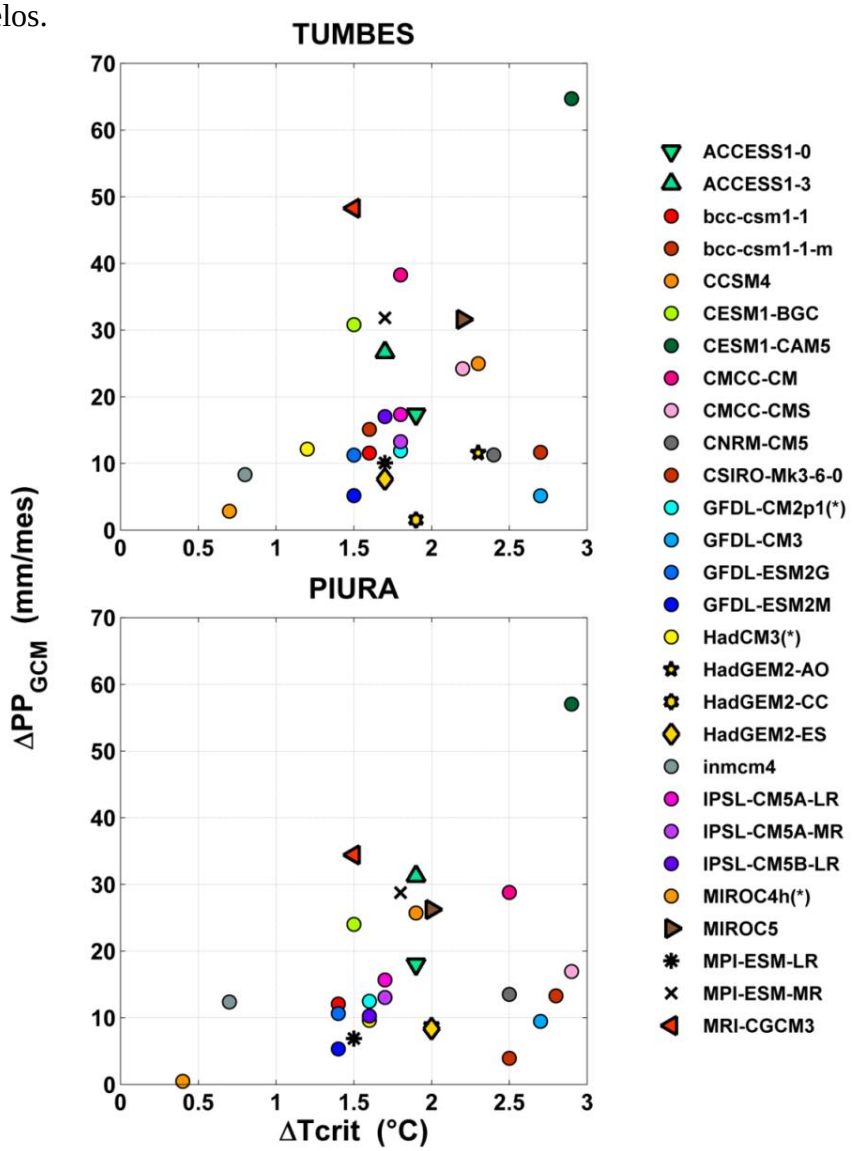


Figura 56: Dispersión del cambio de Tcrit y el cambio de precipitación de los GCMs.

La segunda característica observada, TSM promedio muy por debajo de la Tcrit, tampoco es observada en los GCMs. Esta característica se observa mejor como la diferencia de la Tcrit y la TSM promedio como se observa en la Figura 57. La diferencia observada (hexágono rojo) es más negativa en Piura que en Tumbes, es más difícil que llueva en Piura que en Tumbes.

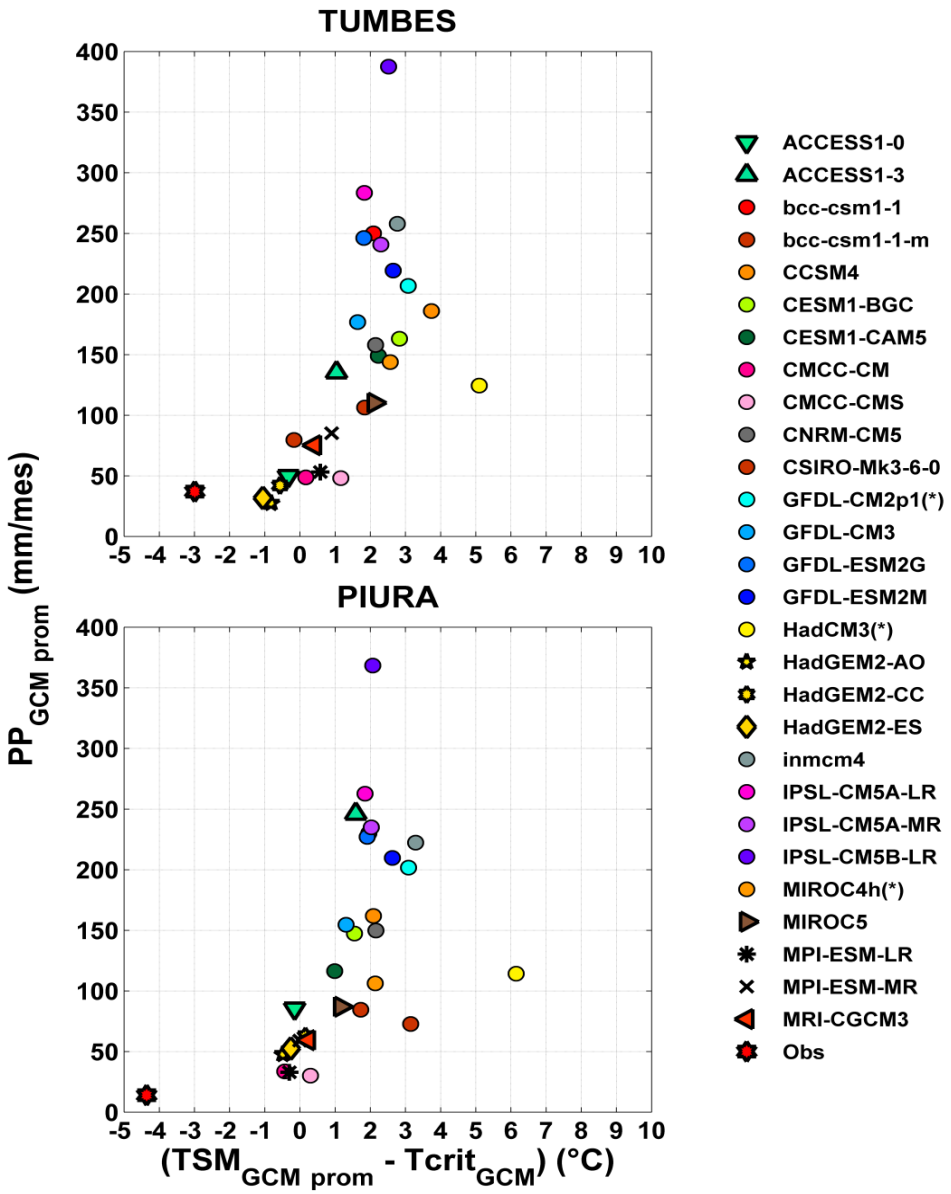


Figura 57: Dispersión entre la diferencia de TSM promedio y la Tcrit versus la PP promedio de cada GCM. Para Tumbes y Piura en el experimento del presente. La estrella muestra la diferencia observada.

Como muestra el Cuadro 12, los modelos con buen ajuste que muestran diferencias ligeramente negativas para el caso de Tumbes en el escenario del presente son: ACCESS1-0, HadGEM2-AO, HadGEM2-CC y HadGEM2-ES.

Cuadro 12: Diferencias de TSP promedio y Tcrit para modelo con buen ajuste en Tumbes.

TUMBES				
	GCMs	$TSM_{prom} - Tcrit$		$\Delta(TSM_{prom} - Tcrit)$
		Presente	Futuro	(Futuro menos Presente)
1	ACCESS1-0	**-0.3**	**0**	0.3
2	ACCESS1-3	1	1.5	0.5
17	HadGEM2-AO	**-0.8**	**-1.1**	-0.3
18	HadGEM2-CC	**-0.6**	**-0.7**	-0.1
19	HadGEM2-ES	**-1.1**	**-0.6**	0.5
25	MIROC5	2.1	1.8	-0.3
26	MPI-ESM-LR	0.6	0.5	-0.1
27	MPI-ESM-MR	0.9	0.9	0.0
28	MRI-CGCM3	0.4	0.4	0.0

Esta diferencia cambia en el escenario del futuro, en algunos casos es cero como para ACCESS1-0, mientras que se hace más negativo en los modelos HadGEM2-AO, HadGEM2-CC y es menos negativa para HadGEM2-ES. Por otro lado los demás cinco modelos mantienen sus diferencias positivas en el escenario del presente y futuro. En algunos modelos como el MPI-ESM-MR y MRI-CGCM3 las diferencias son las mismas en ambos escenarios, esto resulta en un cambio neto de cero.

En el caso de Piura, como se observa en el Cuadro 13, los modelos que muestran una diferencia negativa de TSM promedio y Tcrit en el escenario del presente son: ACCESS1-0, HadGEM2-AO, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR, MRI-CGCM3. De estos cinco modelos solo dos cambian en el futuro a una diferencia positiva (ACCESS1-0 y MRI-CGCM3) y los otros tres mantienen una diferencia negativa. Solo el HadGEM2-AO muestra la misma diferencia en ambos escenarios lo resulta en cambio neto de cero.

Cuadro 13: Diferencias de TSP promedio y Tcrit para modelo con buen ajuste en Piura.

PIURA				
	GCMs	$TSM_{prom} - Tcrit$		$\Delta(TSM_{prom} - Tcrit)$
		Presente	Futuro	(Futuro menos Presente)
1	ACCESS1-0	**-0.1**	**0.2**	0.3
2	ACCESS1-3	1.6	1.8	0.2
17	HadGEM2-AO	**-0.5**	**-0.5**	0
18	HadGEM2-CC	0.2	0.3	0.1
19	HadGEM2-ES	**-0.3**	**-0.1**	0.2
25	MIROC5	1.2	1	-0.2
26	MPI-ESM-LR	**-0.3**	**-0.2**	0.1
27	MPI-ESM-MR	0	0	0
28	MRI-CGCM3	**-0.1**	**0.3**	0.4

La Figura 58 muestra el resultado del cambio de diferencia neto ($\Delta(\mathrm{TSM}_{\mathrm{prom}} - \mathrm{Tcrit})$ en todos los GCMs para Tumbes y Piura. Esto completa lo explicado anteriormente.

Con el calentamiento global se incrementan la TSM promedio y la Tcrit, la precipitación estimada con el MFE dependerá de cuál de los dos incremente más. Por un lado el cambio de TSM promedio es un indicador del cambio local de TSM cercano a la costa, mientras que el cambio de Tcrit estaría más bien relacionado con un calentamiento remoto (por ejemplo el pacífico central) de TSM. Aquellos lugares en los que existe esta relación no lineal de la TSM con la PP son sensibles a tanto el calentamiento remoto como el local; y estos tienen efectos opuestos en su precipitación (Vecchi 2007).

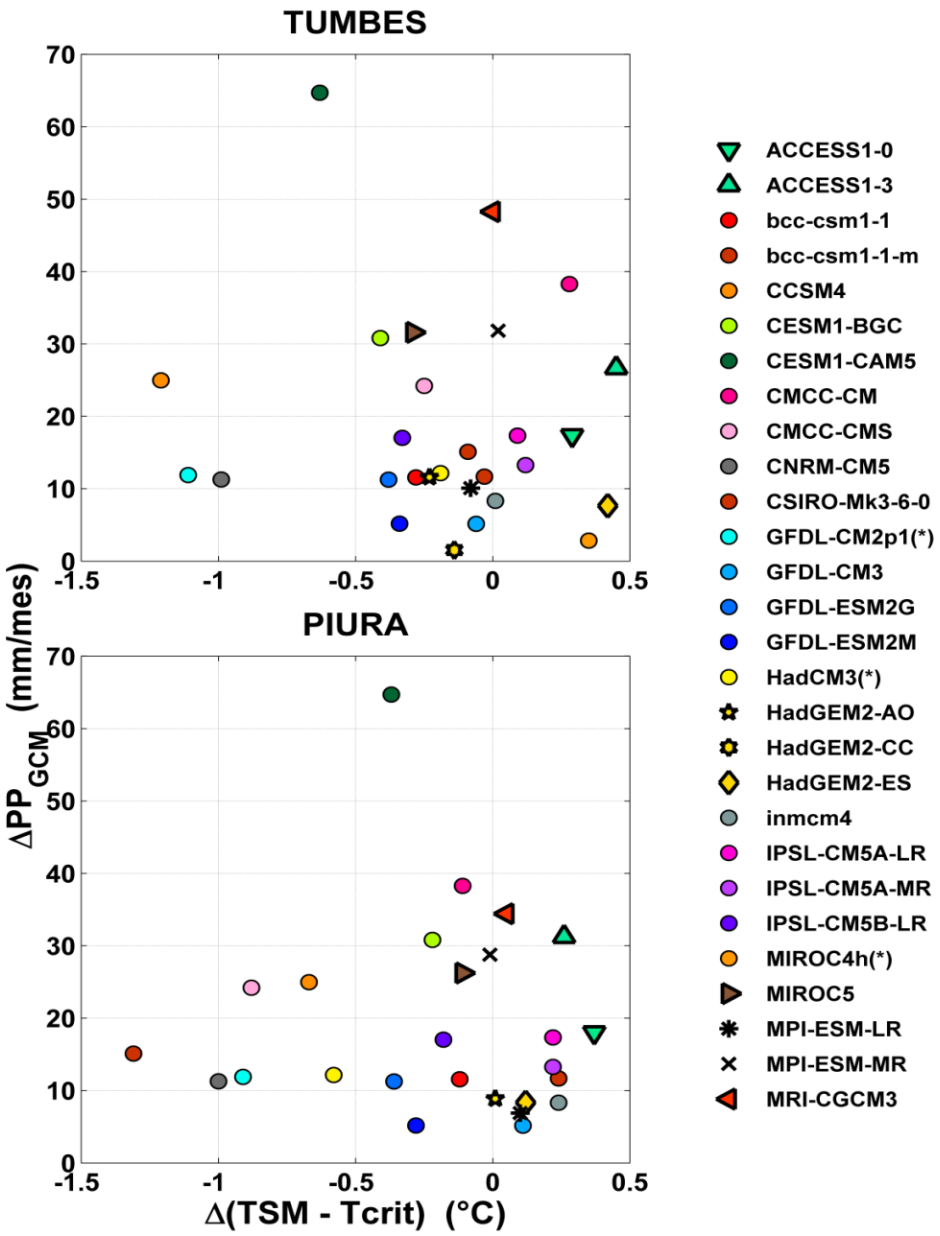


Figura 58: Dispersión entre el cambio de la diferencia de TSM y la Tcrit estimada versus el cambio de PP de cada GCMs.

La Figura 59 muestra la dispersión entre el cambio de Tcrit y el cambio de TSM promedio de cada GCMs, la línea corresponde a la relación de 1:1. Aquellos modelos por encima de la línea son aquellos en los que la TSM promedio es mayor a la Tcrit y al revés en los modelos por debajo de la línea. Si solo consideramos estas dos

variables, Tcrit y TSM promedio, el incremento de PP que muestran los GCMs sería mayor en aquellos ubicados por encima de la línea. Sin embargo esto no es tan simple. El cuadro 14 resume los resultados obtenidos al comparar el cambio de Tcrit y el cambio de TSM promedio en los modelos con buen ajuste.

El MRI-CGCM3 es un modelo con buen ajuste, es el que muestra el mayor incremento de PP promedio en el futuro tanto en Tumbes como en Piura. El cambio de TSM promedio es mayor al cambio de Tcrit en Piura, esto contribuye al incremento de su PP promedio. Por otra parte en Tumbes, el cambio es el mismo y lo que contribuye más al incremento de su PP promedio es el cambio de pendiente. Entonces, como se discutirá más adelante el cambio de PP de los modelos también dependerá del cambio de pendiente.

Cuadro 14: Comparación entre el cambio de Tcrit y el cambio de TSM promedio en los modelos con buen ajuste.

TUMBES			**PIURA**		
$\Delta TSMprom < \Delta Tcrit$	$\Delta TSMprom = \Delta Tcrit$	$\Delta TSMprom > \Delta Tcrit$	$\Delta TSMprom < \Delta Tcrit$	$\Delta TSMprom = \Delta Tcrit$	$\Delta TSMprom > \Delta Tcrit$
HadGEM2-AO	**MRI-CGCM3**	ACCESS1-0	MIROC5	MPI-ESM-MR	ACCESS1-0
HadGEM2-CC	MPI-ESM-MR	ACCESS1-3		HadGEM2-AO	ACCESS1-3
MIROC5		HadGEM2-ES			HadGEM2-ES
MPI-ESM-LR					HadGEM2-CC
					MPI-ESM-LR
					MRI-CGCM3

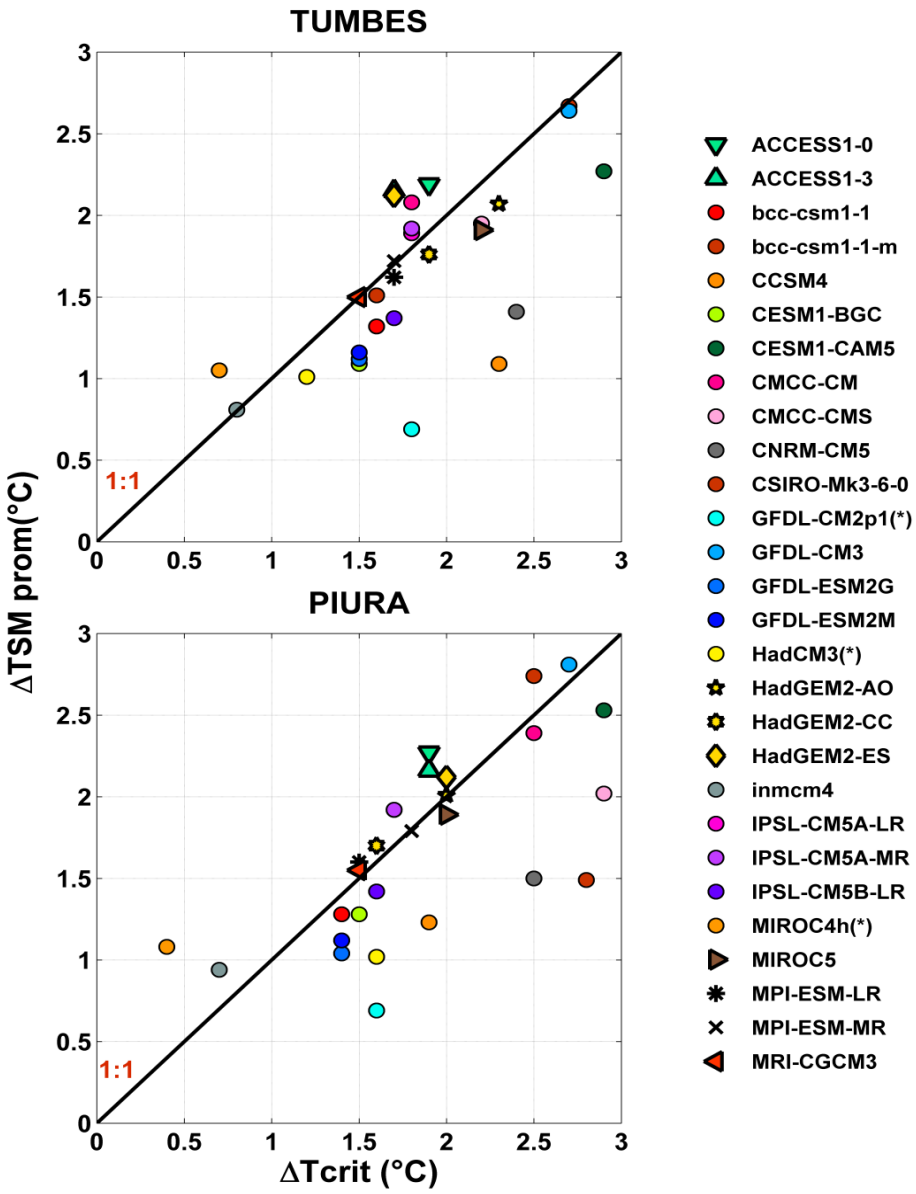


Figura 59: Dispersión entre el cambio de Tcrit y el cambio de TSM promedio para Tumbes y Piura.

Por ejemplo MRI-CGCM3 y MPI-ESM-MR en Tumbes o MPI-ESM-MR y HadGEM2-AO en Piura, muestran cambios de TSM promedio y Tcrit de forma parecida (se ubican en la línea de relación 1:1). Se esperaría un mínimo cambio de PP promedio en estos modelos; pero no es así, esto confirma que el cambio de pendiente es un factor importante en el cambio de PP promedio tanto del MFE y quizá también del GCM (debido al buen ajuste entre el MFE y el GCM).

4.3.2 Análisis de la pendiente ("a").

El segundo parámetro de la ecuación del Modelo Físico Empírico (MFE) es la pendiente, esta es el resultado del ajuste de lineal entre la TSM y la PP a partir de la Tcrit. La pendiente estimada a partir de datos observados es bastante alta en Tumbes (192mm°C^{-1}) y Piura (197mm°C^{-1}); sin embargo, las pendientes estimadas a partir de los GCMs son menores a estos (Figura 69).

La inmensa cantidad de precipitación asociada con eventos de El Niño estaría relacionada con los valores altos de la pendiente en ambos lugares. Entonces la pendiente es un parámetro importante, debido a que un ligero incremento de la TSM por encima de la Tcrit da más precipitación con mayor pendiente.

La Figura 60 muestra la dispersión de las pendientes y PP promedio de los GCMs para Tumbes y Piura. Esta figura muestra que existe una ligera relación lineal entre ambas. Esta relación directa se debería a que la precipitación es mayor para una pendiente mayor. Los coeficientes de correlación lineal son relativamente altos y positivos en Tumbes y Piura, con valores de 0.6 y 0.7 respectivamente. Pese a una regular correlación, el rango de variación es amplio incluso solo considerando los modelos con buen ajuste, el rango para Tumbes varía de 40 a 120 mm°C^{-1} y para Piura de 40 hasta 140 mm°C^{-1}.

Según los resultados de las pendientes estimadas a partir de cada modelo, la gran cantidad de precipitación de los GCMs en el escenario del presente se debería más bien al efecto combinado de la sobreestimación de la TSM y la subestimación de la Tcrit. Quizás el cambio neto de TSM y Tcrit jueguen un papel más importante en el cambio de precipitación en escenario del futuro.

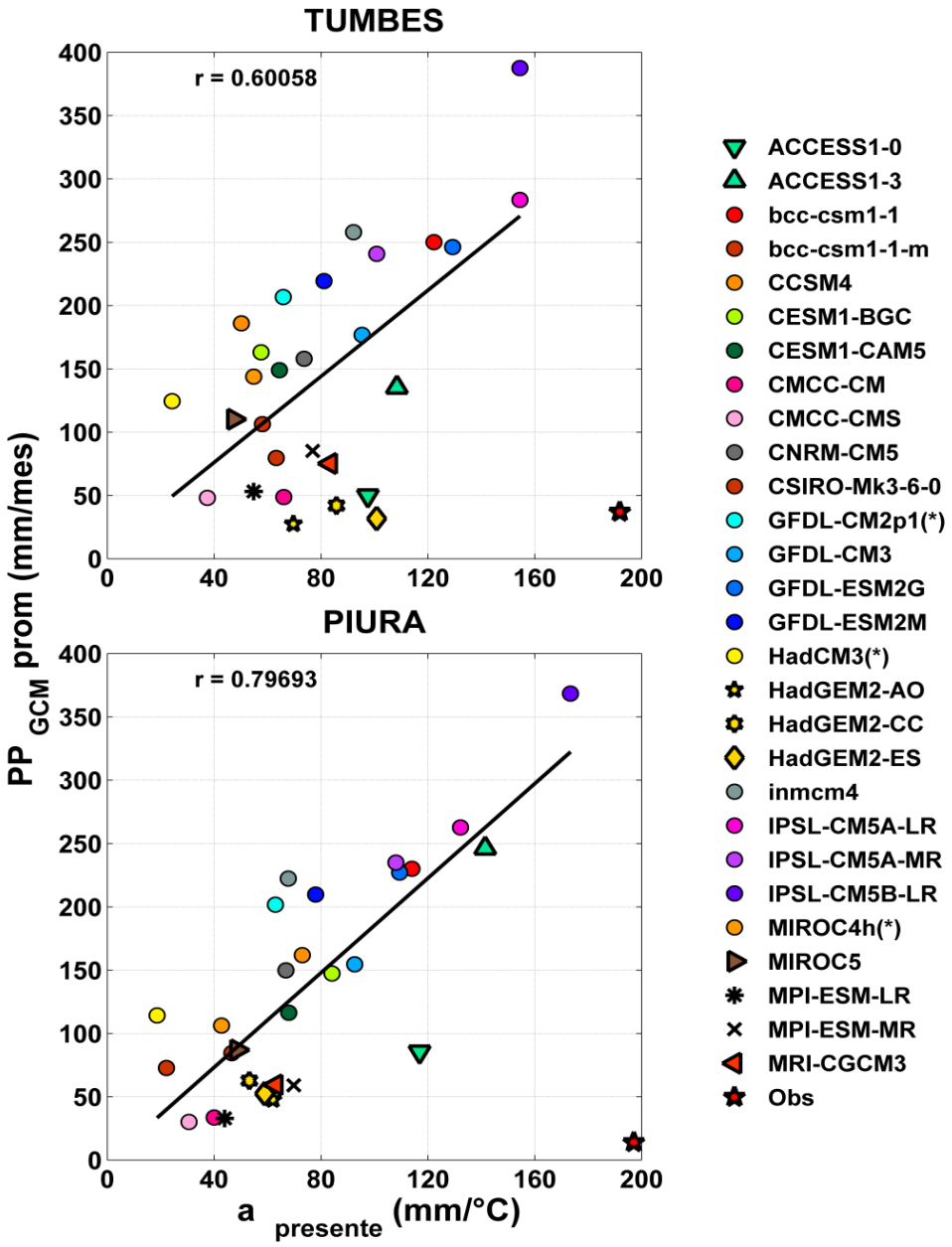


Figura 60: Dispersión de la pendiente estimada de los GCMs y la PP promedio para el experimento del presente. El valor observado es la estrella.

Para observar cual es el efecto del cambio de la pendiente en el cambio de la PP promedio se realizó una dispersión entre ambos para Tumbes y Piura, estas se observan en la Figura 61. Se espera que un incremento de la pendiente contribuya con un mayor cambio de la PP promedio de los GCMs. Los coeficientes de correlación son relativamente altos y positivos en Tumbes (0.5) y Piura (0.6) lo que indica cierta relación directa entre ambos. Sin embargo esta relación

directa entre ambos no es muy evidente en todos los GCMs, incluso algunos modelos con buen ajuste disminuyen su pendiente en el escenario del futuro. Estos modelos en el caso de Piura son: ACCESS1-3, MIROC4h y HadGEM2-CC y en Tumbes es: ACCESS1.3.

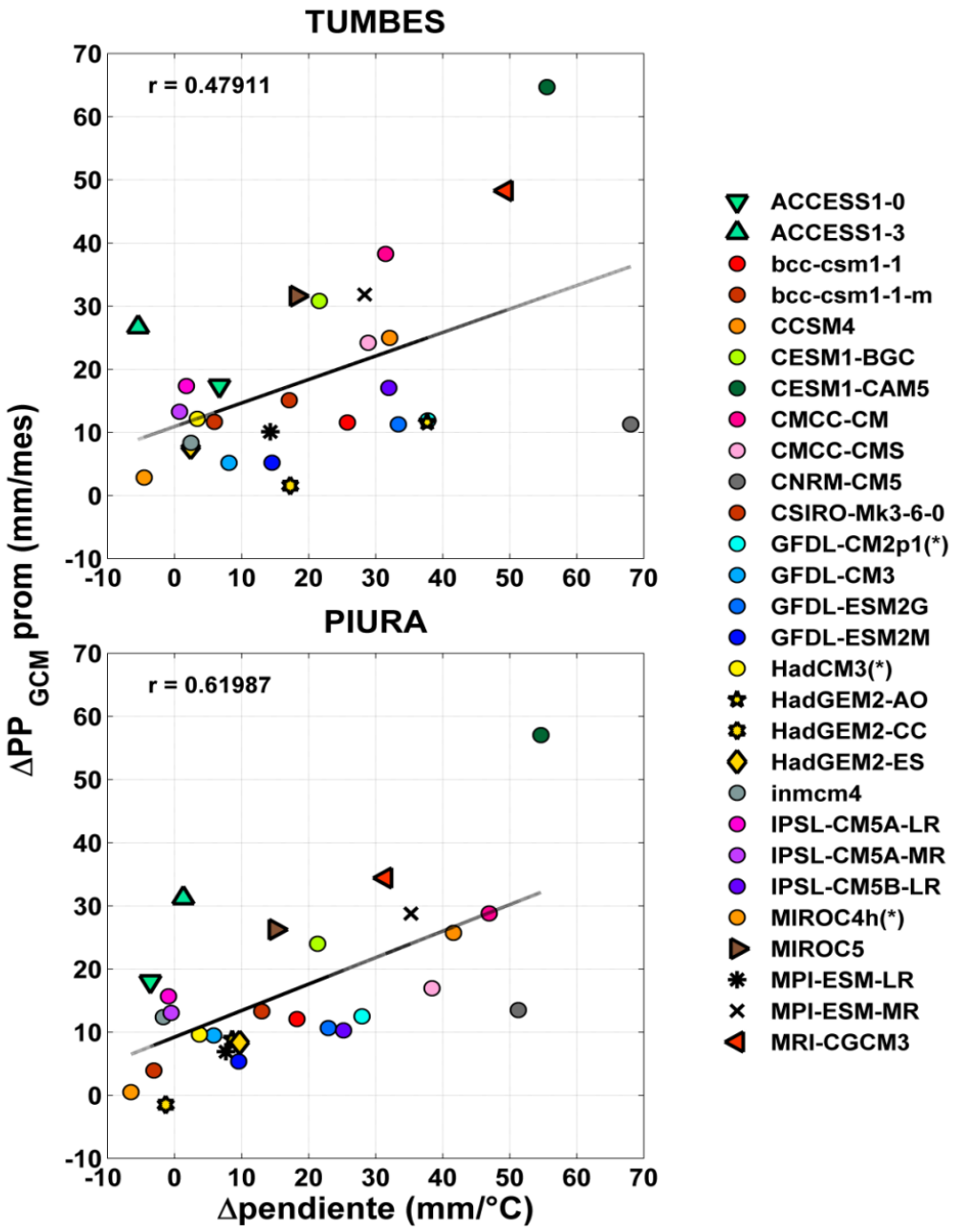


Figura 61: Dispersión entre la diferencia de pendiente (futuro menos presente) y la PP promedio de los GCMs para Tumbes y Piura.

Debido a que la pendiente multiplica a la diferencia de TSM y Tcrit, este solo contribuye con la estimación de la precipitación. Un cambio positivo incrementa la precipitación en el futuro usando el MFE y por el contrario un cambio negativo la disminuye.

Según los resultados obtenidos hasta este punto, la PP promedio del MFE se ajusta muy bien a la PP promedio del GCM, para cada modelo. Sin embargo, los modelos no representan características observadas. Las Figuras 62 y 63 muestran la comparación entre los parámetros estimados con datos de GCMs y los estimados con datos observados en Tumbes y Piura respectivamente. En general, la PP promedio, la TSM promedio y la diferencia de TSM promedio y Tcrit es sobreestimada por los GCMs. Por otra parte la Tcrit y la pendiente es subestimada por los GCMs. El efecto conjunto de la sobreestimación de la TSM promedio y la subestimación de la Tcrit explican en cierta manera la sobreestimación de la PP promedio de acuerdo a la ecuación del MFE.

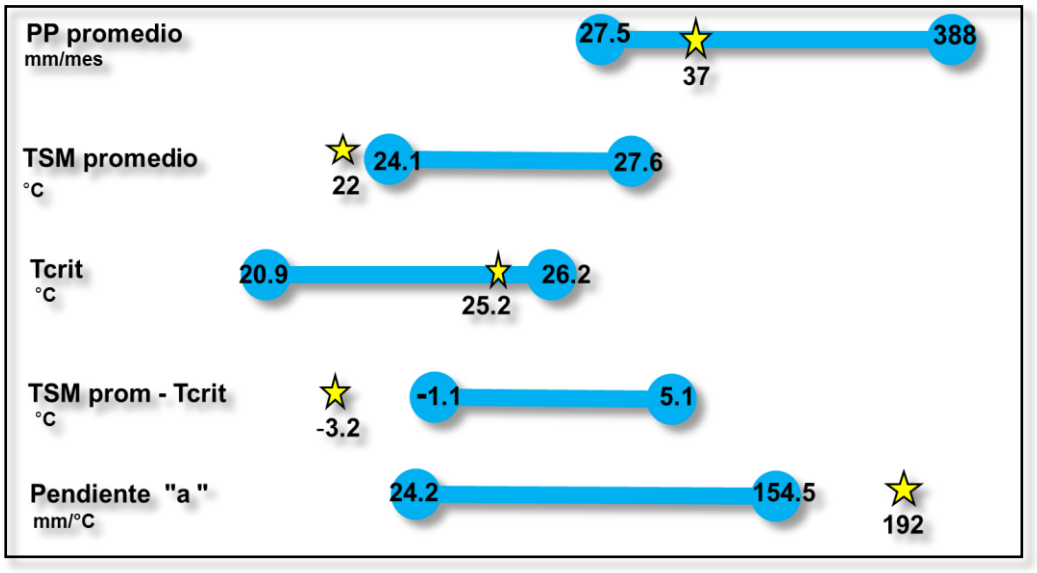


Figura 62: Comparación de parámetros estimados con datos de GCMs y los estimados con datos observados para Tumbes.

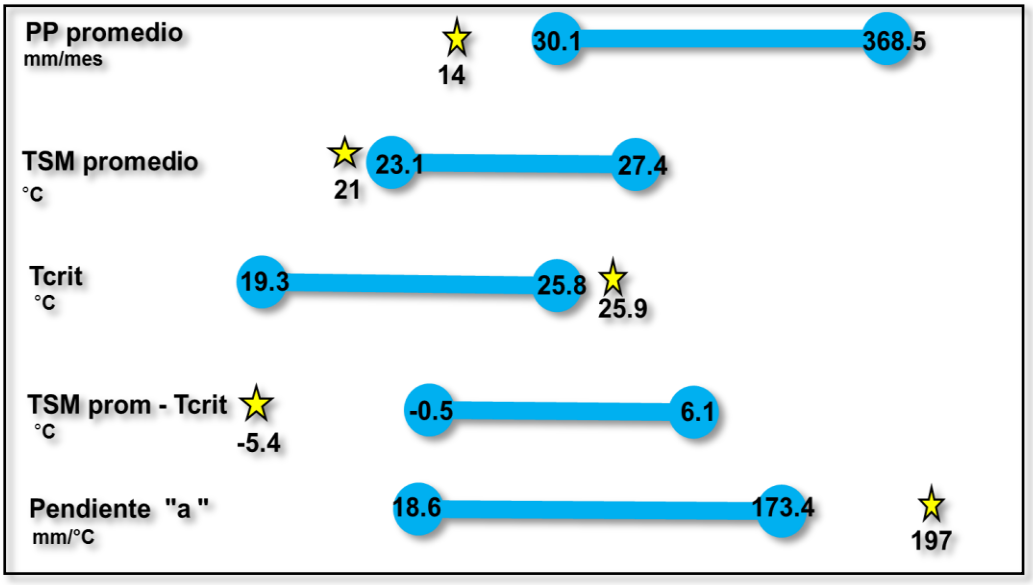


Figura 63: Comparación de parámetros estimados con datos de GCMs y los estimados con datos observados para Piura.

4.4 Resultado del proceso de ajuste del Modelo Físico Empírico (MFE).

De la Figura 64 en adelante se observan los GCMs con bajo ajuste (círculos) y los de buen ajuste (otros marcadores). La Figura 64 muestra el resultado del error relativo del promedio de la PP estimada con el MFE con respecto al promedio de la PP del GCM.

En los GCMs que no tienen buen ajuste se observa que el error relativo llega hasta 4 por ciento debido a su mal ajuste, y por lo tanto su PP estimada con el MFE es mayor al de los GCMs. El error relativo es una buena manera de evaluar al MFE a pesar de que se usaron los promedios.

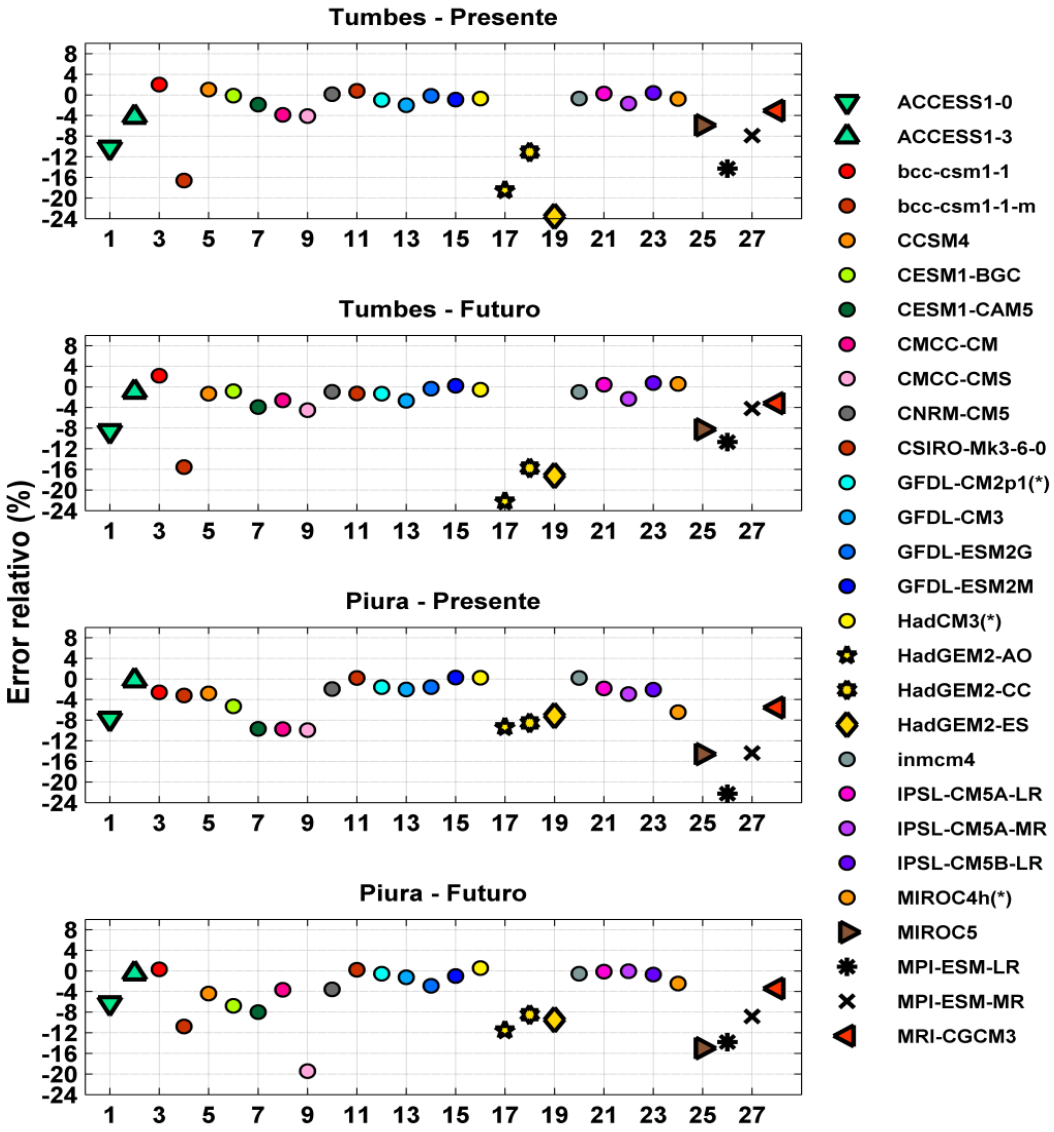


Figura 64: Error relativo de la PP estimada con el MFE.

4.4.2 Correlación Lineal

En la correlación mensual que se realizó se midió la intensidad de la relación entre la PP estimada con el MFE y la PP del propio GCM. Inicialmente se estimó la correlación mensual entre ambos, pero se observó que los modelos que no tienen buen ajuste presentaban también alta correlación (mayor a 0.5), por esta razón se realizaron también las correlaciones entre la PP promedio trimestral (diciembre, enero y febrero) y promedio anual.

La Figura 65 muestra las series de precipitación, el modelo HadGEM2-ES es un modelo con buen ajuste y MIROC4h es un modelo con relativo ajuste. Como se observa en esta misma figura, la correlación mensual entre la PP del MFE y la del GCM es alta (0.87) para HadGEM2-ES y relativamente alta (0.65) para MIROC4h. Por otro lado la correlación del promedio trimestral DEF sigue siendo alta (0.9) para el modelo con buen ajuste, mientras que para el otro modelo la correlación trimestral disminuye haciéndose hace incluso negativa (-0.01).

Finalmente la correlación entre la PP promedio anual del MFE con su análogo del GCM perdura alta (0.9) para el modelo con buen ajuste mientras que para el otro sigue siendo negativo y bajo (-0.08).

En los modelos que no tienen buen ajuste el promedio trimestral de PP del MFE no está bien correlacionado con la PP del mismo modelo. Si la relación entre la PP y la TSM del modelo es directa, entonces la TSM es un factor importante para este; esto caracteriza a un modelo con buen ajuste. Si sucede lo contrario (un modelo sin buen ajuste), la PP del modelo no solo es explicada por la TSM, sino que intervienen otros factores.

Lo dicho en el párrafo anterior se observa en las correlaciones del promedio de la PP trimestral y el promedio de la PP anual entre MFE y el GCM que se muestra en la Figura 66. Si la correlación es positiva y alta es un indicador de un modelo con buen ajuste, en la que su PP está correlacionado con su TSM a nivel mensual, promedio trimestral y promedio anual (HadGEM2-ES). Si por el contrario la correlación es negativa, la PP del

modelo sin buen ajuste no depende únicamente de la TSM del mismo modelo (MIROC4h).

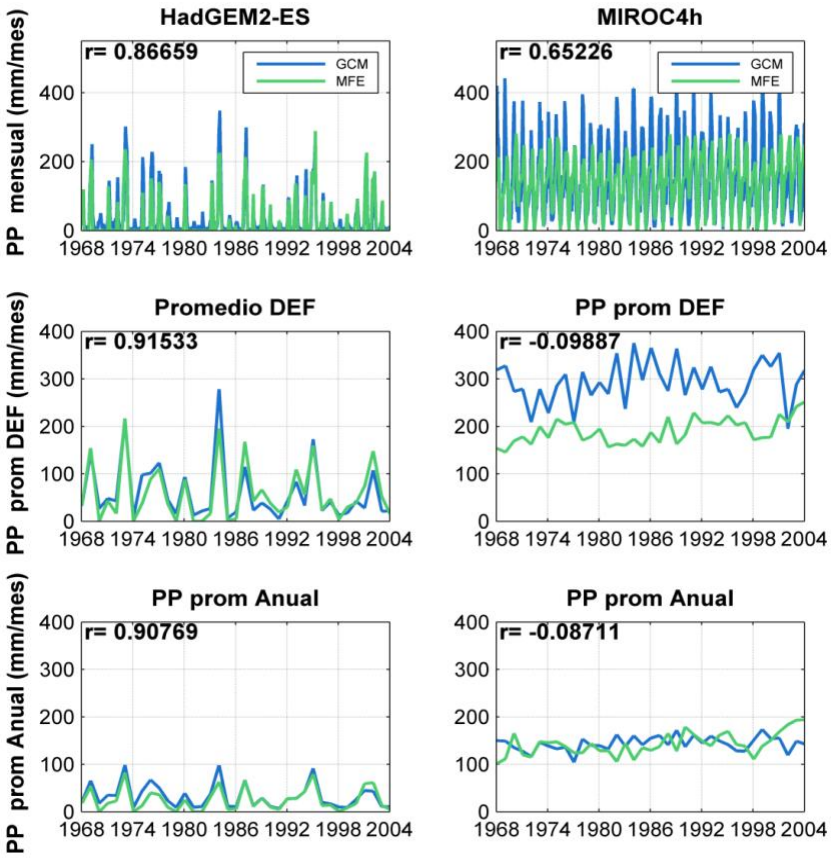


Figura 65: Serie temporal de la PP mensual, promedio DEF y promedio anual. En azul datos de GCMs en verde PP estimada con el MFE. "r" es el coeficiente de correlación lineal o de Pearson. HadGEM2-ES corresponde a un modelo con buen ajuste mientras que MIROC4h a uno con relativo ajuste.

Se realizaron las correlaciones entre la precipitación mensual, promedio trimestral (DEF) y el promedio anual entre la estimada con el MFE y la de los GCMs. Los resultados de estas correlaciones se observan en las Figuras 66 y 67 para Tumbes y Piura respectivamente, para el escenario del presente.

Todos los modelos que fueron denominados de buen ajuste presentan alta y positiva correlación entre la PP mensual (mayor a 0.6), promedio trimestral DEF (mayor a 0.5) y promedio anual (mayor a 0.5). Por otro lado, los resultados de los modelos sin buen ajuste difieren; la correlación entre la PP mensual es positiva (0.2) en la mayoría de

modelos y para ambas zonas de estudio, las correlaciones entre los promedios trimestrales DEF varían de -0.6 hasta 0.6 para ambas zonas y las correlaciones entre los promedios anuales varían de -0.2 a 0.8 también para ambas zonas.

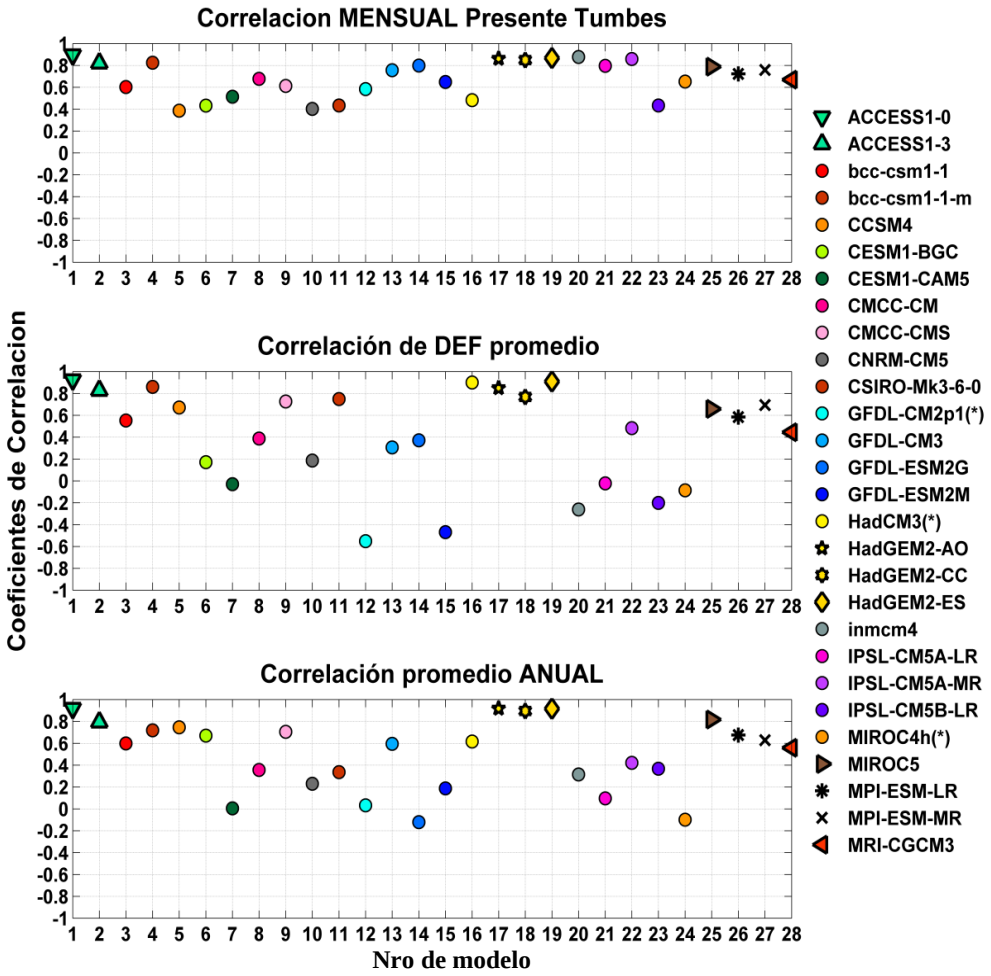


Figura 66: Coeficientes de Correlación mensual, promedio de diciembre, enero y febrero (DEF), promedio anual entre la PP estimada con el MFE y sus análogos en los GCMs. Los números del eje x corresponden a la numeración de los modelos y en el eje "y" están los coeficientes. Los marcadores diferentes a círculo son los que tienen buen ajuste además de buena correlación.

Entre los modelos con relativo ajuste hay algunos como bcc-csm-1, bcc-csm1-1-m, CCSM4 y CMCC-CMS que muestran una correlación mayor a 0.5 en los tres casos y para ambas zonas, sin embargo no se les cambió de denominación a modelos con buen ajuste debido a que la PP del MFE no se ajusta bien a la PP del GCM.

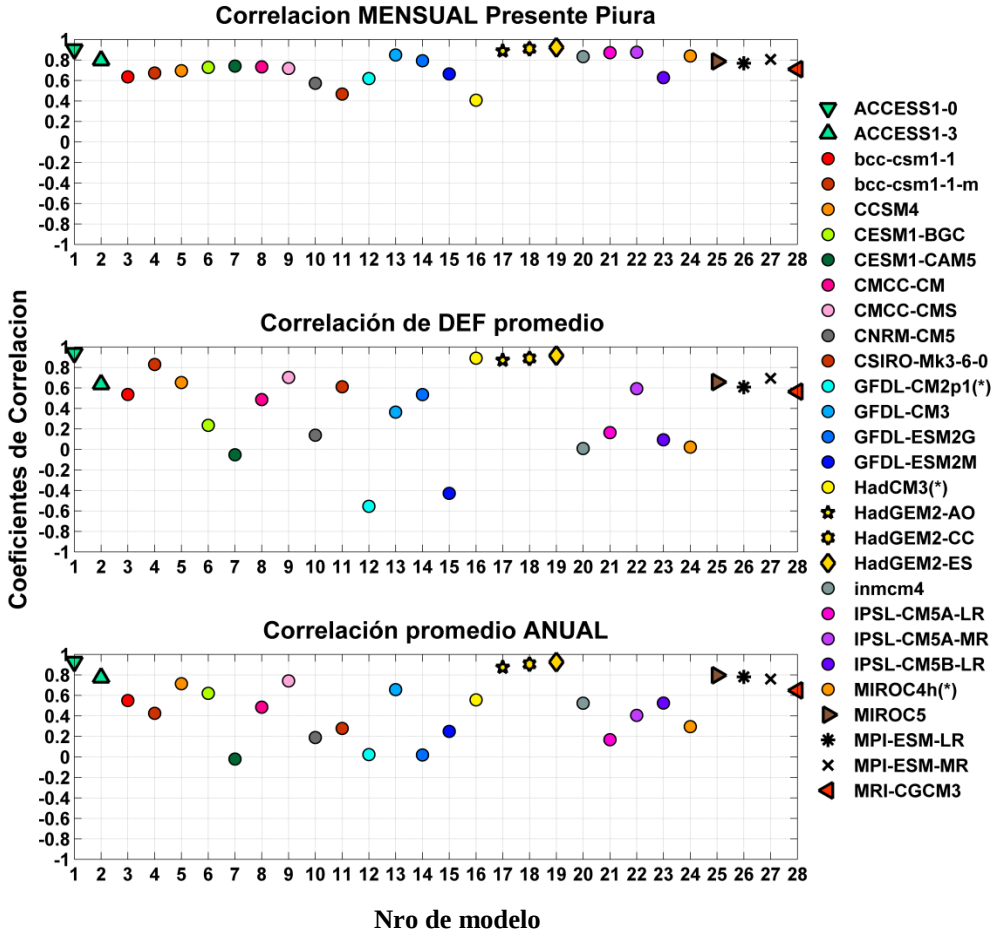


Figura 67: Igual que la figura 66 pero para Piura.

Los resultados para el escenario del futuro se muestran en las Figuras 68 y 69 para Tumbes y Piura respectivamente. La correlación de la PP mensual entre el MFE y el GCM de los modelos con buen ajuste es mayor a 0.5 en ambas zonas. Mientras esta misma correlación varía de 0.3 hasta 0.8 para los modelos con relativo ajuste.

La correlación de la PP del promedio de DEF entre el MFE y el GCM de los modelos con buen ajuste es mayor a 0.6 en ambas zonas, pero estos valores de correlación tienen aún mayor rango de variación (-0.8 hasta 0.9) en los modelos con relativo ajuste en ambas zonas. Y por último las correlaciones de los promedios anuales de PP en los

modelos con buen ajuste siguen manteniéndose alta y mayores a 0.6; mientras que los modelos con relativo ajuste varían de -0.2 hasta 0.8 en ambas zonas.

Una vez más a aquellos modelos con relativo ajuste que tienen relativa alta correlación en los tres casos en el escenario del futuro, no se cambiaron de denominación porque su grado de ajuste entre la PP del MFE y la PP del GCM no es bueno.

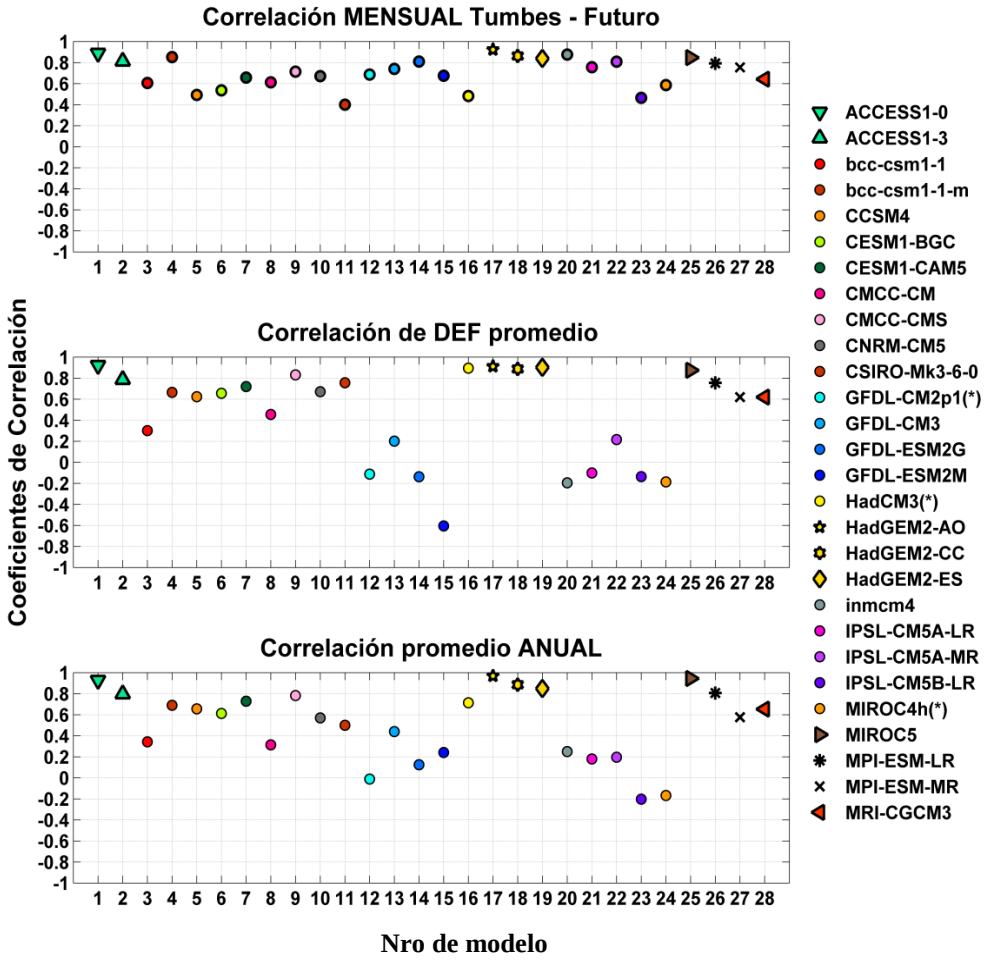


Figura 68: Igual que la figura 66 pero para Tumbes del escenario del futuro.

Los 9 modelos, ACCESS1-0, ACCESS1-3, HadGEM2-AO, HadGEM2-CC, HadGEM2-ES, MIROC5, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR y MRI-CGCM3 son los que tienen buen ajuste entre la PP del MFE y la PP del GCM y estos además mantienen su

correlación alta y positiva cuando se correlacionan las precipitaciones mensuales, promedio trimestrales y promedios anual del MFE y GCMs.

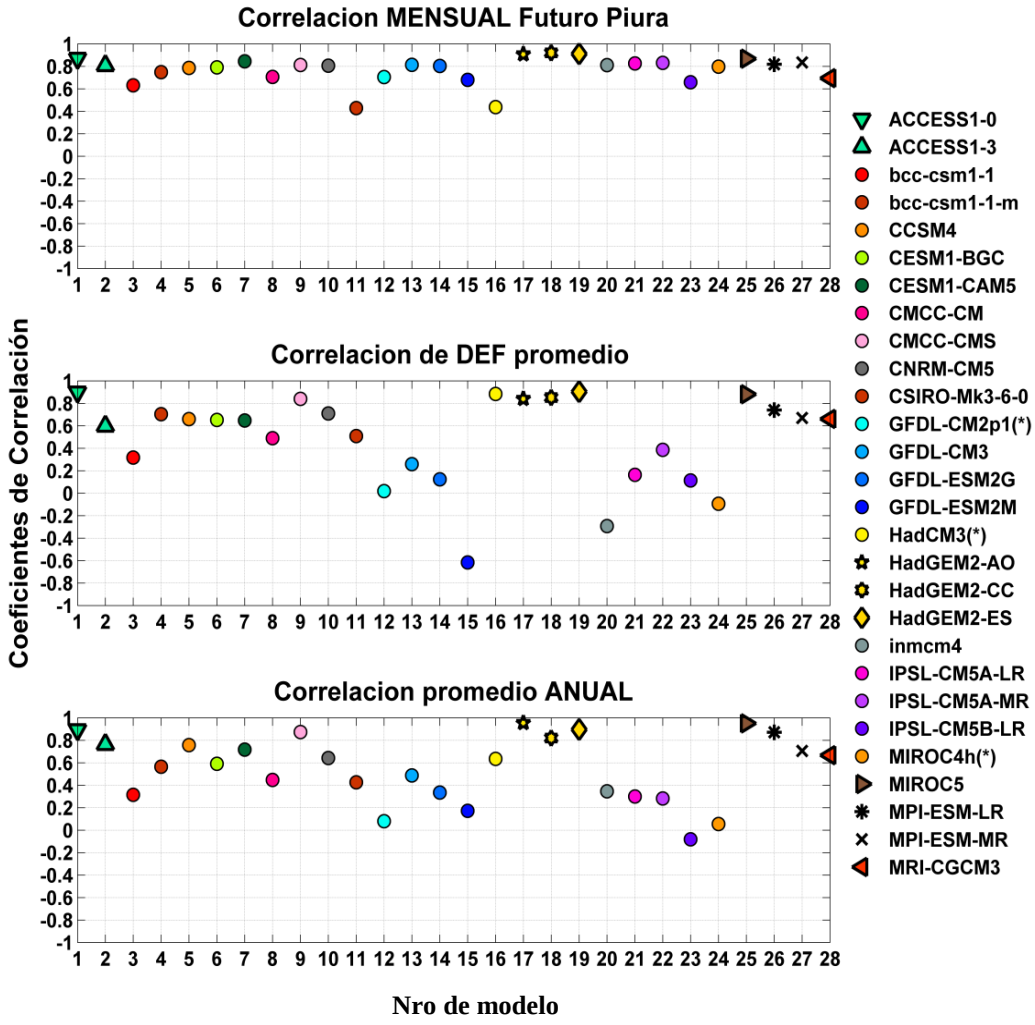


Figura 69: Igual que la figura 66 pero para Piura del escenario del futuro.

4.4.3 Resultados de la estimación de Monte Carlo.

Los parámetros estimados varían dependiendo de la muestra, es decir cada ajuste lineal varía ligeramente si se escogen diferentes muestras. En la Figura 70 (a y b) se observa el resultado de la estimación de Monte Carlo en dos modelos; uno con buen ajuste (HadGEM2) y otro con relativo ajuste (CESM1-CAM5). Se realizó la estimación de parámetros para dos submuestras extraídas con remplazo.

Los parámetros estimados en un modelo con relativo ajuste (Figura 70.a) presentan mayor intervalo de confianza. Las pendientes ("a1" y a2") estimadas a partir de las submuestras son diferentes a la pendiente ("a") estimada con el total de datos. Además las temperaturas críticas (Tcrits) de las submuestras ("Tcrit 1" y "Tcrit 2") también son diferentes a la estimada con el total de datos (Tcrit). Entonces, el intervalo de confianza de la Tcrit varía de 22°C hasta 23.1°C (rectángulo verde de la figura 70.a) mientras que el intervalo de error de la pendiente varía de 68.89mm°C^{-1} hasta 90.19mm°C^{-1}.

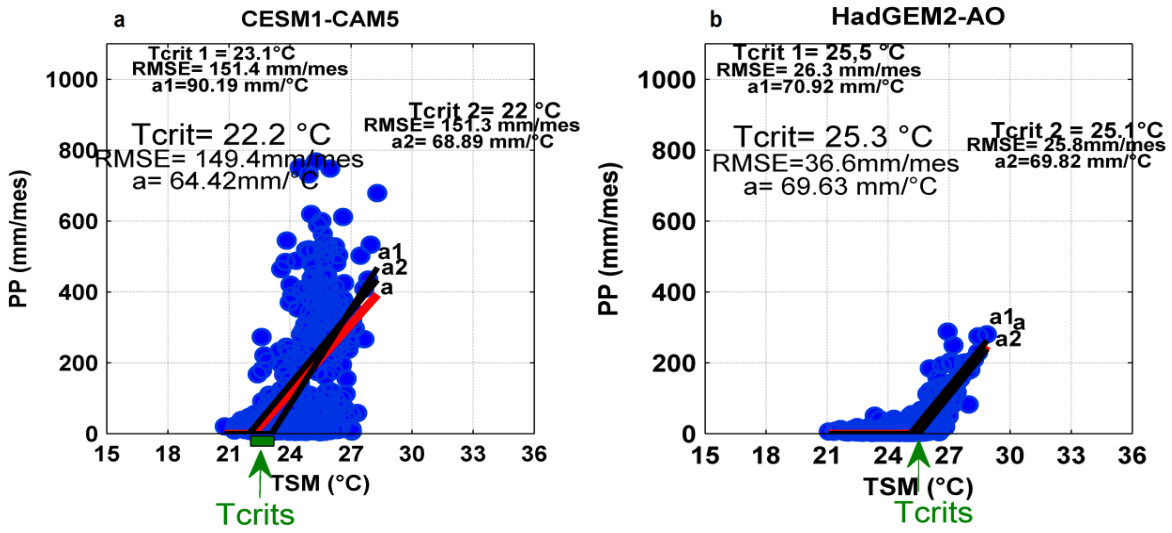


Figura 70: Resultado de la estimación de Monte Carlo para dos submuestras (líneas negras) de un modelo con relativo ajuste (CESM1-CAM5) y uno buen ajuste (HadGEM2-AO). Los parámetros estimados de las submuestras son: Tcrit 1, Tcrit 2, "a1" y "a2". Tcrit y "a" son los parámetros estimados con el total de datos.

Por otro lado los parámetros estimados en un modelo con buen ajuste (Figura 70.b) presentan un menor intervalo de confianza, las pendientes ("a1" y "a2") y Tcrits ("Tcrit 1" y "Tcrit 2") estimadas a partir de las submuestras son muy parecidas a la estimada con el total de datos (Tcrit y "a"). La Figura 70 mostró el resultado de la estimación de Monte Carlo para solo dos submuestras. Sin embargo se realizó esta estimación de parámetros para las 10000 submuestras y para cada modelo del escenario del presente y del futuro. La Figura 71 muestra los histogramas que fueron realizados usando los 10000 resultados de las temperaturas críticas obtenidas a partir de la estimación de Monte Carlo para el escenario del presente (verde) y para el escenario del futuro (rosa).

Se estableció el intervalo de confianza para la Tcrit como el rango entre el percentil 2.5 y el percentil 97.5 (línea horizontal negra en el histograma) para un modelo con relativo ajuste (CESM1-CAM5) y para uno con buen ajuste (HadGEM-AO). El intervalo de confianza para la Tcrit tiene mayor rango en un modelo con relativo ajuste (p97.5 – p2.5= 1.9°C) que en un modelo con buen ajuste (p97.5 – p2.5= 1°C).

En la misma figura 71 se observa que la Tcrit estimada con el total de datos (círculo) para el escenario del presente (verde) y el escenario del futuro (rosa). Esta Tcrit coincide con la mayor cantidad de repeticiones (mayor frecuencia) obtenida a partir de la estimación de Monte Carlo. Por otro lado se realizó la curva de función de probabilidad de densidad (PDF por sus siglas en inglés) de la TSM, que tiene como pico a la TSM promedio. Se realizó un contraste entre la TSM promedio (diamantes) y la Tcrit (círculos) de cada escenario y para cada modelo. Se observa que la Tcrit del modelo con relativo ajuste es mayor a la TSM promedio, mientras que en un modelo con buen ajuste es al revés.

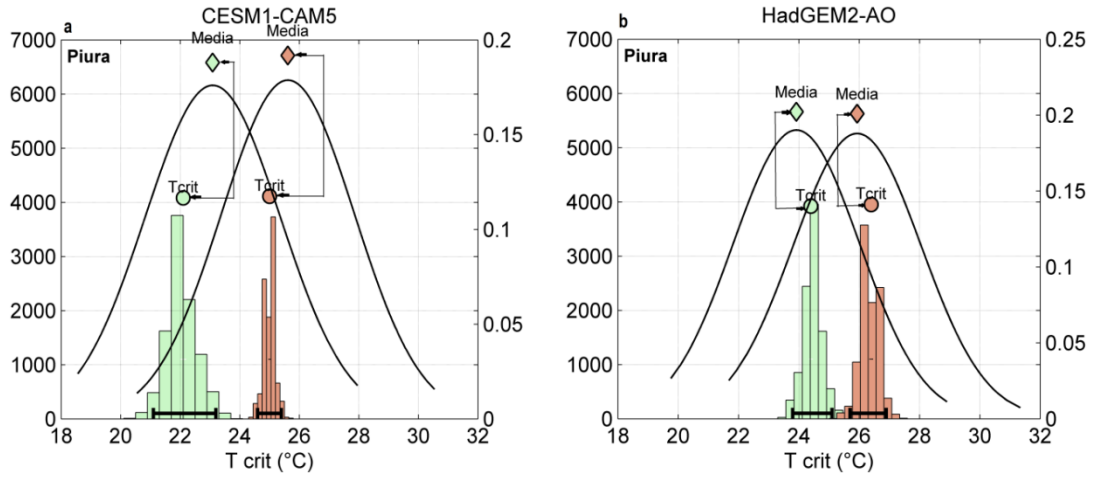


Figura 71: Histogramas de los 10000 estimados de Tcrit obtenidos de la estimación de Monte Carlo. "a" es un modelo con relativo ajuste (CESM1-CAM5) y "b" uno con buen ajuste (HadGEM2-AO). Los ejes del histograma corresponden a la Tcrit (eje x) y la frecuencia (eje y del lado izquierdo). La barra horizontal de color negro es el intervalo confianza de la Tcrit que varía del percentil 2.5 hasta el percentil 97.5. Los círculos sombreados es la Tcrit estimada con todos los datos para el escenario del presente (verde) y el escenario del futuro (rosa). La curva corresponde a función de densidad de probabilidad de la TSM de los GCMs. Los ejes de la curva corresponden a la TSM (eje x) y la probabilidad (eje y del lado derecho). Los diamantes sombreados corresponden a la TSM promedio de cada modelo para cada escenario respectivamente y en diferente color.

Una de las características que fue extraída de los datos observados fue que la Tcrit es bastante mayor a la TSM promedio. Esta característica se observa en los modelos con buen ajuste, aunque la Tcrit sea solo ligeramente mayor a la TSM promedio (media), como se observa en el modelo HadGEM2-AO de la Figura 71b. Por otro lado para un modelo con relativo ajuste (Figura 71a) la media es mayor a la Tcrit siempre, estos GCMs son los que más sobreestiman la precipitación.

Las demás figuras de la estimación de Monte Carlo correspondientes a todos los GCMs se encuentran en el anexo 3 para Tumbes y el anexo 4 para Piura. Los resultados de los intervalos de Tcrit para Tumbes y Piura se observan en los Cuadros 15 y 16.

En los Cuadros 15 y 16 se observa que los modelos con buen ajuste son los que presentan los menores intervalos de Tcrit para el caso de Tumbes y Piura, para ambos escenarios. Los modelos con menores intervalos son ACCESS1-0 y ACCESS1-3, mientras que el mayor intervalo es el modelo MIROC5. El mayor intervalo de Tcrit obtenido en Tumbes y para ambos escenarios fue HadCM3, mientras que en Piura fueron los modelos HadCM3 y bcc-csm1-1-m. Estos dos modelos son los que tienen relativo ajuste.

Cuadro 15: Intervalo de confianza de la Temperatura Crítica (Tcrit) para el escenario del presente y futuro en Tumbes. Estos se han obtenido de la estimación de Monte Carlo, donde p2.5 es el percentil 2.5 y p97.5 es el percentil 97.5.

TUMBES									
N°	**Modelos**	**p2.5 (°C)**	**p97.5 (°C)**	**Intervalo Presente**	**Tcrit (°C) Presente**	**p2.5 (°C)**	**p97.5 (°C)**	**Intervalo Futuro**	**Tcrit' (°C) Futuro**
1	**ACCESS1-0**	**25.9**	**26.6**	**0.7**	**26.2**	**27.7**	**28.4**	**0.7**	**28.1**
2	**ACCESS1-3**	**25.9**	**26.5**	**0.6**	**26.2**	**27.6**	**28.3**	**0.7**	**27.9**
3	bcc-csm1-1	23.3	24.2	0.9	23.8	25	25.8	0.8	25.4
4	bcc-csm1-1-m	22.8	25.8	3	24.9	25.2	27.2	2	26.5
5	CCSM4	20.7	23.8	3.1	22.6	24.2	25.6	1.4	24.9
6	CESM1-BGC	22.2	24.4	2.2	23.3	24.1	25.5	1.4	24.8
7	CESM1-CAM5	21.3	23.2	1.9	22.2	24.7	25.5	0.8	25.1
8	CMCC-CM	23.6	24.7	1.1	24.2	25.3	26.5	1.2	26
9	CMCC-CMS	22.9	25.1	2.2	24	25.4	27.3	1.9	26.2
10	CNRM-CM5	24	26.4	2.4	25.5	27.6	28.2	0.6	27.9
11	CSIRO-Mk3-6-0	21.55	23.8	2.25	22.8	24.2	26.4	2.2	25.5
12	GFDL-CM2p1(*)	22.8	24.6	1.8	23.7	24.8	26.2	1.4	25.5
13	GFDL-CM3	23.4	24.6	1.2	23.9	26.1	27.1	1	26.6
14	GFDL-ESM2G	24.6	25.4	0.8	25	26.2	26.9	0.7	26.5
15	GFDL-ESM2M	23.5	25	1.5	24.3	25.2	26.4	1.2	25.8
16	HadCM3(*)	18.9	22.2	3.3	20.9	19.6	24.3	4.7	22.1
17	**HadGEM2-AO**	**24.8**	**25.8**	**1**	**25.3**	**27.1**	**27.9**	**0.8**	**27.6**
18	**HadGEM2-CC**	**24.5**	**25.7**	**1.2**	**25**	**26.4**	**27.3**	**0.9**	**26.9**
19	**HadGEM2-ES**	**24.8**	**25.9**	**1.1**	**25.4**	**26.5**	**27.5**	**1**	**27.1**
20	inmcm4	23.4	24.2	0.8	23.8	24.1	24.9	0.8	24.6
21	IPSL-CM5A-LR	24.9	25.5	0.6	25.2	26.7	27.3	0.6	27
22	IPSL-CM5A-MR	23.9	24.7	0.8	24.3	25.7	26.4	0.7	26.1
23	IPSL-CM5B-LR	23.6	25.5	1.9	24.8	25.6	27	1.4	26.5
24	MIROC4h(*)	24.4	25.6	1.2	25	24.8	26.5	1.7	25.7
25	**MIROC5**	**22.3**	**24.6**	**2.3**	**23.2**	**24.7**	**26.4**	**1.7**	**25.4**
26	**MPI-ESM-LR**	**22.8**	**24.6**	**1.8**	**23.9**	**25.1**	**26.1**	**1**	**25.6**
27	**MPI-ESM-MR**	**24.1**	**25.2**	**1.1**	**24.6**	**26**	**26.7**	**0.7**	**26.3**
28	**MRI-CGCM3**	**23**	**24.7**	**1.7**	**23.7**	**24.6**	**25.9**	**1.3**	**25.2**

Cuadro 16: Intervalo de confianza de la Temperatura Crítica (Tcrit) para el escenario del presente y futuro en Piura. Estos se han obtenido de la estimación de Monte Carlo, donde p2.5 es el percentil 2.5 y p97.5 es el percentil 97.5.

PIURA									
N°	**Modelos**	**p2.5 (°C)**	**p97.5 (°C)**	**Intervalo Presente**	**Tcrit (°C) Presente**	**p2.5 (°C)**	**p97.5 (°C)**	**Intervalo Futuro**	**Tcrit' (°C) Futuro**
1	**ACCESS1-0**	**25.2**	**26**	**0.8**	**25.6**	**27.1**	**28**	**0.9**	**27.5**
2	**ACCESS1-3**	**25.5**	**26.3**	**0.8**	**25.8**	**27.4**	**28.1**	**0.7**	**27.7**
3	bcc-csm1-1	23.5	24.4	0.9	24	25	25.8	0.8	25.4
4	bcc-csm1-1-m	19.3	25.3	6	20.5	21.8	26	4.2	23.3
5	CCSM4	22.9	24.4	1.5	23.6	25	26.1	1.1	25.5
6	CESM1-BGC	23.1	24.8	1.7	23.9	24.8	25.9	1.1	25.4
7	CESM1-CAM5	21.1	23.2	2.1	22.1	24.6	25.4	0.8	25
8	CMCC-CM	23	25	2	24	25.8	27.2	1.4	26.5
9	CMCC-CMS	22.1	24.8	2.7	23.6	24.9	27.5	2.6	26.5
10	CNRM-CM5	23.6	25.5	1.9	24.6	26.8	27.4	0.6	27.1
11	CSIRO-Mk3-6-0	21.1	23.5	2.4	22.4	24.1	25.7	1.6	24.9
12	GFDL-CM2p1(*)	22.8	24.5	1.7	23.7	24.7	26	1.3	25.3
13	GFDL-CM3	22.9	24.2	1.3	23.5	25.8	26.7	0.9	26.2
14	GFDL-ESM2G	24.4	25.3	0.9	24.8	25.8	26.5	0.7	26.2
15	GFDL-ESM2M	23.9	25.2	1.3	24.5	25.3	26.5	1.2	25.9
16	HadCM3(*)	15.7	20.9	5.2	19.3	17.4	23	5.6	20.9
17	**HadGEM2-AO**	**23.8**	**25.1**	**1.3**	**24.4**	**25.7**	**26.9**	**1.2**	**26.4**
18	**HadGEM2-CC**	**22.8**	**24.2**	**1.4**	**23.4**	**24.5**	**25.5**	**1**	**25**
19	**HadGEM2-ES**	**23.2**	**24.3**	**1.1**	**23.6**	**25.1**	**26.1**	**1**	**25.6**
20	inmcm4	22.5	23.5	1	23	23.1	24.3	1.2	23.7
21	IPSL-CM5A-LR	23.9	24.5	0.6	24.2	25.6	26.2	0.6	25.9
22	IPSL-CM5A-MR	24	24.7	0.7	24.4	25.8	26.5	0.7	26.1
23	IPSL-CM5B-LR	24.2	25.3	1.1	24.8	26.1	26.8	0.7	26.4
24	MIROC4h(*)	23.1	24.7	1.6	23.9	23.7	25.1	1.4	24.3
25	**MIROC5**	**21.3**	**24.6**	**3.3**	**23.2**	**24.2**	**26**	**1.8**	**25.2**
26	**MPI-ESM-LR**	**22.8**	**24.7**	**1.9**	**23.8**	**24.7**	**26**	**1.3**	**25.3**
27	**MPI-ESM-MR**	**24**	**25.5**	**1.5**	**24.8**	**26.2**	**27.2**	**1**	**26.6**
28	**MRI-CGCM3**	**22.5**	**24.8**	**2.3**	**23.4**	**24.1**	**25.9**	**1.8**	**24.9**

4.5 Análisis de Sensibilidad

Después de haber identificado las características de los parámetros observados en los GCMs de ambos escenarios se plantearon cuatro preguntas para realizar el análisis de sensibilidad, para responder a estas se realizaron figuras, a continuación se explica cada una.

4.5.2 Análisis de la Tcrit

¿Qué pasaría con el cambio de PP si solo cambia la Tcrit en el futuro?

El supuesto de esta pregunta es: Si en el futuro solo cambiara la Tcrit, manteniendo solo la TSM y pendiente del presente igual a la del futuro.

Los modelos climáticos predicen un debilitamiento del movimiento convectivo atmosférico en respuesta a calentamiento de la superficie debido a un incremento de GEI, este debilitamiento se manifestaría en parte, como un debilitamiento de la circulación de Walker (Vecchi 2006). Esta reducción del movimiento convectivo simulada por los GCMs es un indicador de un aumento de la estabilidad atmosférica en promedio de la región tropical. Por lo tanto se esperaría un incremento de Tcrit en el futuro.

En resumen un incremento de Tcrit cerca a la costa de Perú está relacionada con un incremento de la temperatura (superficial y del aire) en toda la región tropical, esto disminuirá la precipitación por un incremento de la inversión térmica. Lo contrario sucede si la Tcrit disminuye.

Se usaron las ecuaciones 4 y 5 para observar el comportamiento de los modelos a solo el cambio de la Tcrit en el futuro.

$$PP_{est_presente} = a_{pre} * \left(TSM_{GCM_{pre}} - Tcrit_{GCM_{pre}}\right) \quad ----\rightarrow (4)$$

$$PP_{est_{futuro}} = a_{pre} * \left(TSM_{GCM_{pre}} - \mathbf{Tcrit_{GCM_{fut}}}\right) ----\rightarrow (5)$$

La Figura 72 muestra la dispersión del cambio de la PP de cada GCM (ΔPP_{GCM}) y el cambio de la PP estimado con el MFE bajo el supuesto ya mencionado ($\Delta PP_{estimada}$).

Una forma rápida de visualizar estas figuras en esta sección es recordando la dispersión entre el cambio de PP de cada GCM y la PP del MFE (Figura 53), en esta figura se mostró una buena relación lineal entre. La línea de 1:1 es un indicador de esta relación lineal entre ambos. Por lo tanto si los modelos se ubican por debajo (encima) de la línea, indica que la PP estimada disminuye (aumenta).

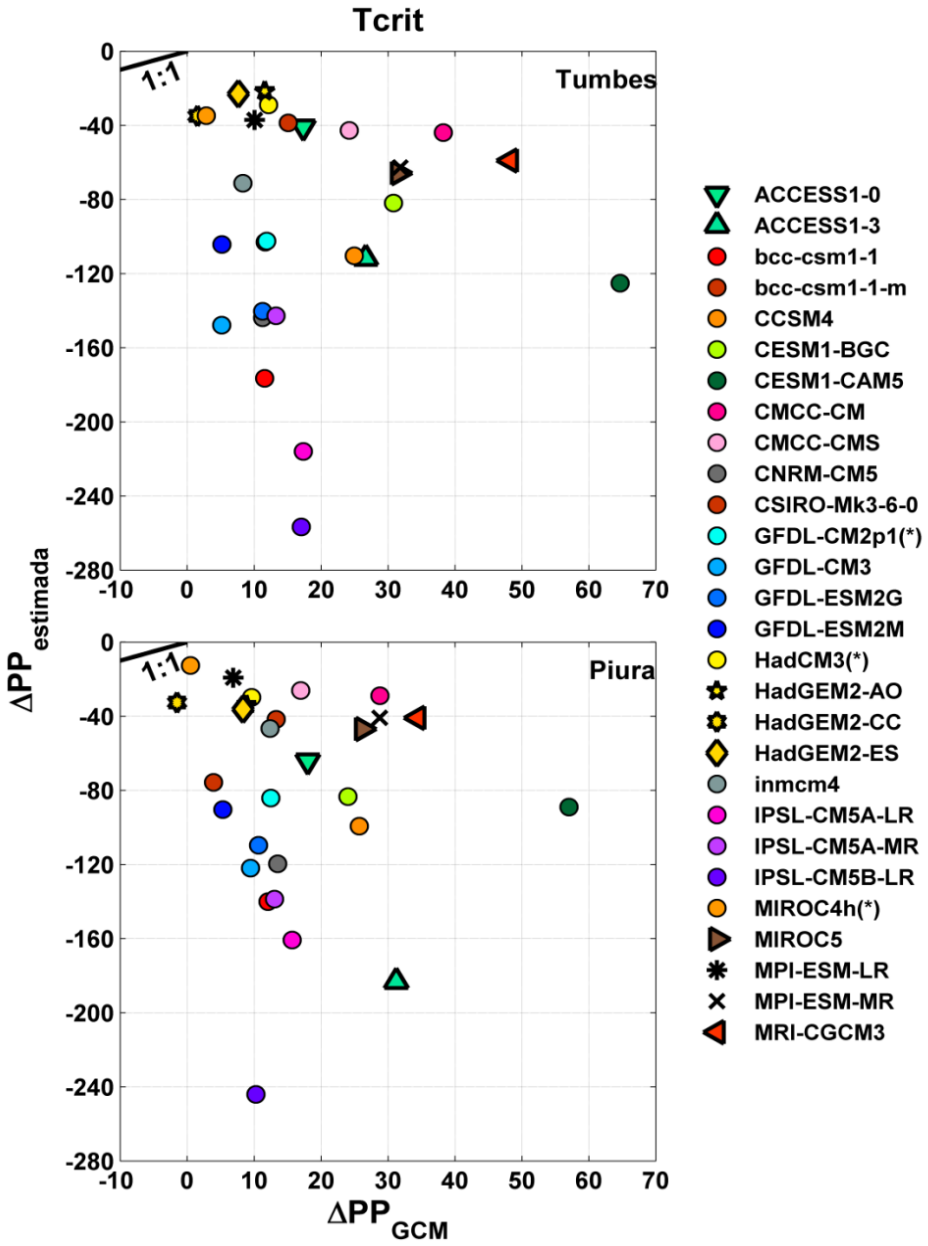


Figura 72: Sensibilidad de Tcrit. Dispersión entre el cambio de PP de los GCM y el cambio de PP estimado con la ecuación 4 y 5.

Mientras más negativo es el cambio de PP, los modelos incrementan más su Tcrit como se observa en la Figura 72. Los modelos que tienen buen ajuste muestran cambios negativos mayores a -120mm mes-1 en Tumbes y -180mm mes-1 en Piura, esto porque sus Tcrit no incrementan en gran medida . Una vez más los tres IPSL muestran los extremos, en este caso son los que mas cambio negativo muestran, esto es debido que también por un mayor incremento de su Tcrit.

4.5.3 Análisis de la TSM

¿Qué pasaría con el cambio de PP si solo se calienta el mar (incremento de TSM) en el futuro?

El supuesto de esta pregunta es: Todas las condiciones del presente se mantienen constante, es decir si la Tcrit y "a" en el futuro es la misma que en presente, solo la TSM varía en el futuro.

El calentamiento global estará asociado a una estabilización de la atmósfera tropical, entonces dependerá de cuánto se caliente la superficie del mar costero (TSM) para saber si la lluvia aumentará o disminuirá, hay indicaciones de que la costa podría calentarse menos que el resto (Bakun 1990, Falvey y Garreaud 1999). El cambio de TSM promedio es positivo en todos los modelos, esto indica que según los modelos usados en este estudio habrá un calentamiento de hasta 2°C del mar cercano a la costa norte del Perú.

La Tcrit es subestimada por todos los modelos en el escenario del presente, entonces con solo un incremento de TSM se espera que la precipitación incremente en el futuro. Se usaron las ecuaciones 4 y 6 para observar el comportamiento de los modelos a solo el cambio de la TSM en el futuro.

$$PP_{est_presente} = a_{pre} * \left(TSM_{GCM_{pre}} - Tcrit_{GCM_{pre}}\right) - - - - \rightarrow (4)$$

$$PP_{est_futuro} = a_{pre} * \left(\mathbf{TSM_{GCM_{fut}}} - Tcrit_{GCM_{pre}}\right) - - - - \rightarrow (6)$$

La Figura 73 muestra la dispersión del cambio de la PP de cada GCM (ΔPP_{GCM}) y el cambio de la PP estimado con el MFE bajo este supuesto ($\Delta PP_{estimada}$).

El resultado de este supuesto es claro, todos los modelos incrementan su precipitación en el futuro con solo un incremento de TSM. Los modelos que más incrementan más la precipitación estimada fueron aquellos con el mayor incremento de TSM en el futuro.

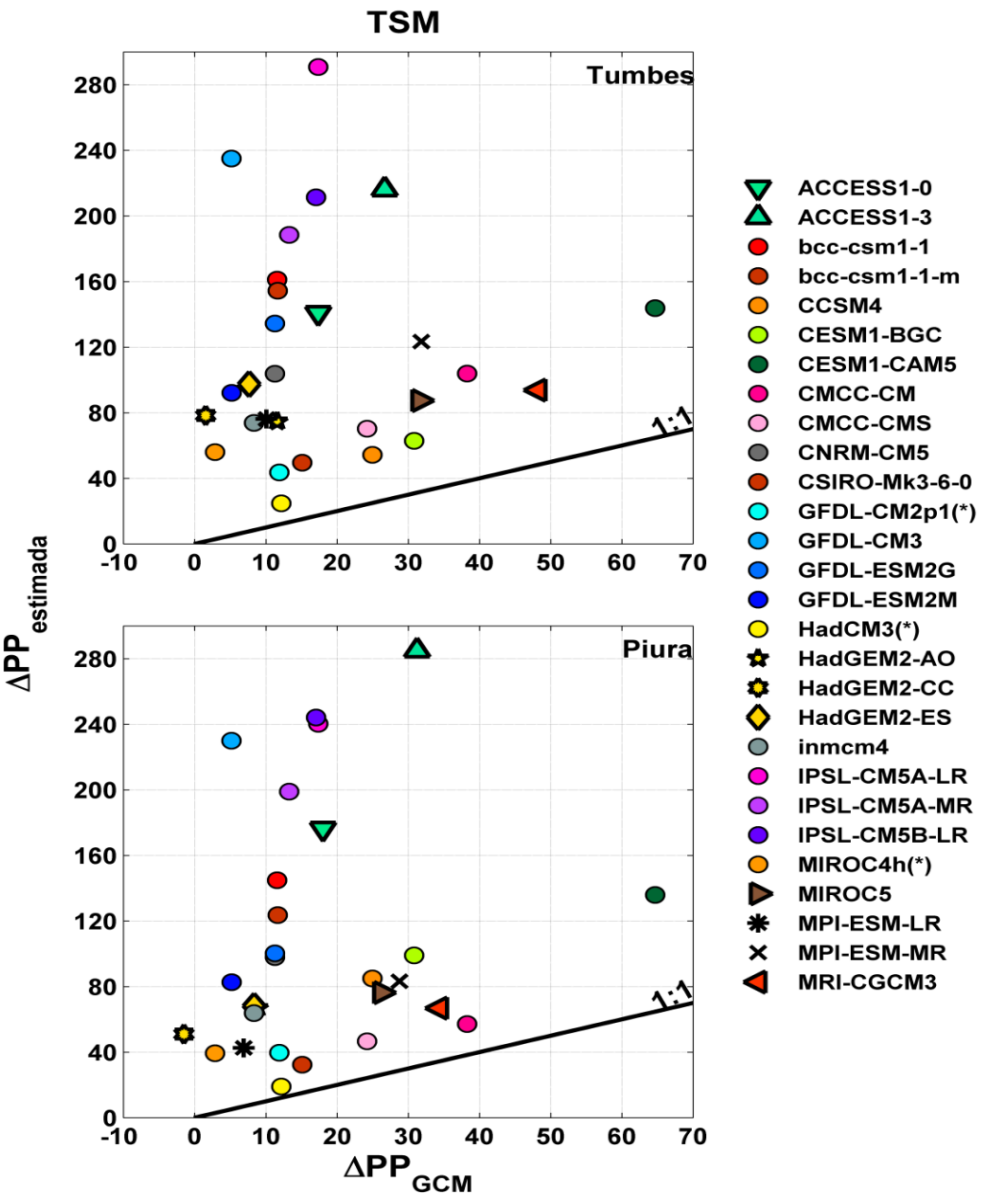


Figura 73: Sensibilidad de TSM. Dispersión entre el cambio de PP de los GCM y el cambio de PP estimado con la ecuación 4 y 6.

4.5.4 Análisis de la Pendiente

¿Qué pasaría con el cambio de PP si solo se cambiara la pendiente ("a") en el futuro?

Debido a que no existe una explicación física de la pendiente, ya que solo es el resultado del ajuste lineal de la TSM y PP a partir de la Tcrit. Solo se tratará de observar los resultados de este supuesto: ¿Qué sucede con la PP promedio si solo cambia la pendiente en el futuro? Para responder a esta pregunta se realizó una dispersión entre los cambio de PP.

$$PP_{est_presente} = a_{pre} * \left(TSM_{GCM_{pre}} - Tcrit_{GCM_{pre}}\right) \quad ----\rightarrow (4)$$

$$PP_{est_futuro} = \mathbf{a_{fut}} * \left(TSM_{GCM_{pre}} - Tcrit_{GCM_{pre}}\right) \quad ----\rightarrow (7)$$

La Figura 74 muestra la dispersión del cambio de la PP de cada GCM (ΔPP_{GCM}) y el cambio de la PP estimado con el MFE bajo este supuesto ($\Delta PP_{estimada}$). El rango de variación del cambio de PP promedio que muestran los modelos varía en un rango de -20mm mes-1 y 130mm mes-1 en Tumbes y de -20mm mes-1 y 120mm mes-1 en Piura. Pero considerando solo los modelos con buen ajuste este rango varía de -10 a 40 mm mes-1 en ambas zonas.

En los análisis de sensibilidad anteriores se observó solo una respuesta en todos los modelos por supuesto. O bien todos los modelos disminuyen su PP promedio con solo el cambio de Tcrit, o bien todos la incrementan con solo el cambio de TSM. En este nuevo supuesto no se observa un comportamiento similar en todos los modelos, los cambios de PP son tanto positivos como negativos incluso en los modelos de buen ajuste.

Entonces, aquellos modelos que incrementan (disminuyen) su pendiente en el futuro incrementan (disminuyen) también su PP promedio. El cambio de la pendiente es un factor que contribuye con la PP estimada con el MFE, no determina si hay o no precipitación. La única condición que determina que ocurra PP es que la TSM supere a la Tcrit.

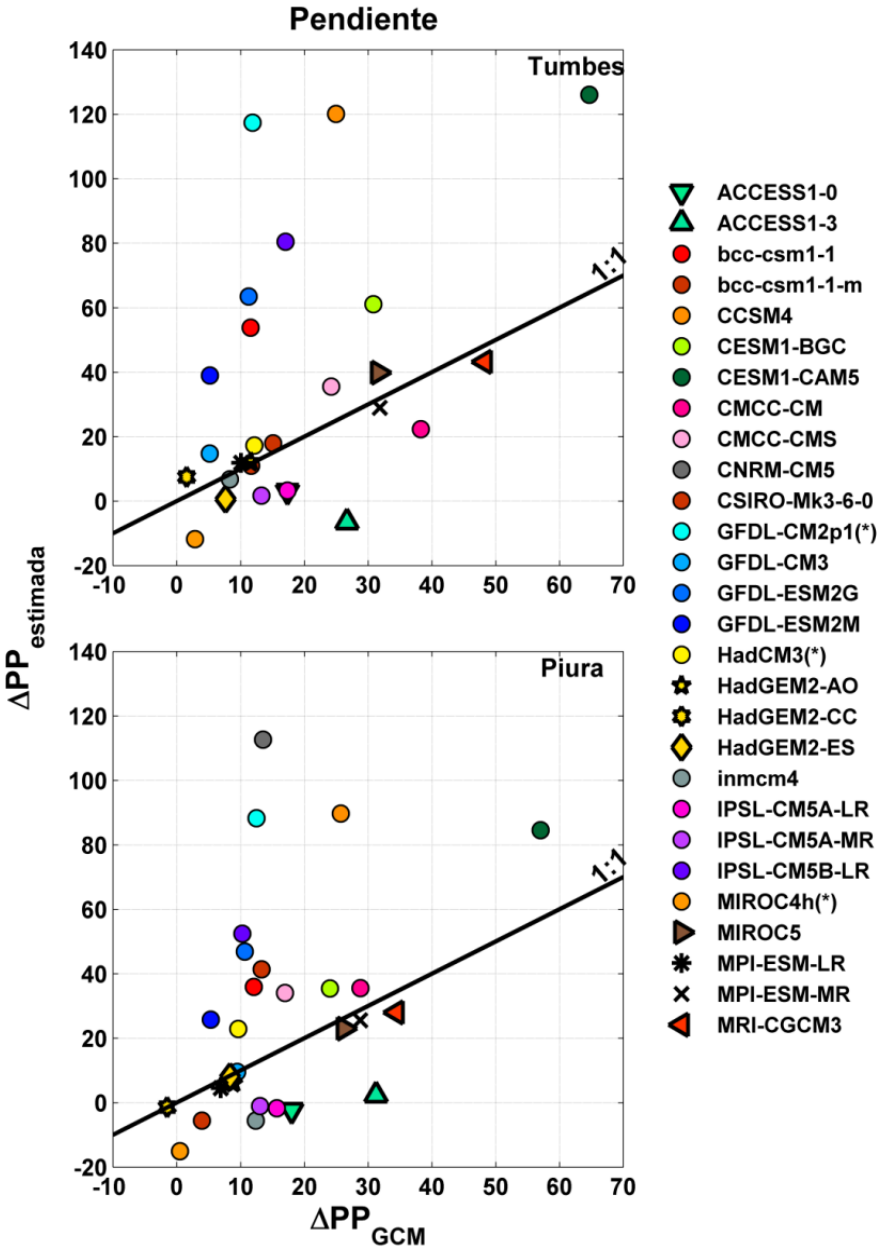


Figura 74: Sensibilidad de la pendiente. Dispersión entre el cambio de PP de los GCM y el cambio de PP estimado con la ecuación 4 y 7.

4.5.5 Análisis de (TSM – Tcrit)

¿Qué pasaría con el cambio de PP si cambia la TSM y la Tcrit en el futuro?

El supuesto de esta pregunta es: En este caso solo la pendiente "a" del presente se mantiene constante en el futuro, se asume que hay un cambio de TSM y Tcrit en el futuro.

Se usaron las ecuaciones 4 y 8 para observar el comportamiento de los modelos al cambio neto de la TSM y Tcrit en el futuro.

$$PP_{est_presente} = a_{pre} * \left(TSM_{GCM_{pre}} - Tcrit_{GCM_{pre}}\right) \longrightarrow (4)$$

$$PP_{est_futuro} = a_{pre} * \left(\mathbf{TSM_{GCM_{fut}}} - \mathbf{Tcrit_{GCM_{fut}}}\right) \longrightarrow (8)$$

La Figura 75 muestra la dispersión del cambio de la PP de cada GCM (ΔPP_{GCM}) y el cambio de la PP estimado con el MFE bajo este supuesto ($\Delta PP_{estimada}$). Como se observa en esta figura; el cambio de ambas variables otra vez da un cambio de PP tanto positivo como negativo, con solo el cambio de la pendiente se obtuvo un resultado parecido.

Los cuadros 12 y 13 mostraron los cambios de la diferencia de TSM pormedio y Tcrit de los modelos con buen ajuste para Tumbes y Piura. Aquellos modelos que muestran un cambio positivo (negativo) en estos cuadros, muestran (Figura 75) que la PP promedio incrementa (disminuye). Mientras que aquellos modelos que no cambian esta diferencia , tampoco muestran un cambio de PP promedio estimada.

En Tumbes los modelos con buen ajuste que 1. incrementan su PP promedio estimada son : ACCESS1-0, ACCESS1-3, HadGEM2-ES, 2. disminuyen su PP promedio estimada son: HadGEM2-CC, MIROC5 y 3. no muestran cambio significativo de PP promedio estimada son: MPI-ESM-MR, MRI-CGCM3, MPI-ESM-LR y HadGEM2-AO.

En el caso de Piura los modelos con buen ajuste que 1. incrementan su PP promedio estimada son : ACCESS1-0, ACCESS1-3, MRI-CGCM3 2. no muestran cambio

significativo de PP promedio estimada son: MPI-ESM-MR, MPI-ESM-LR HadGEM2-AO, HadGEM2-CC, HadGEM2-ES, MIROC5 y HadGEM2-CC.

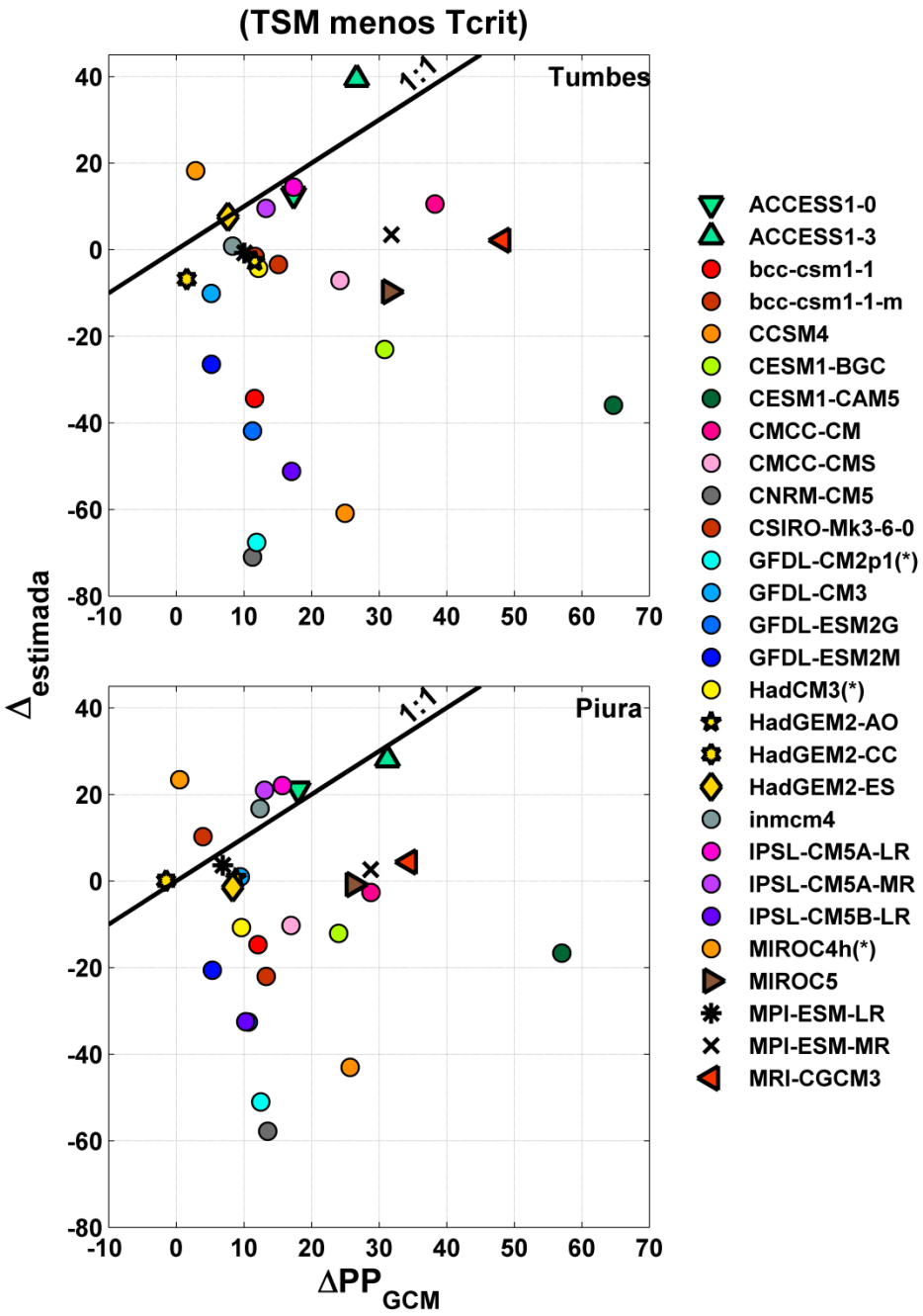


Figura 75: Sensibilidad de la diferencia de TSM y Tcrit. Dispersión entre el cambio de PP de los GCM y el cambio de PP estimado con la ecuación 3 y 7.

Hasta este punto hemos observado que solo el cambio de Tcrit producirá disminución de la PP promedio; solo el cambio de TSM producirá un incremento de la PP promedio. Por otro lado, se obtiene tanto un incremento como una disminución de la PP promedio con solo el cambio de la pendiente ("a") o con el cambio de la TSM y la Tcrit al mismo tiempo. Este análisis de sensibilidad se sintetiza en las Figuras 76 y 77 para Tumbes y Piura respectivamente, para todos los modelos.

En general con solo el cambio de Tcrit en el futuro se disminuye la PP promedio en el futuro, su rango varía -20 hasta -100 porciento la precipitación estimada para el presente. Solo el cambio de TSM en el futuro resulta mas bien en un incremento de la precipitación, que varía de 20 a 160 porciento la precipitacion estimada del presente.

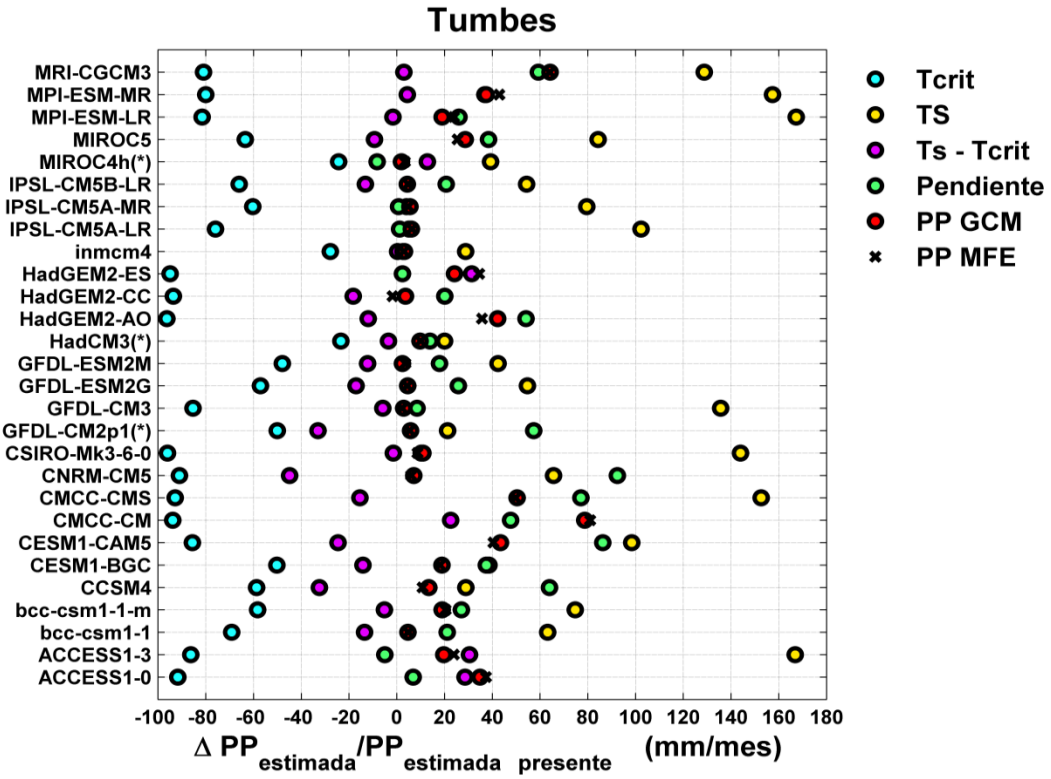


Figura 76: Para el eje x se estimó el cambio de la precipitación con respecto al presente para Tumbes. La PP estimada del futuro fue estimada manteniendo todo constante (igual que la PP estimada del presente) solo variando un parámetro, la leyenda muestra el parámetro que se cambió en cada caso siguiendo la metodología del análisis de sensibilidad. PP GCM es el cambio de la precipitación de los GCMs y PP MFE es el cambio de la precipitación estimada con todos sus parámetros.

Por otro lado el cambio de TSM y Tcrit en el futuro resulta en general en una disminución de la PP, pero también varía de -60 a 40 porciento la precipitación del presente. Incluso hay modelos que no muestran cambios de la PP.

El resultado del cambio de pendiene tiene un mayor rango, este varía de -10 a 100 porciento la precipitacion estimada del presente, pero en general contribuye con el incremento de la precipitación en aquellos modelos que incrementan la pendiente (casi la mayoría) y los modelos que la disminuyen mas bien resultan en disminución de la PP.

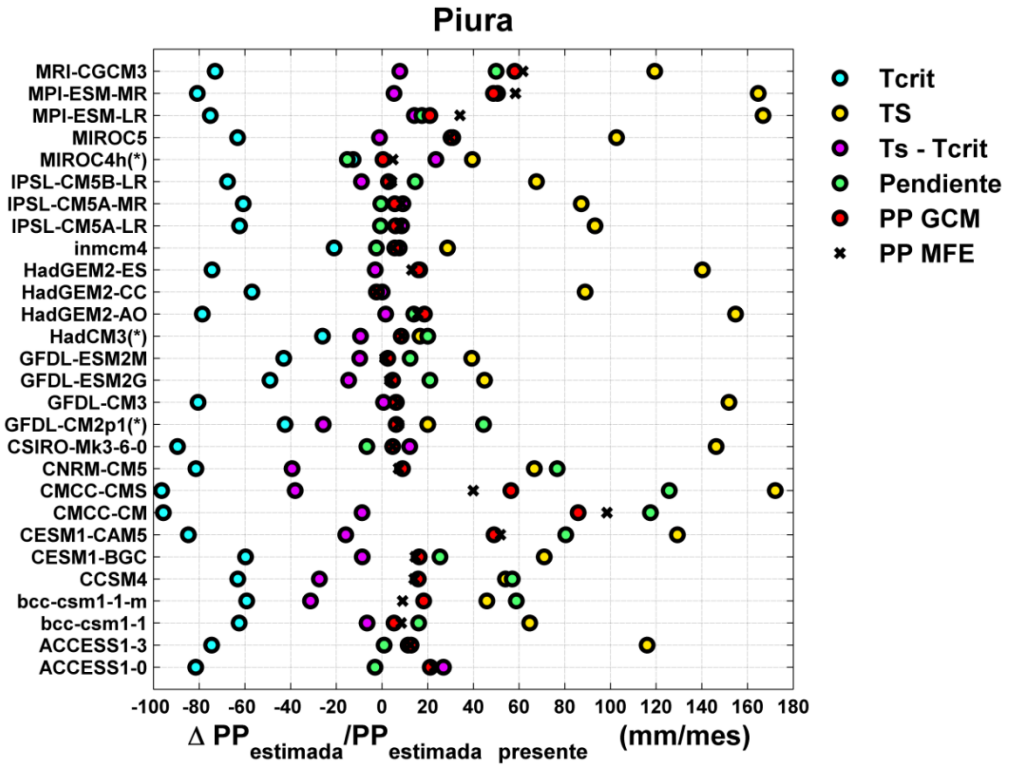


Figura 77: Igual que la Figura 76 pero para Piura.

4.6 Corrección y estimación del cambio de la precipitación promedio.

Para realizar la corrección se usó información observada de TSM, Tcrit y pendiente (“a”), con estos datos se estimó la precipitación estimada con el MFE para el escenario del presente (ecuación 9) y para el escenario del futuro solo se sumaron los cambios (ecuación 10). Los cambios de los parámetros que fueron usados para realizar la estimación de la PP del futuro se muestran en la Figuras 78 y 79 para Tumbes y Piura

respectivamente. Usando información observada se evitaron los errores de subestimación de la Tcrit, sobreestimación de la TSM y subestimación de la pendiente que fueron observados en los GCMs.

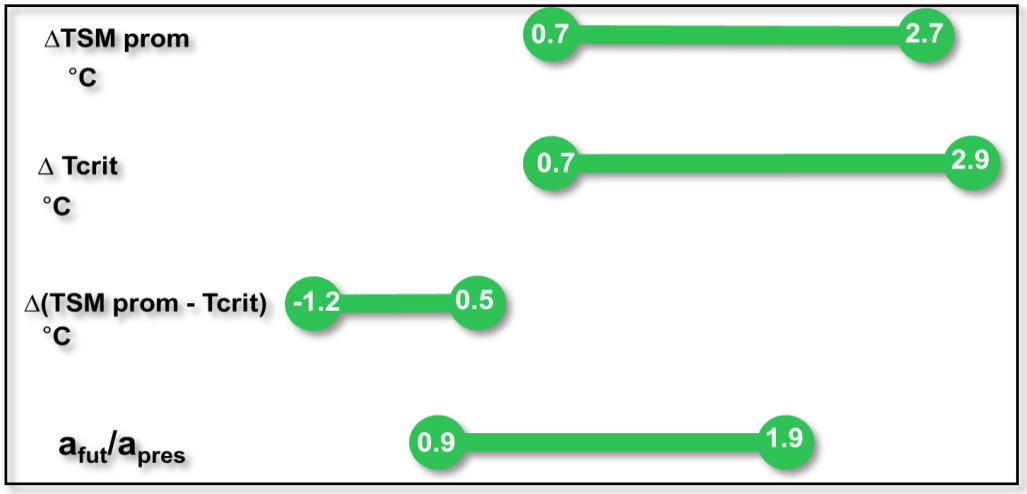


Figura 78: Intervalo de los cambios de los parámetros estimados usando datos de los GCMs, para Tumbes.

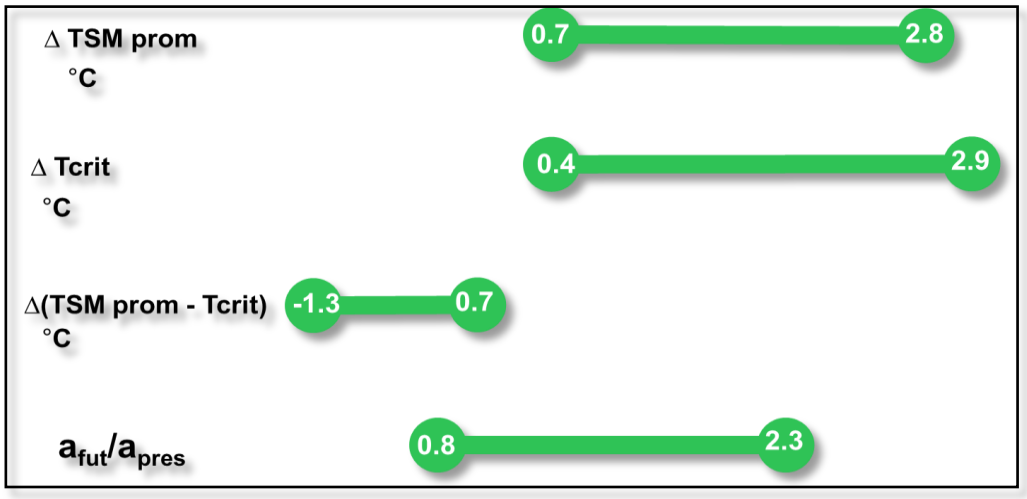


Figura 79: Intervalo de los cambios de los parámetros estimados usando datos de los GCMs, para Piura.

Inicialmente se estimó la PP del futuro manteniendo constante la pendiente observada en El Salto - Tumbes (191.91 mm°C^{-1}) y Piura - CORPAC (197.15 mm°C^{-1}). Bajo este supuesto se asume que la pendiente observada se mantendría constante en el futuro, pero no es así. Los modelos muestran un incremento de la pendiente en el escenario del futuro, como se observa en la Figura 80. La relación de pendientes es de 1 a 1:3 lo que indica un incremento en el futuro. Se contrastaron las dos formas de realizar la corrección, con cambio y sin cambio de pendiente.

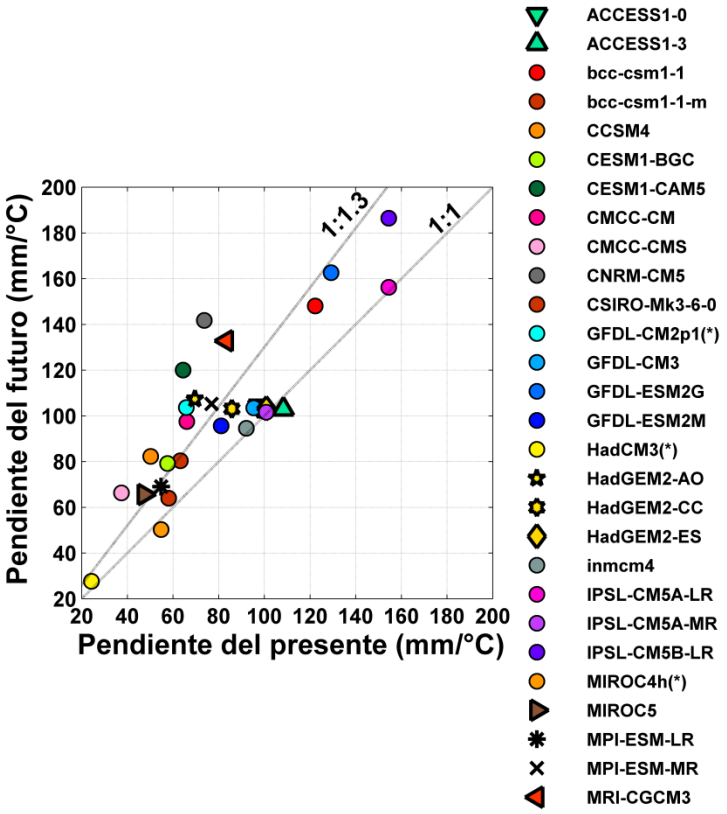


Figura 80: Relación de Pendientes entre el experimento del presente y del futuro.

Además de esta relación y según el análisis de sensibilidad de la pendiente, este es un parámetro que contribuye con un incremento de la PP en la mayoría de los modelos con buen ajuste. Además estaría relacionado con la sensibilidad que tiene la atmosfera para que ocurra precipitación de tipo convectiva cuando la TSM se sobrepasa la Tcrit. Debido a esto se realizó una segunda corrección pero cambiando la pendiente en la ecuación 10.

En la figura 81 se muestra los resultados de la corrección para Tumbes con la pendiente fija y con la pendiente que varía.

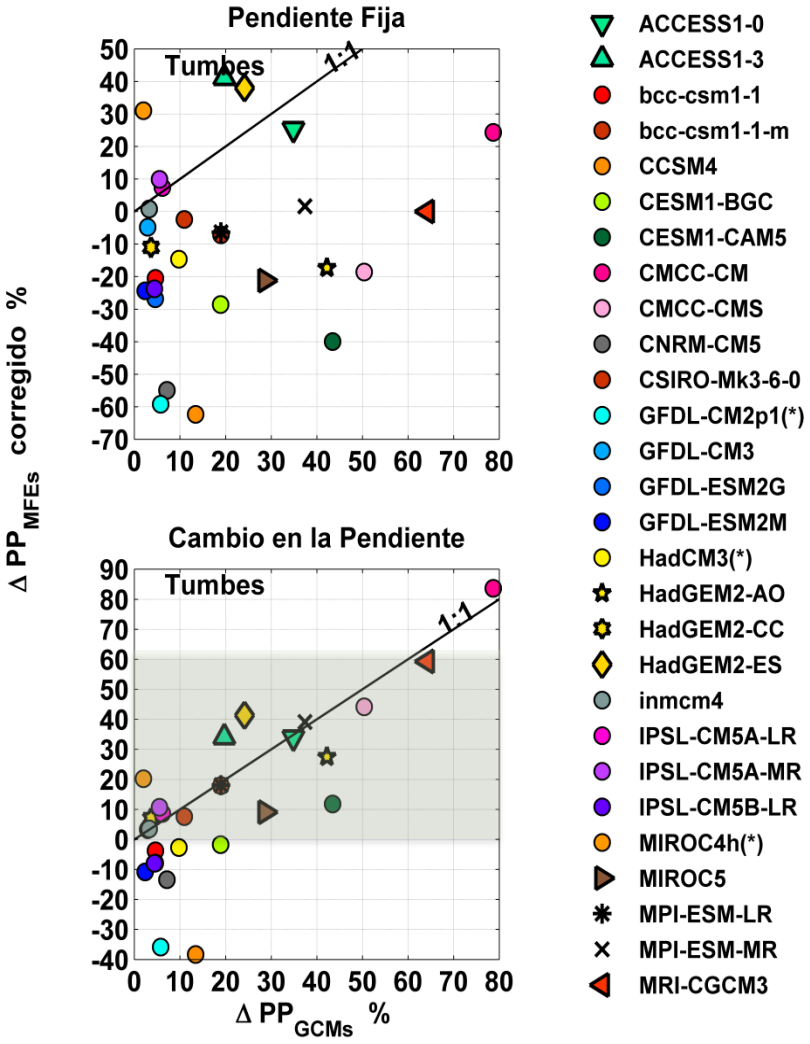


Figura 81: Dispersión entre Cambio de la precipitación de los GCMs versus el cambio estimado de la PP corrigiendo los errores pero manteniendo la pendiente observada constante (arriba) y cambiando la pendiente (abajo). Para Tumbes.

Debido a que se sumaron los cambios ΔTSM, ΔTcrit y se multiplicó $\frac{a_{futuro}}{a_{presente}}$ a la pendiente, la corrección es el resultado de todos estos cambios. Según el análisis de sensibilidad la TSM y Tcrit incrementaba en todos los modelos, pero su efecto combinado dependía de cada modelo, ya que hubo cambios positivos como negativos. Por otro lado el cambio de pendiente solo contribuye con el incremento de PP.

Los cambios de precipitación de los GCMs mostraban incremento en todos los casos, pero haciendo la corrección este consenso de incremento ya no existe (Figura 81). El cuadro 17 resume el cambio de PP para Tumbes, solo en los modelos con buen ajuste con y sin cambio de pendiente.

Cuadro 17: Cambio de PP para Tumbes en modelos con buen ajuste, sin y con cambio de pendiente.

SIN CAMBIO DE PENDIENTE			**CON CAMBIO DE PENDIENTE**		
$\Delta TSMprom < \Delta Tcrit$	$\Delta TSMprom = \Delta Tcrit$	$\Delta TSMprom > \Delta Tcrit$	$\Delta TSMprom < \Delta Tcrit$	$\Delta TSMprom = \Delta Tcrit$	$\Delta TSMprom > \Delta Tcrit$
HadGEM2-AO (↓ΔPP)	MRI-CGCM3 (ΔPP≈0)	ACCESS1-0 (↑ΔPP)	HadGEM2-AO (↑ΔPP)	MRI-CGCM3 (↑ΔPP)	ACCESS1-0 (↑ΔPP)
HadGEM2-CC (↓ΔPP)	MPI-ESM-MR (ΔPP≈0)	ACCESS1-3 (↑ΔPP)	HadGEM2-CC (↑ΔPP)	MPI-ESM-MR (↑ΔPP)	ACCESS1-3 (↑ΔPP)
MIROC5 (↓ΔPP)		HadGEM2-ES (↑ΔPP)	MIROC5 (↑ΔPP)		HadGEM2-ES (↑ΔPP)
MPI-ESM-LR (↓ΔPP)			MPI-ESM-LR (↑ΔPP)		

Del Cuadro 17 se extrae que el cambio de pendiente juega un rol importante en el cambio de PP (los incrementa) en aquellos modelos en los que el cambio de TSM es menor o igual al cambio de Tcrit. Esto significa que si el incremento de TSM no es lo suficientemente alto como para sobrepasar la Tcrit, las condiciones actuales de sequedad se mantendrán y el incremento de la lluvia estará determinado solo por el incremento de la pendiente (atmosfera más sensible a cambios de TSM por encima de la Tcrit).

Por el contario los modelos con buen ajuste en los que los efectos combinados del cambio de TSM y cambio de Tcrit se anulan porque su incremento es parecido, los cambios de PP son casi nulos sin cambio de pendiente o aumenta con un cambio de pendiente. Mientras que si el cambio de TSM es mayor al cambio de Tcrit siempre hay un incremento de lluvia con o sin cambio de pendiente. Pero como se observa en la Figura 81 el cambio de PP es mayor cuando la pendiente no cambia, esto porque en el futuro la pendiente disminuye para estos modelos.

En el caso de Piura la situación es bastante parecida a la de Tumbes en los modelos con buen ajuste, el cambio de PP con cambio de pendiente varía de 0 a +60 por ciento de la precipitación del presente como se ilustra en la Figura 82.

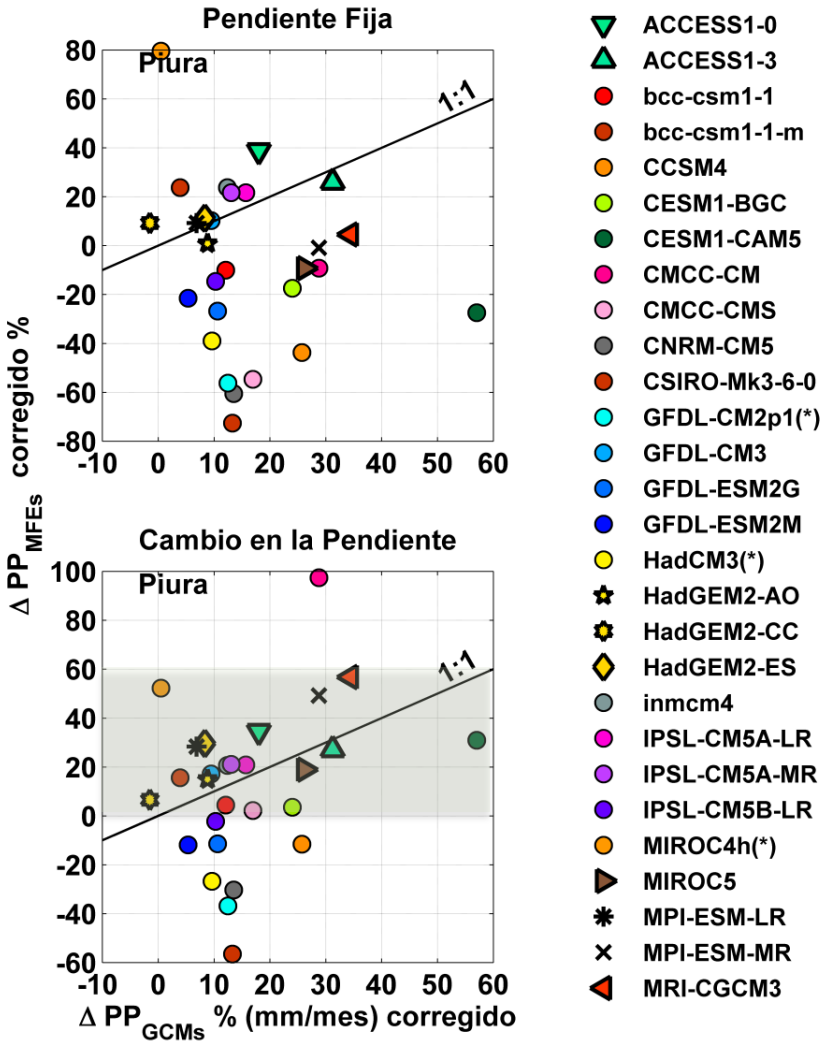


Figura 82: Dispersión entre Cambio de la precipitación de los GCMs versus el cambio estimado de la PP corrigiendo los errores pero manteniendo la pendiente observada constante (arriba) y cambiando la pendiente (abajo). Para Piura.

El Cuadro 18 muestra los resultados del cambio de PP para Piura de los modelos con buen ajuste. Al igual que para Tumbes, el cambio de pendiente juega un rol importante en el cambio de PP (los incrementa) en aquellos modelos en los que el cambio de TSM es menor o igual al cambio de Tcrit. Por el contario en los modelos en los que los efectos combinados del cambio de TSM y cambio de Tcrit se los cambios de PP son casi nulos sin cambio de pendiente o aumenta con un cambio de pendiente. Finalmente si el cambio de TSM es mayor al cambio de Tcrit siempre hay un incremento de lluvia con o sin

cambio de pendiente. Pero si la pendiente disminuye en el futuro el cambio de PP es menor al cambio de PP estimado sin cambio de pendiente.

Cuadro 18: Cambio de PP para Piura en modelos con buen ajuste, sin y con cambio de pendiente.

SIN CAMBIO DE PENDIENTE			**CON CAMBIO DE PENDIENTE**		
ΔTSMprom < ΔTcrit	**ΔTSMprom = ΔTcrit**	**ΔTSMprom > ΔTcrit**	**ΔTSMprom < ΔTcrit**	**ΔTSMprom = ΔTcrit**	**ΔTSMprom > ΔTcrit**
MIROC5 (↓ΔPP)	MPI-ESM-MR (ΔPP≈0)	ACCESS1-0 (↑ΔPP)	MIROC5 (↑ΔPP)	MPI-ESM-MR (↑ΔPP)	ACCESS1-0 (↑ΔPP)
	HadGEM2-AO (ΔPP≈0)	ACCESS1-3 (↑ΔPP)		HadGEM2-AO (↑ΔPP)	ACCESS1-3 (↑ΔPP)
		HadGEM2-ES (↑ΔPP)			HadGEM2-ES (↑ΔPP)
		HadGEM2-CC (↑ΔPP)			HadGEM2-CC (↑ΔPP)
		MPI-ESM-LR (↑ΔPP)			MPI-ESM-LR (↑ΔPP)
		MRI-CGCM3 (↑ΔPP)			MRI-CGCM3 (↑ΔPP)

El cuadro 19 muestra el resultado del cambio de PP con y sin cambio de pendiente para los 28 modelos. De los modelos con buen ajuste (negrita) se extrajo que el incremento de la PP varía desde 0 hasta +60 por ciento de la precipitación del presente en Tumbes y Piura.

El promedio de PP observado desde 1968 hasta 2005 es 37mm mes-1 para El Salto y 14mm mes-1 para Piura. Según los resultados finales, el cambio de PP podría incrementar desde cero hasta un máximo de 22mm mes-1 en la estación de El Salto y desde cero hasta 8mm mes-1 en la estación de Piura. Con esto la PP promedio en los últimos 50 años del siglo XXI sería 60mm mes-1 en el Salto y 22mm mes-1 en Piura.

Estos cambios de PP estimados para el futuro no se comparan con eventos El Niño extraordinarios. Por ejemplo la lluvia de un día (12/04/1998) en promedio fue 200mm día^{-1} en la estación de El Salto en Tumbes.

La PP se ve limitada en el futuro debido a que el cambio de Tcrit y la TSM es muy similar. Esto nos da información de que en el futuro y cerca de la costa norte del Perú la estabilidad atmosférica sería aún dominante pese a un incremento de TSM.

Cuadro 19 : Resultados de la corrección de la precipitación con y sin cambio de la pendiente.

		PIURA					TUMBES				
		Cambio de Parámetros			ΔPP		Cambio de Parámetros			ΔPP	
N°	Modelos	ΔTSM	ΔTcrit	a'/a	"a" obs	a(obs).a'/a	ΔTSM	ΔTcrit	a'/a	"a" obs	a(obs).a'/a
1	**ACCESS1-0**	**2.27**	**1.9**	**0.97**	**4.15**	**3.7**	**2.19**	**1.9**	**1.07**	**6.75**	**9.05**
2	**ACCESS1-3**	**2.16**	**1.9**	**1.01**	**2.78**	**2.91**	**2.15**	**1.7**	**0.95**	**10.98**	**9.09**
3	bcc-csm1-1	1.28	1.4	1.16	-1.08	0.47	1.32	1.6	1.21	-5.48	-1.01
4	bcc-csm1-1-m	1.49	2.8	1.59	-7.79	-6.07	1.51	1.6	1.27	-1.91	4.79
5	CCSM4	1.23	1.9	1.57	-4.69	-1.24	1.09	2.3	1.64	-16.65	-10.23
6	CESM1-BGC	1.28	1.5	1.25	-1.87	0.38	1.09	1.5	1.38	-7.63	-0.47
7	CESM1-CAM5	2.53	2.9	1.8	-2.94	3.31	2.27	2.9	1.86	-10.67	3.15
8	CMCC-CM	2.39	2.5	2.18	-0.99	10.45	2.08	1.8	1.48	6.5	22.32
9	CMCC-CMS	2.02	2.9	2.26	-5.87	0.24	1.95	2.2	1.77	-4.97	11.8
10	CNRM-CM5	1.5	2.5	1.77	-6.49	-3.25	1.41	2.4	1.92	-14.68	-3.58
11	CSIRO-Mk3-6-0	2.74	2.5	0.93	2.55	1.67	2.67	2.7	1.1	-0.64	2.02
12	GFDL-CM2p1(*)	0.69	1.6	1.44	-6.04	-3.95	0.69	1.8	1.57	-15.82	-9.57
13	GFDL-CM3	2.81	2.7	1.06	1.1	1.84	2.64	2.7	1.09	-1.28	0.88
14	GFDL-ESM2G	1.04	1.4	1.21	-2.88	-1.23	1.12	1.5	1.26	-7.15	-2.1
15	GFDL-ESM2M	1.12	1.4	1.12	-2.31	-1.28	1.16	1.5	1.18	-6.51	-2.89
16	HadCM3(*)	1.02	1.6	1.2	-4.18	-2.87	1.01	1.2	1.14	-3.91	-0.73
17	**HadGEM2-AO**	**2.01**	**2**	**1.14**	**0.1**	**1.6**	**2.07**	**2.3**	**1.54**	**-4.62**	**7.33**
18	**HadGEM2-CC**	**1.7**	**1.6**	**0.98**	**0.99**	**0.7**	**1.76**	**1.9**	**1.2**	**-2.94**	**1.84**
19	**HadGEM2-ES**	**2.12**	**2**	**1.17**	**1.21**	**3.18**	**2.12**	**1.7**	**1.02**	**10.15**	**11.03**
20	inmcm4	0.94	0.7	0.97	2.55	2.21	0.81	0.8	1.03	0.21	0.92
21	IPSL-CM5A-LR	1.92	1.7	0.99	2.32	2.23	1.89	1.8	1.01	1.98	2.31
22	IPSL-CM5A-MR	1.92	1.7	1	2.32	2.26	1.92	1.8	1.01	2.65	2.86
23	IPSL-CM5B-LR	1.42	1.6	1.15	-1.57	-0.24	1.37	1.7	1.21	-6.34	-2.13
24	MIROC4h(*)	1.08	0.4	0.85	8.53	5.61	1.05	0.7	0.92	8.29	5.39
25	**MIROC5**	**1.89**	**2**	**1.31**	**-0.99**	**2.03**	**1.91**	**2.2**	**1.38**	**-5.66**	**2.43**
26	**MPI-ESM-LR**	**1.6**	**1.5**	**1.17**	**0.99**	**3.04**	**1.62**	**1.7**	**1.26**	**-1.7**	**4.81**
27	**MPI-ESM-MR**	**1.79**	**1.8**	**1.51**	**-0.1**	**5.28**	**1.72**	**1.7**	**1.37**	**0.43**	**10.44**
28	**MRI-CGCM3**	**1.55**	**1.5**	**1.5**	**0.49**	**6.09**	**1.5**	**1.5**	**1.59**	**0**	**15.82**

Una vez que se obtuvo el resultado final de esta tesis, estimar el cambio de PP promedio, se comparó con los resultados de los GCMs. El cambio de precipitación estimada con el MFE y sin errores de los GCMs varia de 0 a 60 por ciento, mientras que en los GCMs varía de 0 a 80 porciento. Si se observan estas cifras en valores absolutos, no porcentaje, se ve la gran diferencia entre el resultado estimado y el del propio GCMs. Si se comparan estos valores absolutos con sus porcentajes se observa lo siguiente, en valores absolutos el cambio de precipitación de los GCMs es mucho mayor al cambio de PP promedio estimado con el MFE. Las figuras 83 y 84 muestran los cambios de PP para todos los GCMs y el cambio de PP

estimado con el MFE también para todos los modelos. Además se muestran los cambios de PP de los GCMs con buen ajuste y los estimados con el MFE para estos mismos modelos. Se muestran estos cambios porcentualmente y en valores absolutos. Si se observa el cambio porcentual (Figura 84) de solo los GCMs con buen ajuste y los estimados con el MFE para estos mismos modelos, se puede notar que el cambio de PP es muy parecido (60 versus 65 por ciento).

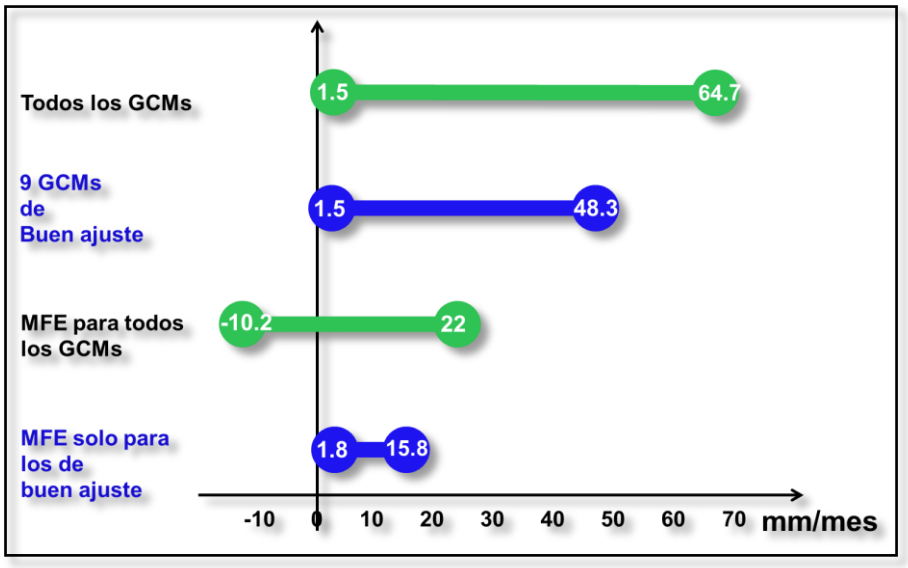


Figura 83: Cambio de PP (mm/mes) en Tumbes.

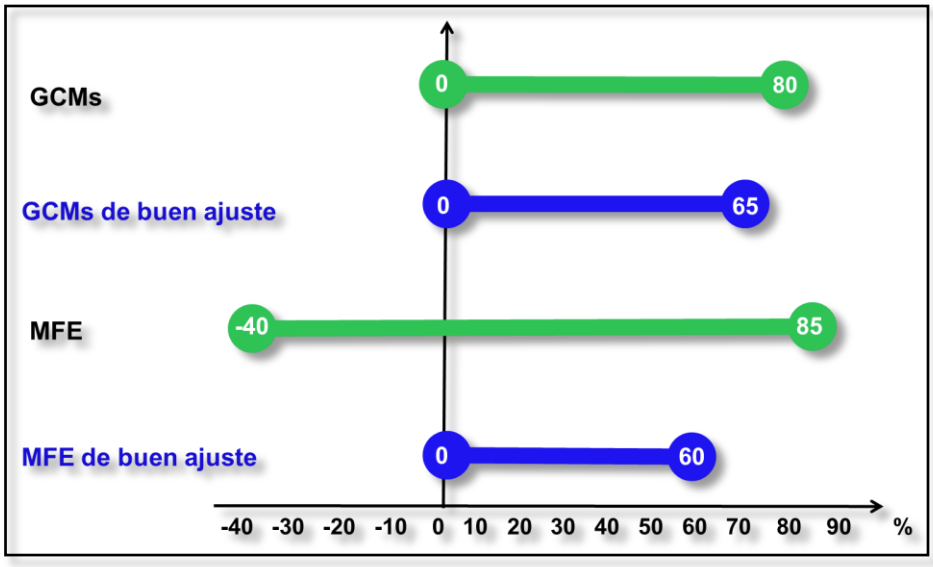


Figura 84: Cambio de PP (%) en Tumbes.

El hecho de que el cambio de PP del MFE y de los GCMs sean parecidos es importante, esto nos da un indicio de que la PP de los GMCs responden a mecanismos parecidos a los que responde la PP del MFE, por lo menos en algún grado. Es importante decir que a pesar de que los cambios porcentuales sean parecidos, los cambio absolutos no los son. Se observa en la Figura 84 que el cambio absoluto de PP para los modelos con buen ajuste varía de 1.5 hasta 48.3 par a los GCMs, mientras que el cambio de PP estimado con el MFE para estos mismos modelos con buen ajuste varía de 1.8 a 15.8 mm/mes. En este segundo caso, los cambio de PP es muy diferente.

Otra característica que se observa en la PP estimada con el MFE para todos los modelos es que esta presenta un rango aún mayor. En Tumbes varía de -40 a 85 por ciento (-10.2 a 22 mm/mes), los cambios negativos de PP estarían dados por aquellos modelos con relativo ajuste.

Las Figuras 85 y 86 muestran los resultados para Piura, y representan lo mismo que las dos figuras anteriores. Se observa el mismo resultado, que el cambio de PP de los GCM y del MFE para los modelo con buen ajuste son muy parecidos porcentualmente, pero son diferentes en valores absolutos. Además, el cambio de PP negativo sigue dado por los mismos modelos de relativo ajuste que en Tumbes.

El hecho de que el cambio de PP estimado con el MFE y los cambios de PP de los propios GCMs para los modelos con buen ajuste sean parecidos, hace notar que el modelo MFE que tiene solo dos parámetros es capaz de reproducir los cambios de PP de los GCMs que son mucho más complejos. La ventaja del MFE es que se conoce a qué responde la PP, en los GCMs no se conoce exactamente.

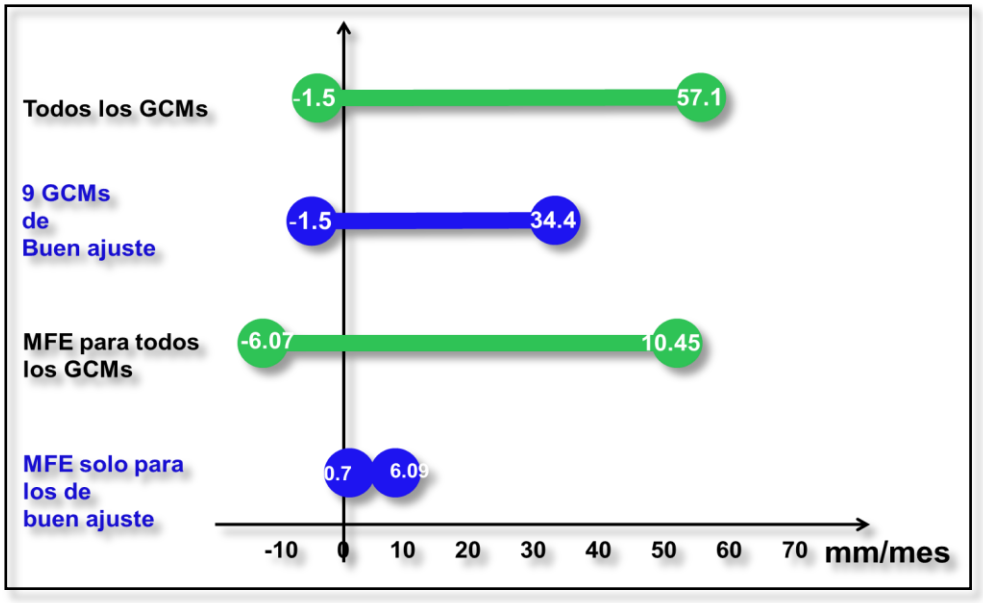


Figura 85: Cambio de PP (mm/mes) en Piura.

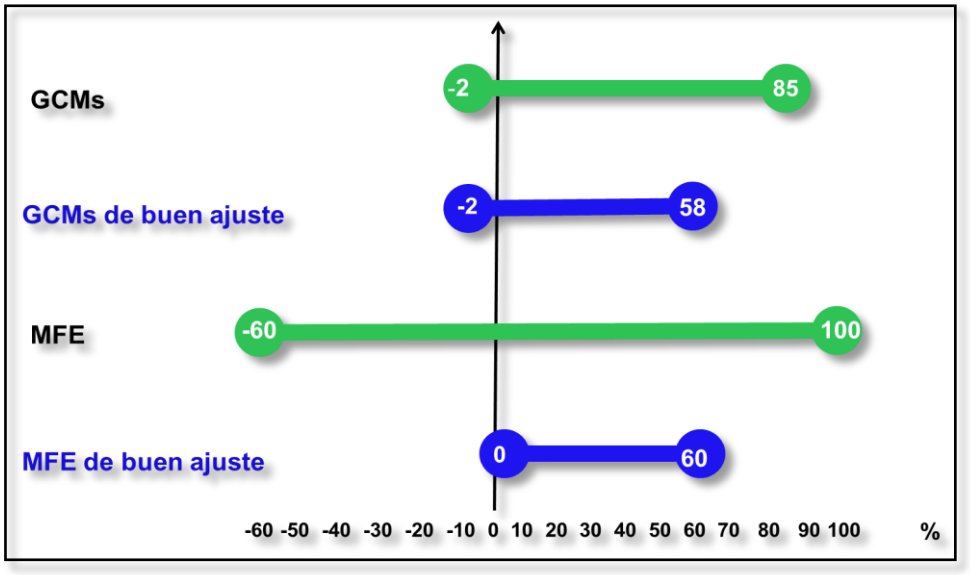


Figura 86: Cambio de PP (%) en Piura.

4.7 Efecto del ΔTSM en el ΔPrecipitación

Para conocer cuál es el efecto del cambio de TSM en la precipitación local se estimó el cambio de la PP porcentual. Se realizó una diferencia de la PP promedio global entre los escenarios del presente (1968 - 2005) y futuro (2050 - 2100) con respecto al presente. Se usaron solo los 28 GCMs denominados de buen y relativo ajuste.

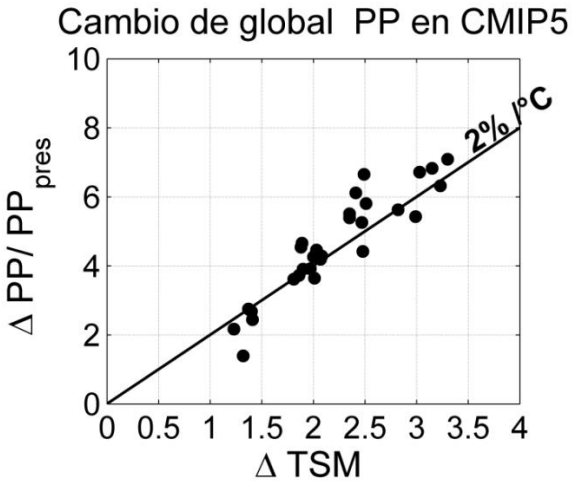


Figura 87: Cambio absoluto de la PP promedio global por grado de calentamiento global.

Existe un acuerdo entre los GCMs usados en esta investigación, según la ecuación de Clausius-Clapeyron el incremento de humedad específica por grado de calentamiento tiene una razón de $7\%C^{-1}$, mientras que el cambio de PP más bien es de casi $2\%C^{-1}$, como se observa en la Figura 87.

Por otro lado, la intensidad de las lluvias locales, a diferencia de la precipitación global media, probablemente aumente en un $7\%°C^{-1}$ (Vecchi 2006; White 2013). Para conocer si efectivamente este es el incremento local de PP en la costa norte del Perú, se ha calculado la razón de cambio de la precipitación local o regional en Tumbes y Piura con el cambio de TSM en las grillas 4°S 82°W y 6°S 82°W respectivamente, solo para los modelos con buen ajuste que han sido corregidos previamente. La Figura 88(a y c) muestra estos resultados.

No existe un consenso en el cambio de PP local entre los modelos con buen ajuste; se creyó que podría estar relacionado con el $7\%C^{-1}$ que ha sido proyectado para el cambio regional. Sin

embargo, el rango de cambio de PP varía de 2%C^{-1} hasta 37%C^{-1} por cambio de TSM que varía de 1.5 hasta 2.5, solo para los modelos con buen ajuste.

Del análisis de sensibilidad, la pendiente es un parámetro que influye en el incremento de la PP en la mayoría de modelos. Se creyó que este incremento de PP, si bien, no es 7%C^{-1}, podría estar relacionado con el cambio porcentual de la pendiente. Pero, como lo ilustra la Figura 51 (b y d) el cambio porcentual de la pendiente también varía (-2.5%C^{-1} hasta un 20%C^{-1}). Los modelos ACCESS1-0 y ACCESS1-3 incrementan su PP de 30 a 40%, pero disminuyen su pendiente.

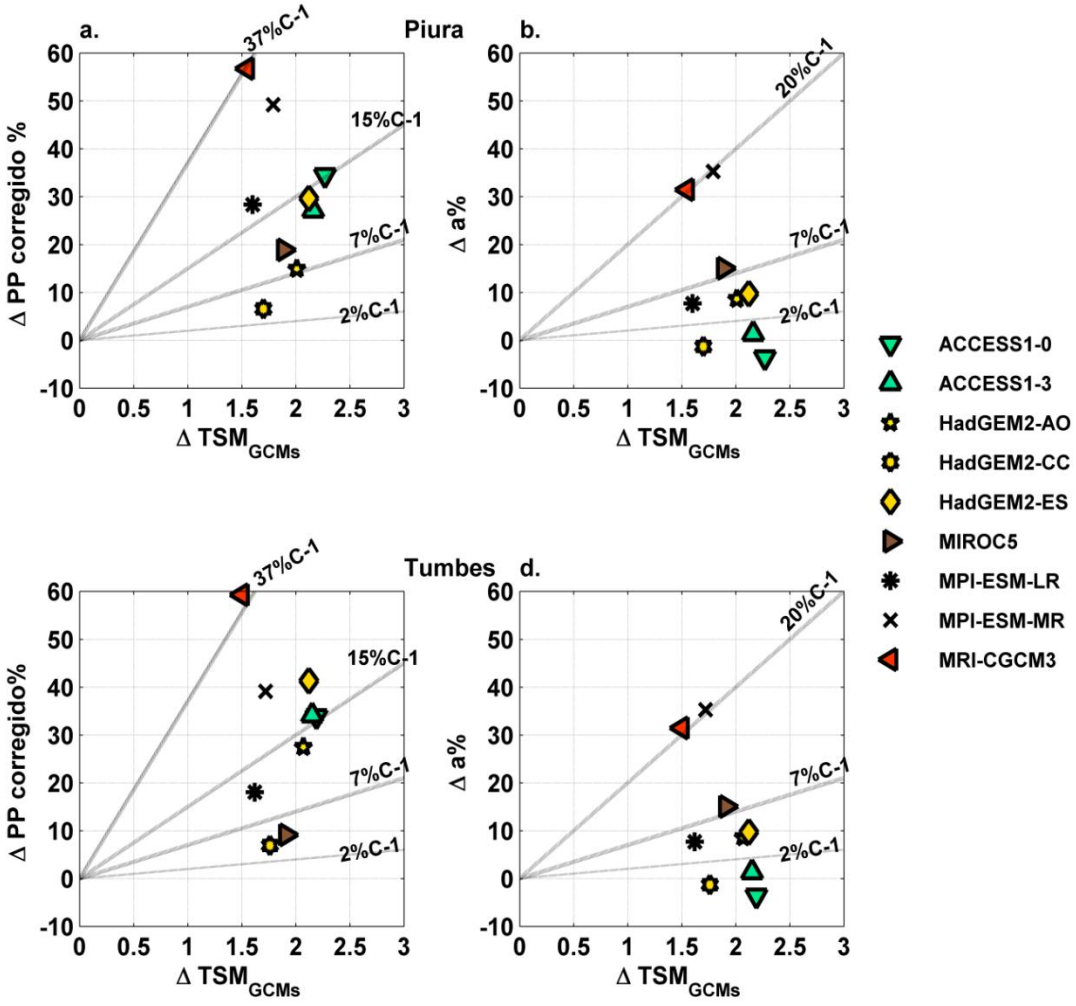


Figura 88: Gráfico de dispersión entre el cambio porcentual de la PP local en Tumbes (a) y Piura (b) con el cambio de TSM. Además en c y d se muestra el cambio porcentual de la pendiente por grado de calentamiento. Solo para modelos con buen ajuste.

Con este trabajo de investigación se ha podido realizar la estimación del cambio de precipitación asumiendo un cambio de TSM debido a un incremento de GEI en la atmosfera. Sin embargo, para determinar con mayor exactitud cuáles son las causas de este cambio de precipitación y si están afectadas por el cambio espacial de la TSM, vientos, y/u otras variables en los trópicos, es necesario realizar un análisis más detallado de estas.

V. CONCLUSIONES

De acuerdo a los objetivos planteados se concluye:

- ✓ Estimar los parámetros de la ecuación del MFE, TSM umbral y pendiente haciendo uso de datos observados.

    1. Los parámetros estimados en datos observados caracterizan la precipitación de Tumbes y Piura. La baja TSM promedio y la alta Tcrit caracteriza su gran estabilidad. La pendiente es alta, esto explica por qué la precipitación es intensa una vez que la TSM sobrepasa la Tcrit.

- ✓ Estimar los parámetros de la ecuación del MFE, TSM umbral y pendiente haciendo uso de datos de GCMs para el escenario del presente.

    1. Solo diecinueve GCMs representan la relación no lineal entre PP y TSM cualitativamente a la observada, de estos solo nueve presentan buen ajuste visual además altas correlaciones mensuales, promedio DEF y promedio anual mayores a 0.5.

    2. La precipitación promedio estimada con el MFE tiene gran correlación (r >0.9) con la precipitación promedio de los GCMs en el escenario del presente, llegando incluso a estar la relación 1:1.

    3. El 80 por ciento de modelos la subestima la Tcrit en casi 3°C.

4. La diferencia de TSM y Tcrit observada es -3°C en Tumbes y - 4°C en Piura, sin embargo los GCMs muestran diferencias que varían de -1°C a +6°C en ambos lugares. Los GCMs del escenario del presente y con buen ajuste muestran diferencias negativas aunque ligeras y varían de -1.2°C a +2°C.

5. A pesar de los GCMs subestiman la pendiente, y la TSM de los modelos es mayor a la Tcrit los GCMs sobreestiman la precipitación.

- ✓ Estimar los parámetros de la ecuaci , TSM umbral y pendiente haciendo uso de datos de GCMs para el escenario del futuro.

    1. En el experimento del futuro los GCMs muestran incremento de TSM en todos los modelos llegando a 2°C en promedio. La Tcrit también experimenta un incremento en casi la misma magnitud. Esta Tcrit responde al incremento de la temperatura de la troposfera, es decir también incrementa.

    2. El 60 por ciento de modelos muestran que el cambio de TSM menos Tcrit varía de -1.5 a 0.7. Lo que indica que la Tcrit incrementa ligeramente más a la TSM. Los modelos con buen ajuste presentan diferencias positivas, mayores a 0°C lo que indica que el incremento de TSM y Tcrit es casi en la misma magnitud lo que no daría cambio en la PP o que la TSM experimenta un cambio mayor a la Tcrit, lo que incrementaría la PP.

- ✓ Estimar el cambio (diferencia del futuro y presente) de los parámetros del MFE, la TSM promedio usando los resultados obtenidos en los objetivos anteriores.
    1. En la mayoría de GCMs la TSM prom, la Tcrit y la pendiente incrementan en el futuro.
    2. Para encontrar cual es el parámetro que más influye en el cambio de PP se realizó el análisis de sensibilidad.

        - Según el análisis de sensibilidad el factor que más contribuye con el incremento de la precipitación es el incremento de pendiente. Si la

TSM y Tcrit incrementan en la misma magnitud entonces el incremento de la pendiente es lo único que incrementa la precipitación en el futuro.

- Según el análisis de sensibilidad el factor que más contribuye con la disminución de la de la precipitación es que la diferencia de (TSM – Tcrit) se incrementa en el futuro y se hace más negativa.

✓ Utilizando los cambios de los parámetros del MFE proyectados por los GCMs, estimar el cambio de PP agregándolos al MFE observacional.

1. Corrigiendo los errores de los GCMs y considerando solo los modelos con buen ajuste, con el cambio climático el cambio de precipitación para Tumbes y Piura varía de 0 a +60 por ciento su precipitación promedio en el presente.

2. Los modelos con buen ajuste muestran un incremento de TSM que varía de 1.5 hasta 2.5 lo que resulta en un cambio de PP promedio (2050 - 2100) corregida por grado de calentamiento varía desde $2\%C^{-1}$ hasta $37\%C^{-1.}$

VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda:

- Debido a que no se conoce cuál sería la variable relacionada directamente con la pendiente, se recomienda entender los procesos asociados a esta. Evaluar la relación entre cambio de pendiente con el cambio de variables atmosféricas.

- Evaluar la relación entre los cambios de la Tcrit con cambios de la TSM en lugares remotos (Pacifico central) y la atmosfera tropical.

- Comprobar si los resultados obtenidos con el MFE son parecidos a los resultados de un Modelo Regional (Sugerencia usar datos de CORDEX o quizá un modelo regional como el ROMS).

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. Hense, P. Krahe, and H. Flohn, "Meteorology, and Atmospheric Physics 9," vol. 227, pp. 215–227, 1988.

A. K. Betts, "The Parameterization of Deep Convection and the Betts-Miller scheme, " 2004.

A. Kitoh and O. Arakawa, "On overestimation of tropical precipitation by an atmospheric GCM with prescribed SST," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 26, no. 19, pp. 2965–2968, Oct. 1999.

A. Mathematics, "Tropical Tropospheric Temperature Variations Caused by ENSO and Their Influence on the Remote Tropical Climate *," pp. 2616–2631, 2002.

Bakun, "Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling," *Science*, vol. 247, no. 4939, pp. 198–201, Jan. 1990.), 198–201. doi:10.1126/science.247.4939.198

Woodman C. E. Chung and V. Ramanathan, "Relationship between trends in land precipitation and tropical SST gradient," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 34, no. 16, p. n/a–n/a, Aug. 2007.

C. Wang, L. Zhang, S. Lee, L. Wu, and C. R. Mechoso, "A global perspective on CMIP5 climate model biases," vol. 4, no. February, pp.201–205, 2014.

Cai, W., Borlace, S., Lengaigne, M., van Rensch, P., Collins, M., Vecchi, G. … Jin, F.-F. (2014). Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. Nature Climate Change, 5(1), 1–6. doi:10.1038/nclimate2100

Chadwick, R., Boutle, I., & Martin, G. (2013). Spatial Patterns of Precipitation Change in CMIP5: Why the Rich Do Not Get Richer in the Tropics. Journal of Climate, 26(11), 3803–3822. doi:10.1175/JCLI-D-12-00543.1

Chen, L., Yu, Y., & Sun, D.-Z. (2013). Cloud and Water Vapor Feedbacks to the El Niño Warming: Are They Still Biased in CMIP5 Models? Journal of Climate, 26(14), 4947–4961. doi:10.1175/JCLI-D-12-00575.1

Chou,C., and C.-A. Chen, 2010: Depth of convection and the weakening of tropical circulation in global warming. J. Climate, 23, 3019–3030.

D. Garreaud, "Interannual Precipitation Variability (UdW data) Which regions exhibit large year-to-year variability ?," 2012.

D. Gutiérrez, A. Bertrand, C. Wosnitza-mendo, B. Dewitte, S. Purca, C. Peña, A. Chaigneau, M. Graco, V. Echevin, C. Grados, R. Guevara-carrasco, C. De Recherche, and H. Méditerranéenne, "Sensibilidad del sistema de afloramiento costero del Perú al cambio climático e implicancias ecológicas Sensitivity of the Peruvian upwelling system to climate change and ecological implications," vol. 24, no. 3, pp. 1–24, 2011.

Donner, L. (GFDL). Breaking Down Clouds and Convection.

Douglas, M. W., Pena, M., Ordinola, N., Flores, L., Boustead, J., and Santos, J. L.: Synoptic and spatial variability of the rainfall along the northern Peruvian coast during the 1997-8 El Nino event. Proceedings of the Sixth International Conference on Southern Hemisphere Meteorology, Santiago, Chile, 104–105, 2000.

Derbyshire, S. H., I. Beau, P. Bechtold, J.-Y. Grandpeix, J.-M. Pirou, J.-L. Redelsperger, and P. Soares (2004), Sensitivity of moist convection to environmental humidity, Q. J. R. Meteorol. Soc., 130, 3055–3079.

Echevin, V., Goubanova, K., Belmadani, A. & Dewitte, B. (2011). Sensitivity of the Humboldt Current system to global warming: a downscaling experiment of the IPSL-CM4 model.

Falvey, M. & Garreaud, R. D. (2009). Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of south tropical South

America (1979-2006). Journal of Geophysical Research, 114: D04102. Doi:10.1029/2008JD010519.

G. A. Vecchi, B. J. Soden, A. T. Wittenberg, I. M. Held, A. Leetmaa, and M. J. Harrison, "Weakening of tropical Pacific atmospheric circulation due to anthropogenic forcing," vol. 441, no. May, pp. 73–76, 2006.

Goldberg, R. A., Tisnado, G., and Scofield, R. A.: Characteristics of extreme rainfall events in north-western Peru during the 1982– 1983 El Nino period, J. Geophys. Res., 92, C14, 14 225–14 241, 1987.

Goubanova, K., Echevin, V., Dewitte, B., Codron, F., Takahashi, K., Terray, P., & Vrac, M. (2011). Statistical downscaling of sea-surface wind over the Peru-Chile upwelling region: diagnosing the impact of climate change from the IPSL-CM4 model. Climate Dynamics, 36(7-8), 1365–1378. doi:10.1007/s00382-010-0824-0

Graham, N. E., & Barnetr, T. P. (2013). Sea Surface Temperature, Surface Wind Divergence, 238(4827), 657–659.

Guilyardi, E., Bellenger, H., Collins, M., Ferrett, S., Cai, W., & Wittenberg, A. (2012). A first look at ENSO in CMIP5, 17(58), 29–32.

Held, I., & Soden, B. (2006). Robust responses of the hydrological cycle to global warming. Journal of Climate, 5686–5699. Retrieved from http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JCLI3990.1

Held, I. M., and A. Y. Hou, 1980: Nonlinear axially symmetric cir- culations in a nearly inviscid atmosphere. J. Atmos. Sci., 37, 515–533

Hole, W.(2004). THE EPIC 2001 STRATOCUMULUS STUDY, (July), 967–977. doi:10.1175/BAMS-85-7-967

Horel, J. D. and Cornejo-Garrido, A. G.: Convection along the coast of northern Peru during 1983: Spatial and temporal variation of clouds and rainfall, Mon. Wea. Rev., 114, 2091–2105, 1986.

Hwang, Y.,y Frierson, D. (n.d.). A New Look at the Double ITCZ Problem : Connections to Cloud Bias over Southern Ocean.

Ingram, M. R. (2012). Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. Nature.

IPCC, 2013: "Resumen para responsables de políticas. En: Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático" [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M.

IPCC, 2013: Annex III: Glossary [Planton, S. (ed.)]. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Thomas Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

K. J. Hill, a. S. Taschetto, and M. H. England, "Sensitivity of South American summer rainfall to tropical Pacific Ocean SST anomalies," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 38, no. 1, p. n/a–n/a, Jan. 2011.

K. Takahashi, "Annales Geophysicae The atmospheric circulation associated with extreme rainfall events ˜ events in Piura , Peru , during the 1997 — 1998 and 2002 El Ni no," no. January 1998, pp. 3917–3926, 2004.

K. Takahashi, D. Ph, and I. Geofísico, "Local and remote ENSO effects on seasonal rainfall on the northern coast of Peru and implications for climate change El Niño rainfall anomaly : March 1998," 2010.

K. Takahashi, D. Ph, and I. Geofísico del Perú. Cambio Climático en la Cuenca del Río Mantaro. Lima. (2010).

K. Takahashi, Ph, D., & Geofísico, I. (2010). Local and remote ENSO effects on seasonal rainfall on the northern coast of Peru and implications for climate change El Niño rainfall anomaly : March 1998. Symposium of Meteorology,UNALM.

Klein, S. A., 1997: Synoptic variability of low-cloud properties and meteorological parameters in the subtropical trade wind boundary layer. J. Climate, 10, 2018–2039. ——, and D. L. Hartmann, 1993: The seasonal cycle of low stratiform clouds. J. Climate, 6, 1587–1606.

Knutson, T. R., & Syuro Manabe. (1995). Time Mean Response over the Tropical Pacific to Increased CO2 in a Coupled Ocean-Atmosphere model. Journal Climate, 2181-2199.

Knutson, T. R., Zeng, F., & Wittenberg, A. T. (2013). Multi-Model Assessment of Regional Surface Temperature Trends : CMIP3 and CMIP5 20 th Century Simulations, 1–50.

Knutti, R., Masson, D., & Gettelman, A. (2013). Climate model genealogy : Generation CMIP5 and how we got there, 40(February), 1–6. doi:10.1002/grl.50256

L. Chen, Y. Yu, and D.-Z. Sun, "Cloud and Water Vapor Feedbacks to the El Niño Warming: Are They Still Biased in CMIP5 Models?," *J. Clim.*, vol. 26, no. 14, pp. 4947–4961, Jul. 2013.

L. Pineda, V. Ntegeka, and P. Willems, "Rainfall variability related to sea surface temperature anomalies in a Pacific–Andean basin into Ecuador and Peru," *Adv. Geosci.*, vol. 33, pp. 53–62, Apr. 2013.

Lin, J.-L. (2007).The Double-ITCZ Problem in IPCC AR4 Coupled GCMs: Ocean–Atmosphere Feedback Analysis. Journal of Climate, 20(18), 4497–4525. doi:10.1175/JCLI4272.1

Liu, H., Zhang, M., & Lin, W. (2012). An Investigation of the Initial Development of the Double-ITCZ Warm SST Biases in the CCSM. Journal of Climate, 25(1), 140–155. doi:10.1175/2011JCLI4001.1

Li, J., S.-P. Xie, E. R. Cook, G. Huang, R. D'Arrigo, F. Liu, J. Ma, and X.-T. Zheng, 2011: Interdecadal modulation of El Nin˜o amplitude during the pastmillennium. Nat. Climate Change, 1, 114–118.

Lindzen, R. S., and S. Nigam, 1987: On the role of sea surface temperature gradients in forcing low-level winds and conver- gence in the tropics. J. Atmos. Sci., 44, 2418–2436.

M. Falvey and R. D. Garreaud, "Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006)," *J. Geophys. Res.*, vol. 114, no. D4, p. D04102, Feb. 2009.

M. W. Douglas, J. Mejia, N. Ordinola, and J. Boustead, "Synoptic Variability of Rainfall and Cloudiness along the Coasts of Northern Peru and Ecuador during the 1997/98 El Niño Event," *Mon. Weather Rev.*, vol. 137, no. 1, pp. 116–136, Jan. 2009.

Mechoso, C. R., and Coauthors, 1995: The seasonal cycle over the tropical Pacific in coupled ocean–atmosphere general circulation models. Mon. Wea. Rev., 123, 2825–2838.

J.-Y. Yu, W. T. Liu, and C. R. Mechoso, "An SST anomaly dipole in the northern subtropical Pacific and its relationships with ENSO," Geophys. Res. Lett., vol. 27, no. 13, pp. 1931–1934, Jul. 2000.

Meehl G et al 2007 Global climate projections Climate Change : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Cambridge: Cambridge University Press) pp 747–845.

Moss, R. H. et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature 463, 747–756 (2010).

Philander, D. Gu, D. Halpern, G. Lambert, N.-C. Lau, T. Li, and R. C. Pacanowski, 1996: Why the ITCZ is mostly north of the equa- tor. J. Climate, 9, 2958–2972.

Thomas D. Potter and Badley R. Colman, 2003. Handbook of Weather, Climate, and Water : Atmospheric Chemistry, Hydrology, and Societal Impacts.

Power, S., Delage, F., Chung, C., Kociuba, G., & Keay, K. (2013). Robust twenty-first-century projections of El Niño and related precipitation variability. Nature, 502(7472), 541–5. doi:10.1038/nature12580

Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison. s.f. http://www-pcmdi.llnl.gov/ (último acceso: enero de 2013).Earth System Grid Federation (ESGF) . s.f. http://pcmdi9.llnl.gov (último acceso: enero de 2013).

Prohaska, F. J.: New evidence on the climatic controls along the Peruvian coast, in "Coastal deserts – Their natural and human environments", edited by: Amiran, D. H. K. and Wilson, A. W., University of Arizona Press, 91–107, 1973.

Randall, D. A., and Coauthors, 2007: Climate models and their evaluation. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, S. Solomon et al., Eds., Cambridge University Press, 589–662

R. Chadwick, I. Boutle, and G. Martin, "Spatial Patterns of Precipitation Change in CMIP5: Why the Rich Do Not Get Richer in the Tropics," *J. Clim.*, vol. 26, no. 11, pp. 3803–3822, Jun. 2013.

Redelsperger, J. L., D. B. Parsons, and F. Guichard (2002), Recovery pro- cesses and factors limiting cloud-top height following the arrival of a dry intrusion observed during TOGA COARE, J. Atmos. Sci., 59, 2438–2457.

Rowell D 2012 Sources of uncertainty in future changes in local precipitation Clim. Dyn. 39 1929–50

Schmidt, (15 de Junio de 2014). Recuperado el 24 de 06 de 2014, de https://andthentheresphysics.wordpress.com/2014/06/15/can-we-trust-climate-models/

S. C. Sherwood, W. Ingram, Y. Tsushima, M. Satoh, M. Roberts, P. L. Vidale, and P. a. O'Gorman, "Relative humidity changes in a warmer climate," *J. Geophys. Res.*, vol. 115, no. D9, p. D09104, May 2010.

"Segunda Comunicación Nacional del Perú a la CMNUCC 1."

S.-P. Xie, C. Deser, G. a. Vecchi, J. Ma, H. Teng, and A. T. Wittenberg, "Global Warming Pattern Formation: Sea Surface Temperature and Rainfall*," *J. Clim.*, vol. 23, no. 4, pp. 966–986, Feb. 2010.

Sherwood, S. C., Ingram, W., Tsushima, Y., Satoh, M., Roberts, M., Vidale, P. L., & O' Gorman, P. a. (2010). Relative humidity changes in a warmer climate. *Journal of Geophysical Research*, *115*(D9), D09104. doi:10.1029/2009JD012585

Stephen A. Klein and Dennis L. Hartmann, "The Seasonal Cycle of Low Stratiform Clouds", Department of Atmospheric Sciences, University of Washington, Seattle, Washington, 1993

Sobel, A. H., and C. S. Bretherton, 2000: Modeling tropical precip- itation in a single column. J. Climate, 13, 4378–4392.

Taylor, K. E., R. J. Stouffer, and G. A. Meehl (2012), A Summary of the CMIP5 Experiment Design, Bull. Amer. Meteor. Soc, 93, 485–498

T. R. Knutson, F. Zeng, and A. T. Wittenberg, "Multi-Model Assessment of Regional Surface Temperature Trends : CMIP3 and CMIP5 20 th Century Simulations," pp. 1–50, 2013.

The handbook of weather, climate, and water: dynamics, climate physical meteorology, weather systems, and measurements = co-chief editors, Thomas D. Potter and Bradley R. Colman. p. cm.

Vecchi, G. a, & Soden, B. J. (2007). Effect of remote sea surface temperature change on tropical cyclone potential intensity. Nature, 450(7172), 1066–70. doi:10.1038/nature06423

Vecchi, G. a., & Soden, B. J. (2007). Global Warming and the Weakening of the Tropical Circulation. Journal of Climate, 20(17), 4316–4340. doi:10.1175/JCLI4258.1

Vecchi, G. A., Soden, B. J., Wittenberg, A. T., Held, I. M., Leetmaa, A., & Harrison, M. J. (2006). Weakening of tropical Pacific atmospheric circulation due to anthropogenic forcing, 441(May), 73–76. doi:10.1038/nature04744

W. Cai, S. Borlace, M. Lengaigne, P. van Rensch, M. Collins, G. Vecchi, A. Timmermann, A. Santoso, M. J. McPhaden, L. Wu, M. H. England, G. Wang, E. Guilyardi, and F.-F. Jin, "Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming," *Nat. Clim. Chang.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–6, Jan. 2014.

Wang, C., Zhang, L., Lee, S., Wu, L., & Mechoso, C. R. (2014). A global perspective on CMIP5 climate model biases, 4(February), 201–205. doi:10.1038/NCLIMATE2118

White, R. (30 de Setiembre de 2013). ClimateSnack. Recuperado el 24 de 03 de 2014, de http://climatesnack.com/2013/09/30/to-rain-or-not-to-rain-precipitation-in-a-changing-climate/

D.S. Wilks. 2006. Statistical Methods in the Atmospheric. Second edition Department of Earth and Atmospheric Sciences Cornell University. Academic Press is an imprint of Elsevier.

Wild, M et al. (2013): Basic measurements of radiation from the Baseline Surface Radiation Network (BSRN) in the years 1992 to 2012, reference list of 6378 datasets. doi:10.1594/PANGAEA.792618,

Woodman, R.: Modelo estadístico de pronóstico de las precipitaciones en la costa norte del Perú. El Fenómeno El Nino. Investigación para una prognosis, 1er encuentro de Universidades del Pacífico Sur: Memoria 93–108, Piura-Perú, 1999.

Xie, S.-P., and S.G.H.Philander, 1994: Acoupled ocean-atmosphere model of relevance to the ITCZ in the eastern Pacific. Tellus, 46A, 340–350.

Zheng, X.-T., S.-P. Xie, G. A. Vecchi, Q. Liu, and J. Hafner, 2010: Indian Ocean dipole response to global warming: Analysis of ocean–atmospheric feedbacks in a coupled model. J. Climate, in press.

VIII. ANEXOS

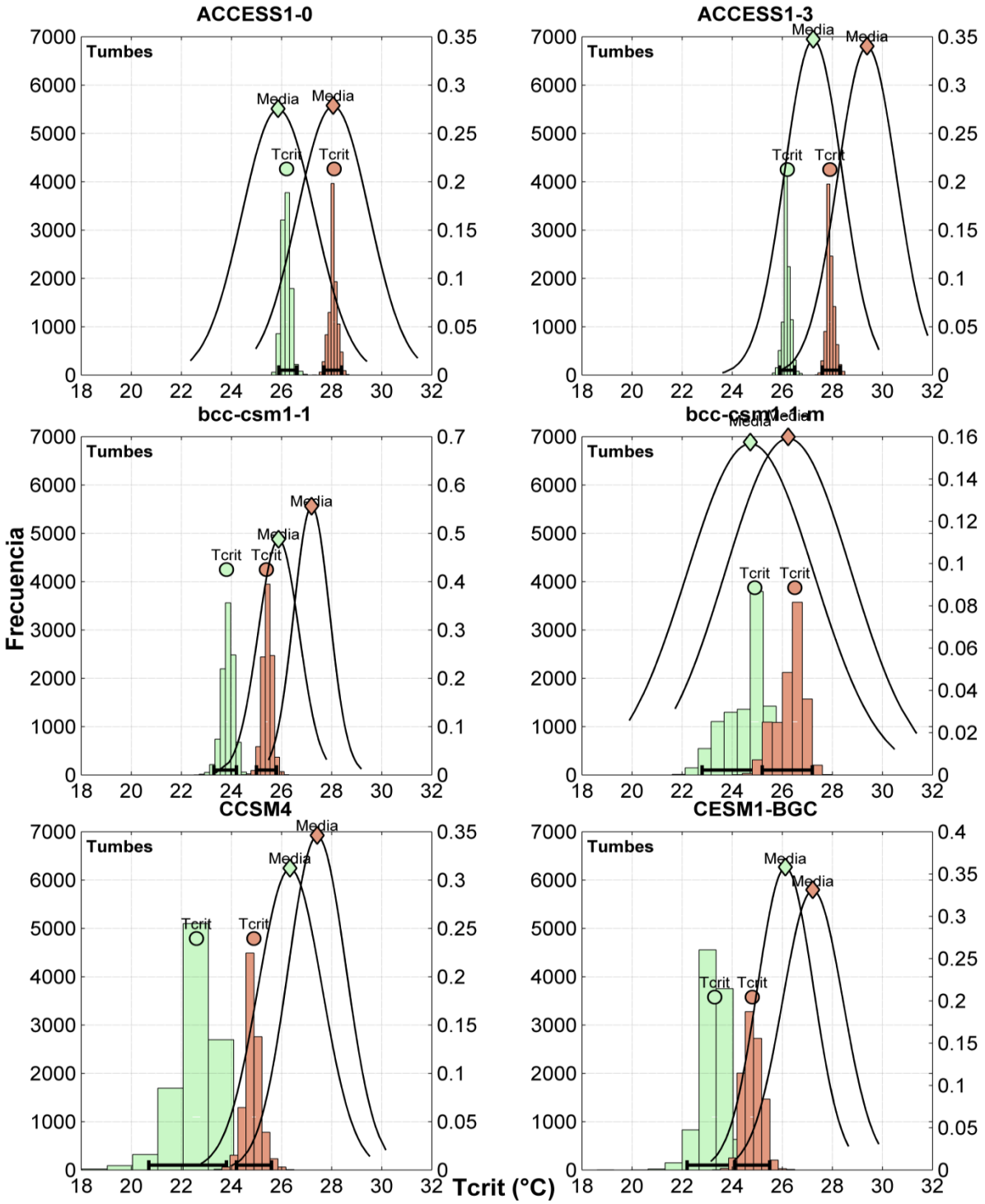
Anexo 1. Resultados de la estimación de los coeficientes de correlación para Tumbes.

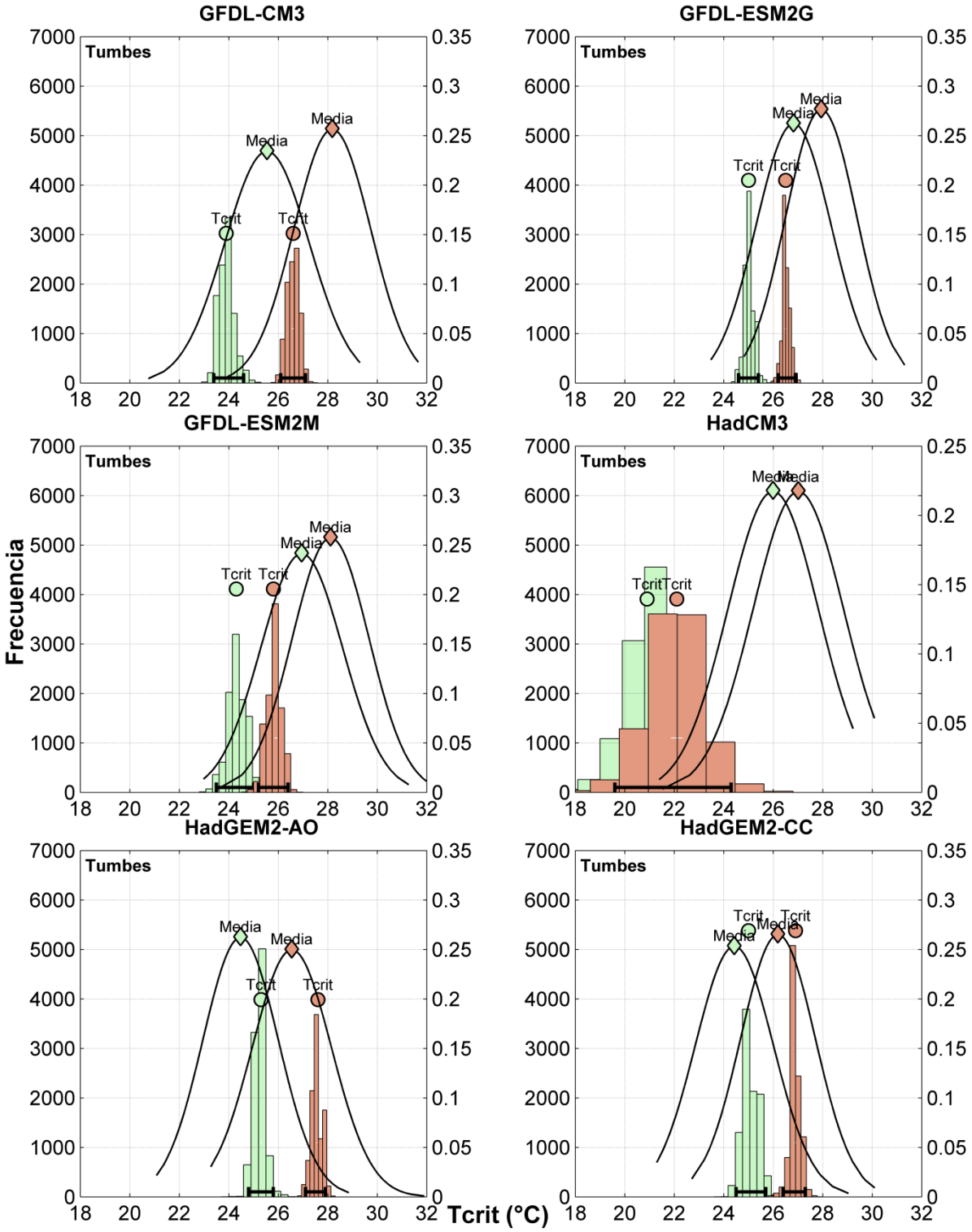
TUMBES							
		PRESENTE			FUTURO		
N°	Modelos	r mensual	r DEF	r anual	r mensual	r DEF	r anual
1	**ACCESS1-0**	**0.8951**	**0.9233**	**0.9181**	**0.8885**	**0.9202**	**0.9267**
2	**ACCESS1-3**	**0.8209**	**0.8268**	**0.7933**	**0.8115**	**0.7862**	**0.7973**
3	bcc-csm1-1	0.602	0.5516	0.5981	0.6053	0.3002	0.3416
4	bcc-csm1-1-m	0.824	0.8599	0.7179	0.8519	0.6646	0.6893
5	CCSM4	0.3852	0.671	0.7452	0.4917	0.623	0.655
6	CESM1-BGC	0.4319	0.1708	0.6694	0.5362	0.6551	0.6121
7	CESM1-CAM5	0.5128	-0.0301	0.0049	0.6567	0.7194	0.7276
8	CMCC-CM	0.6768	0.3871	0.3562	0.6124	0.4539	0.3137
9	CMCC-CMS	0.612	0.7257	0.7039	0.7131	0.831	0.7816
10	CNRM-CM5	0.4015	0.1853	0.2291	0.6705	0.6708	0.5688
11	CSIRO-Mk3-6-0	0.4334	0.7486	0.3352	0.3989	0.7561	0.4994
12	GFDL-CM2p1(*)	0.5836	-0.5519	0.0325	0.686	-0.1135	-0.0113
13	GFDL-CM3	0.7553	0.3055	0.5941	0.7397	0.2007	0.4389
14	GFDL-ESM2G	0.7976	0.371	-0.1219	0.8091	-0.1379	0.1245
15	GFDL-ESM2M	0.6483	-0.469	0.1866	0.6744	-0.6059	0.2412
16	HadCM3(*)	0.4821	0.8992	0.6157	0.4821	0.8943	0.713
17	**HadGEM2-AO**	**0.8609**	**0.848**	**0.9167**	**0.9216**	**0.9104**	**0.9679**
18	**HadGEM2-CC**	**0.8484**	**0.7663**	**0.8949**	**0.8621**	**0.887**	**0.8846**
19	**HadGEM2-ES**	**0.8666**	**0.9077**	**0.9153**	**0.8382**	**0.9015**	**0.8476**
20	inmcm4	0.8766	-0.262	0.3143	0.8762	-0.1952	0.2495
21	IPSL-CM5A-LR	0.7953	-0.0232	0.0952	0.7557	-0.1014	0.1788
22	IPSL-CM5A-MR	0.8579	0.4823	0.4211	0.8087	0.2154	0.1961
23	IPSL-CM5B-LR	0.4328	-0.202	0.3668	0.4648	-0.1369	-0.2035
24	MIROC4h(*)	0.6523	-0.0871	-0.0989	0.5861	-0.1863	-0.1679
25	**MIROC5**	**0.7878**	**0.6581**	**0.817**	**0.8463**	**0.8741**	**0.9439**
26	**MPI-ESM-LR**	**0.7218**	**0.5826**	**0.6744**	**0.7913**	**0.7548**	**0.8061**
27	**MPI-ESM-MR**	**0.7577**	**0.6931**	**0.6275**	**0.7536**	**0.6188**	**0.5758**
28	**MRI-CGCM3**	**0.6695**	**0.4445**	**0.5587**	**0.6414**	**0.6199**	**0.6526**

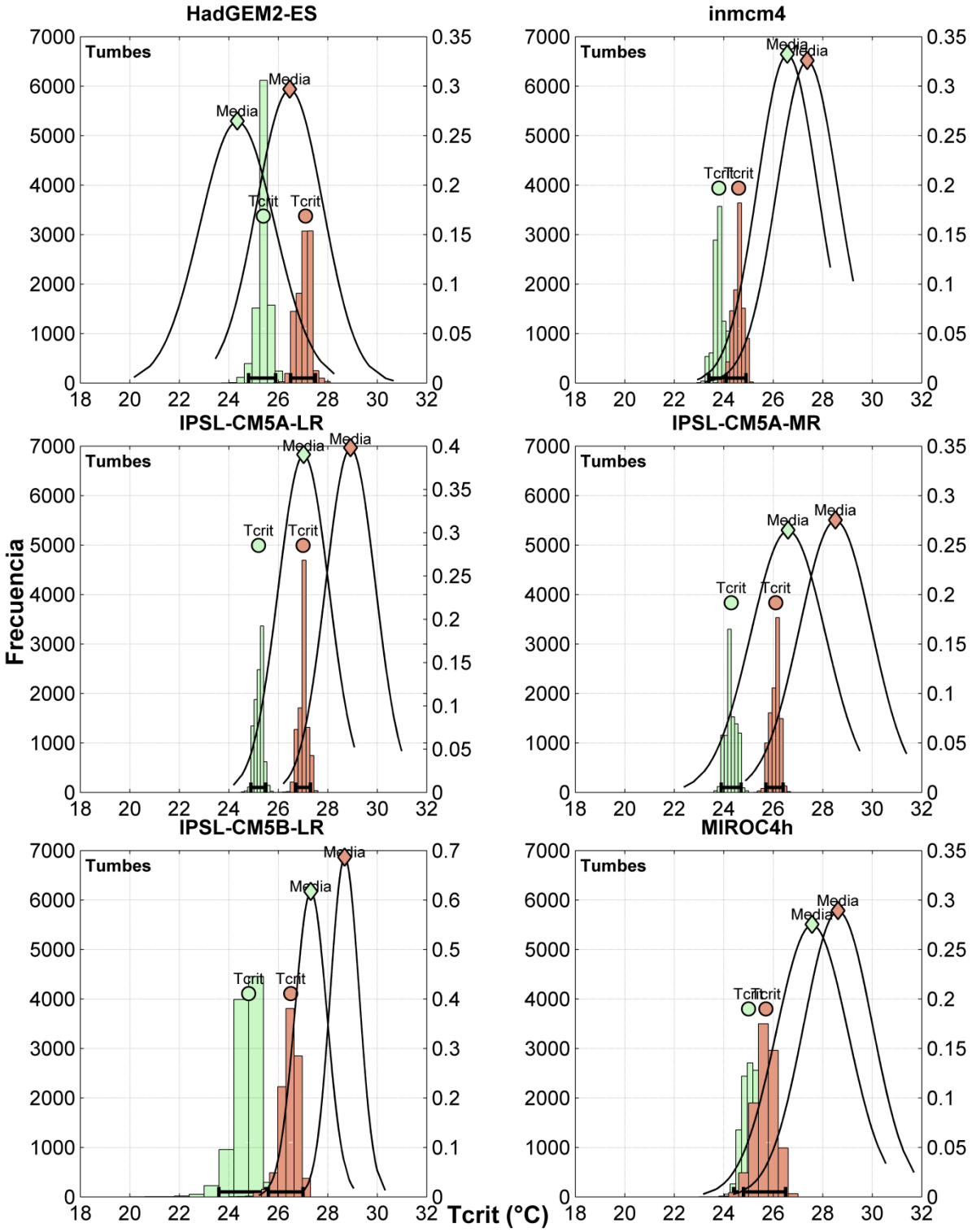
Anexo 2: Resultados de la estimación de los coeficientes de correlación para Piura

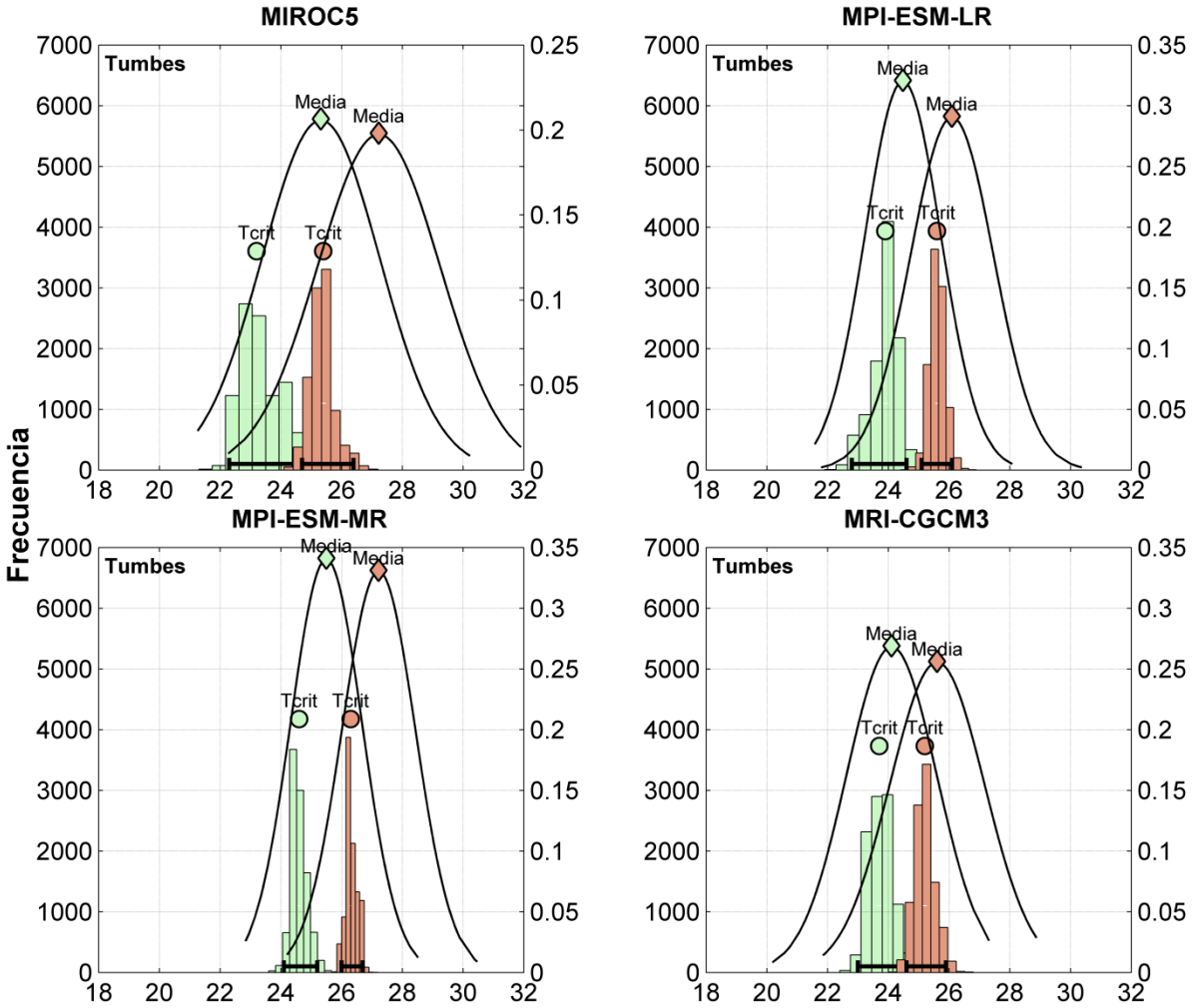
PIURA							
		PRESENTE			FUTURO		
N°	Modelos	r mensual	r DEF	r anual	r mensual	r DEF	r anual
1	**ACCESS1-0**	**0.9015**	**0.9376**	**0.9252**	**0.8692**	**0.8986**	**0.8917**
2	**ACCESS1-3**	**0.7961**	**0.6357**	**0.7729**	**0.8074**	**0.5971**	**0.7632**
3	bcc-csm1-1	0.6344	0.5352	0.5494	0.6303	0.3164	0.3142
4	bcc-csm1-1-m	0.6725	0.8285	0.4249	0.7485	0.7032	0.5648
5	CCSM4	0.694	0.6524	0.7131	0.7856	0.6594	0.7575
6	CESM1-BGC	0.7273	0.2341	0.6189	0.7902	0.6524	0.5912
7	CESM1-CAM5	0.739	-0.0533	-0.0219	0.8448	0.6467	0.7168
8	CMCC-CM	0.7314	0.4856	0.4846	0.7062	0.4888	0.4464
9	CMCC-CMS	0.7168	0.702	0.7409	0.8125	0.8393	0.8736
10	CNRM-CM5	0.5717	0.1379	0.1877	0.8058	0.7092	0.6421
11	CSIRO-Mk3-6-0	0.4667	0.6102	0.2764	0.4275	0.5077	0.4261
12	GFDL-CM2p1(*)	0.6178	-0.5562	0.0216	0.7045	0.0187	0.0788
13	GFDL-CM3	0.8476	0.3629	0.6554	0.8125	0.2582	0.4871
14	GFDL-ESM2G	0.7915	0.5348	0.0176	0.8034	0.1234	0.3341
15	GFDL-ESM2M	0.6635	-0.4294	0.2476	0.6795	-0.6174	0.1716
16	HadCM3(*)	0.4066	0.8898	0.5559	0.4366	0.8831	0.6343
17	**HadGEM2-AO**	**0.8873**	**0.8691**	**0.873**	**0.9064**	**0.8394**	**0.9548**
18	**HadGEM2-CC**	**0.9077**	**0.8871**	**0.9031**	**0.919**	**0.8511**	**0.8188**
19	**HadGEM2-ES**	**0.9214**	**0.914**	**0.9244**	**0.9108**	**0.9032**	**0.8961**
20	inmcm4	0.8319	0.0075	0.5226	0.8111	-0.2932	0.3458
21	IPSL-CM5A-LR	0.8712	0.1634	0.1669	0.826	0.163	0.2992
22	IPSL-CM5A-MR	0.8738	0.5924	0.4045	0.8304	0.3854	0.2815
23	IPSL-CM5B-LR	0.6264	0.0929	0.5242	0.6583	0.1133	-0.0823
24	MIROC4h(*)	**0.8377**	**0.0215**	**0.2944**	**0.7971**	**-0.0938**	**0.0548**
25	**MIROC5**	**0.7855**	**0.6569**	**0.796**	**0.8682**	**0.8802**	**0.9504**
26	**MPI-ESM-LR**	**0.7668**	**0.6071**	**0.7799**	**0.8177**	**0.7391**	**0.8711**
27	**MPI-ESM-MR**	**0.8045**	**0.6931**	**0.7588**	**0.8339**	**0.6688**	**0.7045**
28	**MRI-CGCM3**	**0.7097**	**0.5636**	**0.6486**	**0.6938**	**0.6601**	**0.6668**

Anexo 3: Resultados de la estimación del Método de Monte Carlo para Tumbes. La barra de color negro muestra el intervalo de confianza inicia en el percentil 2.5 y termina en el percentil 97.5. El eje izquierdo corresponde a la frecuencia de eventos de Tcrit y el eje x es Tcrit.

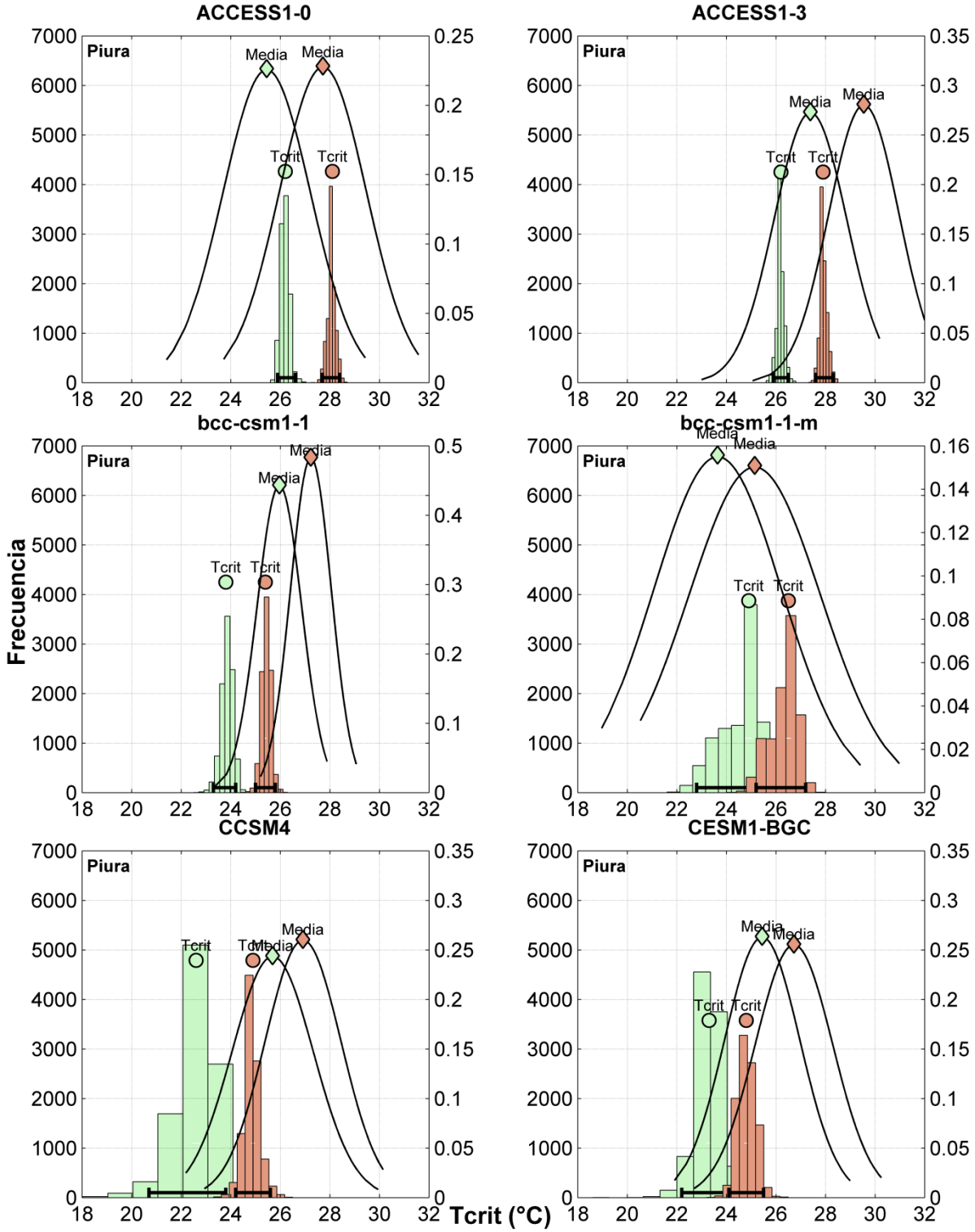


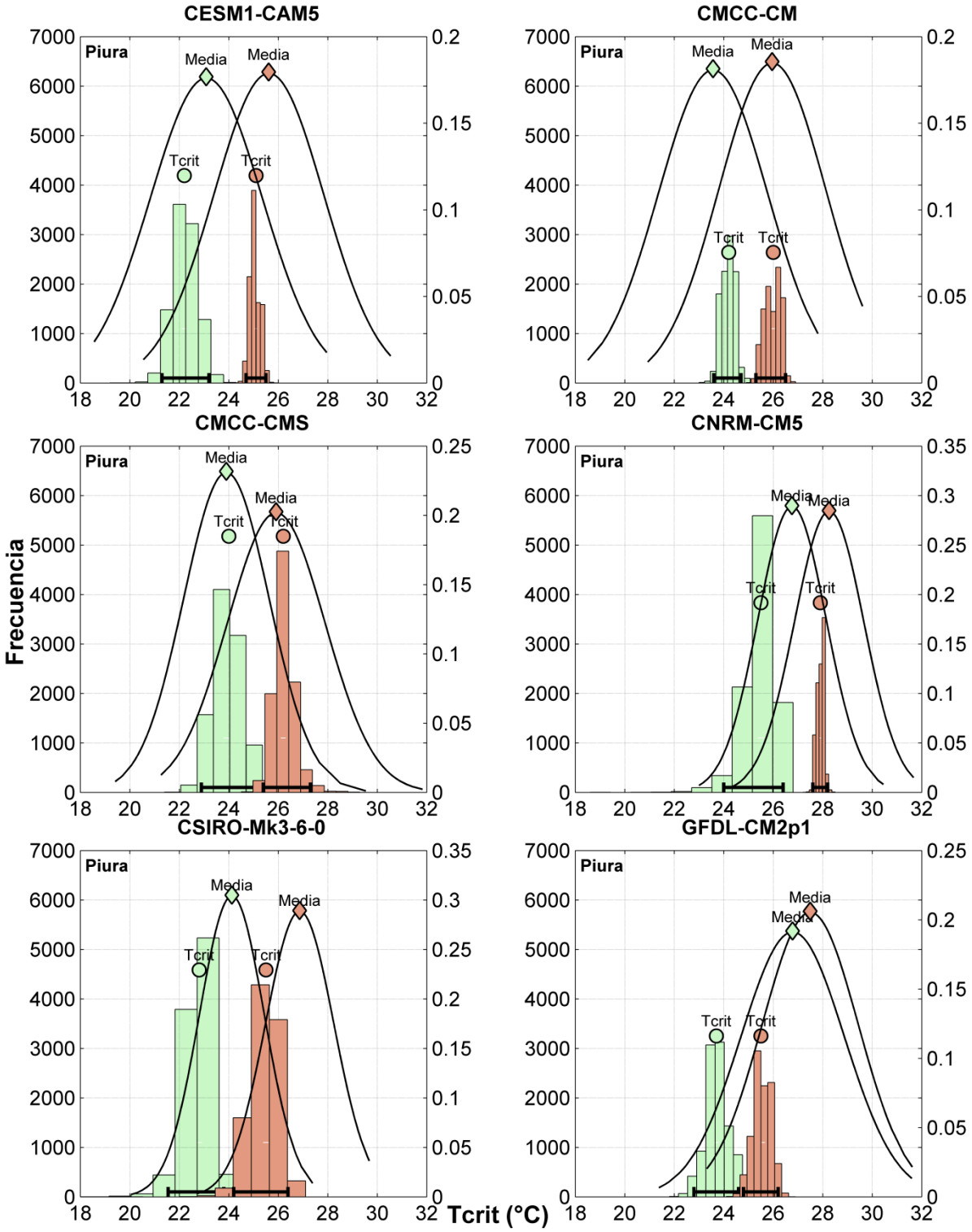

GFDL-CM3
GFDL-ESM2G
GFDL-ESM2M
HadCM3
HadGEM2-AO
HadGEM2-CC
Tumbes
Media
Tcrit
Frecuencia
Tcrit (°C)

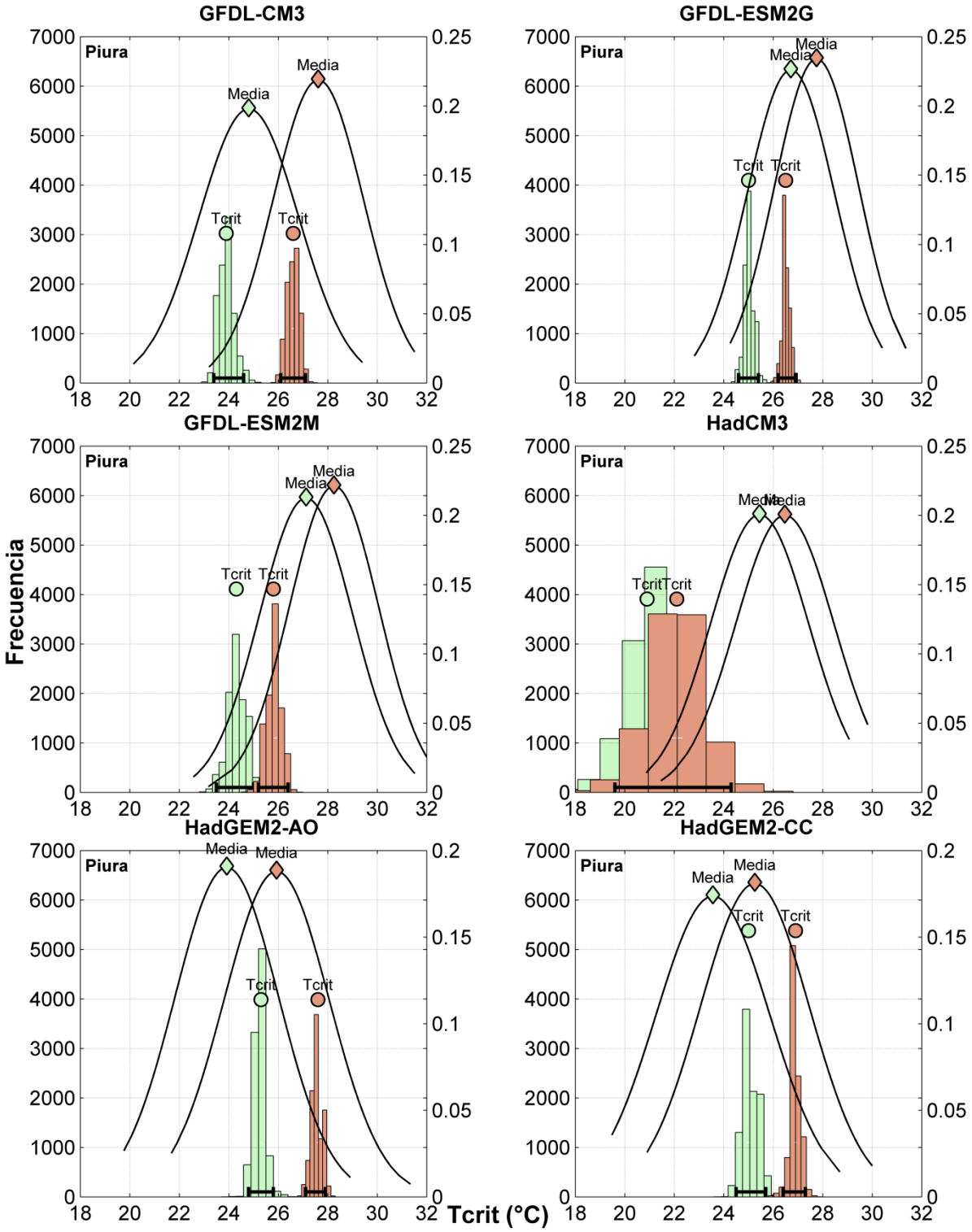

HadGEM2-ES
inmcm4
IPSL-CM5A-LR
IPSL-CM5A-MR
IPSL-CM5B-LR
MIROC4h
Tumbes
Media
Tcrit
Frecuencia
Tcrit (°C)

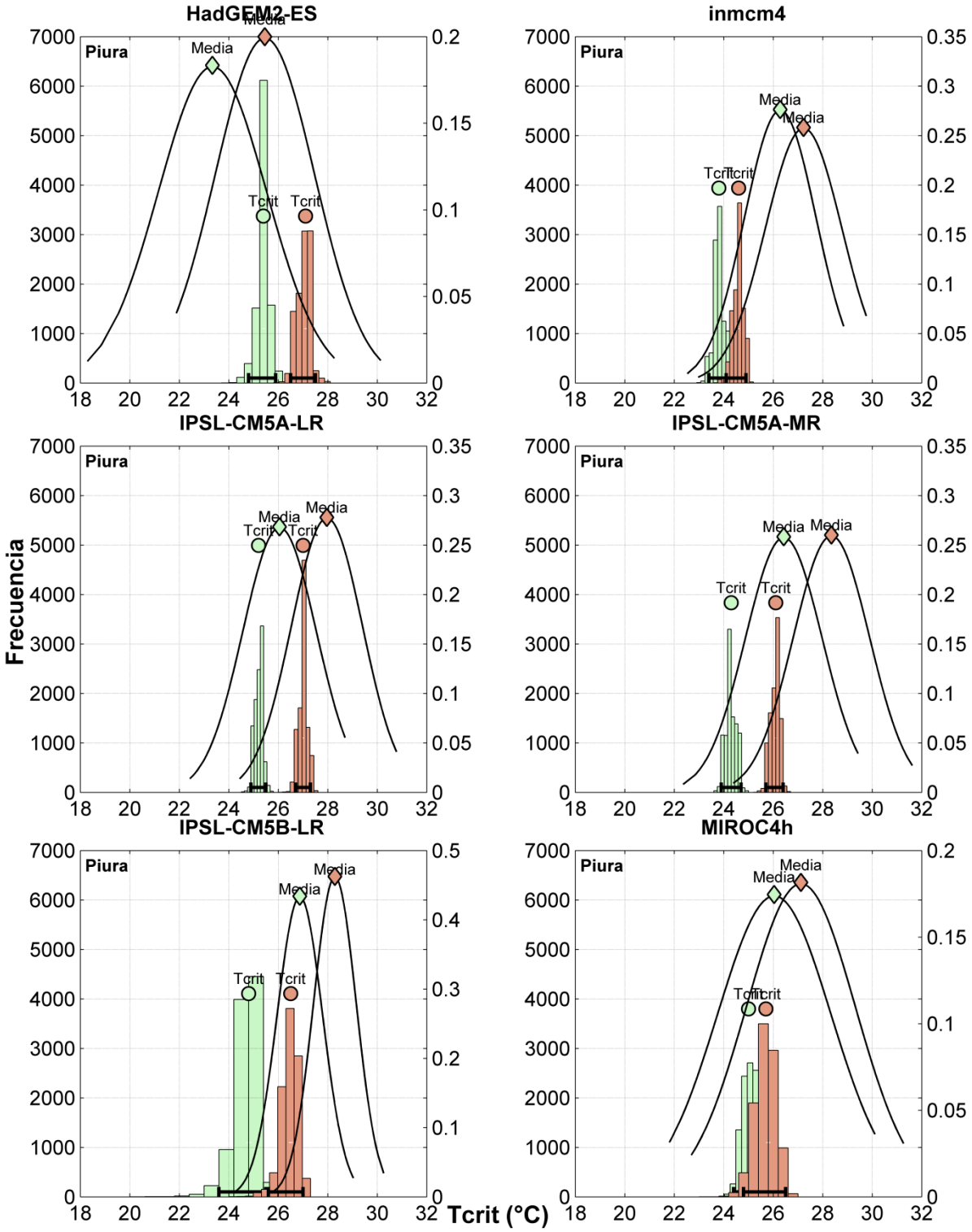

MIROC5
MPI-ESM-LR
MPI-ESM-MR
MRI-CGCM3
Tumbes
Media
Tcrit
Frecuencia

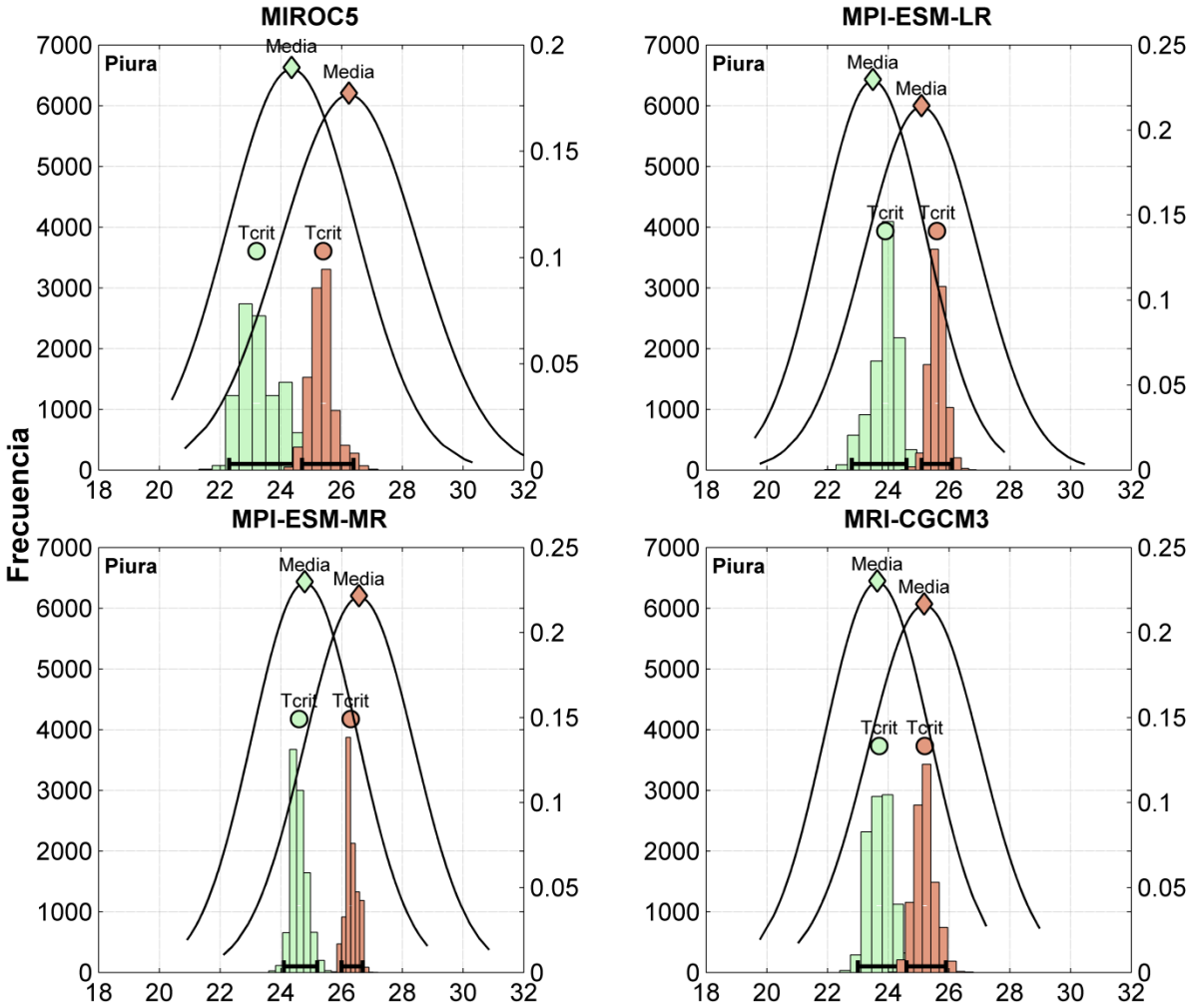
Anexo 4: Resultados de la estimación del Método de Monte Carlo para Piura. La barra de color negro muestra el intervalo de confianza inicia en el percentil 2.5 y termina en el percentil 97.5. El eje izquierdo corresponde a la frecuencia de eventos de Tcrit y el eje x es Tcrit.




CESM1-CAM5
CMCC-CM
CMCC-CMS
CNRM-CM5
CSIRO-Mk3-6-0
GFDL-CM2p1
Piura
Media
Tcrit
Frecuencia
Tcrit (°C)


GFDL-CM3
GFDL-ESM2G
GFDL-ESM2M
HadCM3
HadGEM2-AO
HadGEM2-CC
Piura
Media
Tcrit
Frecuencia
Tcrit (°C)


HadGEM2-ES
inmcm4
IPSL-CM5A-LR
IPSL-CM5A-MR
IPSL-CM5B-LR
MIROC4h
Piura
Media
Tcrit
Frecuencia
Tcrit (°C)


MIROC5
MPI-ESM-LR
MPI-ESM-MR
MRI-CGCM3
Piura
Media
Tcrit
Frecuencia

Anexo 5: Intervalo de confianza de la pendiente ("a") para el escenario del presente y futuro en Tumbes. Estos se han obtenido de la estimación de Monte Carlo, donde p2.5 es el percentil 2.5 y p97.5 es el percentil 97.5.

TUMBES									
N°	Modelos	p2.5 ($mm°C^{-1}$)	p97.5 ($mm°C^{-1}$)	Intervalo Presente	"a" Presente	p2.5 ($mm°C^{-1}$)	p97.5 ($mm°C^{-1}$)	Intervalo Futuro	"a" Futuro
1	**ACCESS1-0**	**72.2**	**131.2**	**59**	**97.5**	**82.8**	**130.4**	**47.6**	**104.2**
2	**ACCESS1-3**	**90.3**	**130.2**	**39.9**	**108.4**	**89.2**	**123.2**	**34**	**102.9**
3	bcc-csm1-1	92.8	158.4	65.6	122.3	116.1	190	73.9	148
4	bcc-csm1-1-m	31.9	95.1	63.2	63.2	49.9	115.1	65.2	80.3
5	CCSM4	30.4	74.7	44.3	50.2	61.2	112.4	51.2	82.3
6	CESM1-BGC	38.7	87.7	49	57.6	59.5	109.5	50	79.1
7	CESM1-CAM5	44.3	97	52.8	64.4	100.4	144.4	44	120
8	CMCC-CM	43.4	103	59.6	66	63.7	149.1	85.4	97.5
9	CMCC-CMS	18.5	80	61.5	37.4	39.1	125.3	86.2	66.3
10	CNRM-CM5	42.1	124.2	82.1	73.7	113.4	182.3	68.9	141.7
11	CSIRO-Mk3-6-0	31.8	105.5	73.7	58.1	35.6	112.4	76.9	64
12	GFDL-CM2p1(*)	49.1	91.9	42.8	65.8	78.4	138.5	60.2	103.6
13	GFDL-CM3	76.1	127.8	51.7	95.4	85.8	124.2	38.3	103.5
14	GFDL-ESM2G	109.3	154.5	45.3	129.3	138.3	192	53.7	162.6
15	GFDL-ESM2M	62.1	107.1	44.9	81.1	74.7	123.7	49	95.6
16	HadCM3(*)	16.1	34.1	18	24.3	17	48.9	32	27.6
17	**HadGEM2-AO**	**44.9**	**97**	**52**	**69.6**	**76.2**	**148.9**	**72.7**	**107.3**
18	**HadGEM2-CC**	**55.3**	**148**	**92.7**	**85.8**	**69.9**	**150.3**	**80.4**	**103.1**
19	**HadGEM2-ES**	**59.7**	**155.8**	**96.2**	**100.9**	**59.6**	**155.2**	**95.6**	**103.3**
20	inmcm4	81.8	103.8	22	92.1	82.4	105.3	22.9	94.6
21	IPSL-CM5A-LR	136.4	177.6	41.1	154.5	136.9	179.9	43	156.3
22	IPSL-CM5A-MR	88.3	117.5	29.2	100.9	90.4	115.6	25.1	101.6
23	IPSL-CM5B-LR	105.2	206.7	101.5	154.5	135.2	234.6	99.4	186.5
24	MIROC4h(*)	44.1	69.9	25.7	54.8	38	68.2	30.2	50.3
25	**MIROC5**	**34.5**	**75.8**	**41.3**	**47.4**	**51.2**	**89.5**	**38.2**	**65.6**
26	**MPI-ESM-LR**	**27.4**	**92.5**	**65.1**	**54.8**	**48.5**	**101.6**	**53.1**	**69.1**
27	**MPI-ESM-MR**	**53.6**	**120.7**	**67.1**	**76.9**	**81.6**	**138.3**	**56.7**	**105.2**
28	**MRI-CGCM3**	**49.1**	**192.3**	**143.2**	**83.4**	**83.9**	**233**	**149.1**	**132.8**

Anexo 6: Intervalo de confianza de la pendiente ("a") para el escenario del presente y futuro en Piura. Estos se han obtenido de la estimación de Monte Carlo, donde p2.5 es el percentil 2.5 y p97.5 es el percentil 97.5.

PIURA									
N°	Modelos	p2.5 ($mm°C^{-1}$)	p97.5 ($mm°C^{-1}$)	Intervalo Presente	"a" Presente	p2.5 ($mm°C^{-1}$)	p97.5 ($mm°C^{-1}$)	Intervalo Futuro	"a" Futuro
1	**ACCESS1-0**	**91.6**	**146.4**	**54.9**	**116.9**	**91.2**	**145.7**	**54.5**	**113.3**
2	**ACCESS1-3**	**120.7**	**177.3**	**56.5**	**141.5**	**123.2**	**170**	**46.8**	**142.8**
3	bcc-csm1-1	88.9	147.5	58.6	114	104.2	173.2	69	132.3
4	bcc-csm1-1-m	14.9	91.5	76.6	22.1	23	78.3	55.4	35.1
5	CCSM4	54.1	100.3	46.1	72.9	90.5	147.4	56.9	114.6
6	CESM1-BGC	60.1	129.1	69	84.1	80.7	136.1	55.4	105.4
7	CESM1-CAM5	48.9	101.3	52.4	67.9	103.6	144.5	40.9	122.6
8	CMCC-CM	23.1	76.5	53.4	39.9	53.2	152.9	99.7	86.9
9	CMCC-CMS	13.3	72.2	58.9	30.6	28.4	119.3	90.9	69
10	CNRM-CM5	45.9	99.2	53.3	66.9	98.7	146.1	47.4	118.2
11	CSIRO-Mk3-6-0	25.6	86.2	60.5	46.6	28.9	68.3	39.5	43.5
12	GFDL-CM2p1(*)	47.6	84.1	36.5	62.9	70.1	116.5	46.4	90.9
13	GFDL-CM3	75.2	119.5	44.3	92.6	84.9	116.5	31.6	98.4
14	GFDL-ESM2G	92.3	132.6	40.4	109.4	114.2	155	40.8	132.3
15	GFDL-ESM2M	61.4	101.5	40.1	78	69.6	110.2	40.5	87.5
16	HadCM3(*)	10.6	26.9	16.3	18.6	11.9	37.5	25.6	22.3
17	**HadGEM2-AO**	**44.4**	**95.2**	**50.8**	**61.9**	**51.4**	**95.2**	**43.9**	**70.6**
18	**HadGEM2-CC**	**41.3**	**75.2**	**33.9**	**53.2**	**43**	**63.7**	**20.7**	**51.9**
19	**HadGEM2-ES**	**47.2**	**78.8**	**31.6**	**58.9**	**53.1**	**88.9**	**35.8**	**68.6**
20	inmcm4	60.4	76.7	16.3	67.7	58	75.9	17.9	66
21	IPSL-CM5A-LR	118.8	149.3	30.5	132.2	118	149.1	31.1	131.3
22	IPSL-CM5A-MR	95.8	125.1	29.3	108.1	95	122.6	27.6	107.6
23	IPSL-CM5B-LR	140	227.4	87.4	173.4	169.8	241.8	72	198.6
24	MIROC4h(*)	33.8	54.6	20.8	42.7	29.8	45.7	15.9	36.2
25	**MIROC5**	**26.1**	**81.4**	**55.3**	**48.6**	**45.8**	**83.4**	**37.7**	**63.6**
26	**MPI-ESM-LR**	**22.8**	**79.2**	**56.4**	**43.9**	**34.7**	**79.6**	**44.9**	**51.6**
27	**MPI-ESM-MR**	**42.9**	**114.1**	**71.1**	**69.8**	**79.7**	**150.6**	**71**	**105.1**
28	**MRI-CGCM3**	**34.8**	**177.7**	**142.9**	**63**	**57.8**	**177.8**	**120**	**94.5**