



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS

FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL

ihh

INSTITUTO DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA



**VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA  
ESPACIO-TEMPORAL  
EN LA CUENCA ANDINA DEL RÍO BENI**

PROYECTO DE GRADO  
PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE  
LICENCIADO EN INGENIERÍA CIVIL

**PRESENTA:**

LEONARDO CESAR MAMANI JIMENEZ

**ASESORES:**

ING. JORGE ALCIDES MOLINA CARPIO  
ING. DANIEL ROMERO ESPINOZA ROMERO

LA PAZ, BOLIVIA  
DICIEMBRE, 2019





**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE INGENIERIA**



**LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.**

**LICENCIA DE USO**

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

**TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.**

## **DEDICATORIA**

*Dedico este trabajo a mi madre, por ser el pilar más importante en mi vida y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional. A mi padre, que a pesar de nuestra distancia física, siento que estás conmigo y aunque nos faltaron muchas cosas por vivir juntos, sé que esta etapa de mi vida hubiera sido tan especial para ti como lo es para mí. A mi hermana Rosmery, a quien quiero como a una madre, por cuidarme y ayudarme en todo momento. A mi hermano Leonardo, por creer en mí y enseñarme que solo yo defino quien quiero ser y hasta donde llegar, así lo hice y lo seguiré haciendo, es por ustedes que logré alcanzar esta meta.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Agradecer principalmente a Dios por haberme dado lo suficiente y necesario en mi vida. Gracias por darme a la gran familia con la que me tocó crecer, educarme pero sobre todo que me apoyó en situaciones difíciles, gracias a Dios por ponerme en mi camino a personas admirables y luchadoras que me ayudan a mejorar como ser humano.*

*Gracias a mis asesores Ing. Jorge Molina e Ing. Daniel Espinoza por darme la oportunidad de seguir mejorando y enriquecer mis conocimientos, gracias por todas esas largas horas que dedicaron en mí, desde el inicio de este proyecto hasta su finalización. Gracias por sus opiniones profesionales y su apoyo incondicional.*

*Gracias a Cristian Farfán, Eduardo Noriega, Carol Alejo y Satgé, investigadores que en su momento contribuyeron con el proyecto PHYBAAM, y nos proporcionaron datos hidroclimáticos terrestres y satelitales para la realización de este trabajo.*

*Gracias al IRD, no sólo por la compensación económica, que por supuesto ha sido de gran ayuda, sino por el hecho de haber sido beneficiado de una institución que pretende brindar un futuro mejor a los estudiantes.*

*Gracias a los ingenieros: Pablo Fuchs, Carlos Herbas, Edson Ramirez y Ramiro Pillco por ser parte de mi tribunal y por haber contribuido en la redacción de este trabajo, siempre conservaré sus opiniones profesionales.*

*Gracias a la Universidad Mayor de San Andrés por haberme permitido forjarme en ella, gracias a todas las personas que fueron partícipes de este proceso, a los excelentes docentes que me enseñaron acerca del contenido de esta carrera prestigiosa y sobre todo me enseñaron a responder profesionalmente ante la sociedad.*

*Gracias a mis amigos(as) compañeros de la universidad, con los que compartimos experiencias inolvidables durante estos últimos años, verlos a ustedes sobresaliendo en la universidad y ahora en la vida profesional me llena de alegría y me da más ánimo para lograr alcanzarlos y seguir mejorando.*



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL**



**VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA ESPACIO-TEMPORAL EN LA CUENCA  
ANDINA DEL RÍO BENI**

---

Nombre: Leonardo Cesar Mamani Jimenez

Dirección: calle Lagar No. 2484 - zona Luis Espinal Camps - El Alto

Celular: 65576235

Correo: [leonleonfico@gmail.com](mailto:leonleonfico@gmail.com)

### **RESUMEN**

En este trabajo se estudia la variabilidad hidroclimática regional de la precipitación y del escurrimiento (caudales) asociada con procesos físico-atmosféricos a los océanos del Pacífico y el Atlántico en la cuenca andina del río Beni. La variabilidad espacio-temporal de la precipitación se estudió en base a un análisis de componentes principales (ACP) y el método del vector regional (MVR) para el periodo 1972-2016 y por primera vez a nivel estacional (DEF, MAM, JJA y SON). Se identificaron 5 regiones pluviométricas con un comportamiento homogéneo utilizando 120 estaciones terrestres sobre la cuenca y 3 CP que permitieron reducir y sintetizar la información de 55 series de precipitación, identificando al mismo tiempo los principales modos de variabilidad y sus causas. Así mismo los resultados del agrupamiento por el ACP se comprueban con el MVR. La fuerte variabilidad espacial entre grupos regionales está asociada a los grandes cambios fisiográficos que son característicos de la cuenca. Los resultados muestran que la principal causa de la variabilidad interanual de la lluvia está asociada con El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), en las series de los vectores regionales La Paz, Sur y Noroeste (CP1) durante DEF y MAM. La relación negativa entre estas series temporales y la SST del Pacífico ecuatorial oriental (Niño E o canónico) en temporada húmeda implica una disminución (exceso) de la precipitación con SST más cálida (fría) de la habitual en el Pacífico ecuatorial oriental. Así estos grupos regionales indican déficit de lluvias durante los fuertes eventos El Niño 1982-83, 1997-98 y 2015-16. Una variabilidad interanual-decadal asociada al Pacífico ecuatorial central (PC ENSO) se presenta para el grupo regional Yungas (CP3) durante DEF y MAM. Esta variabilidad está relacionada con eventos moderados de El Niño que tuvieron su máximo de anomalías positivas en el Pacífico ecuatorial central provocando lluvias deficitarias en 1982-83, 1991-92, 2002-03 y 2015-16. La variabilidad decadal asociada al Atlántico Norte Tropical (TNA) y el Atlántico Sur tropical (TSA) ocurre a lo largo de toda la cuenca durante JJA. Este patrón se pudo identificar gracias a la aplicación de la transformada wavelet continua (CWT) sobre las series temporales. La relación negativa entre las series temporales y la SST del TNA y TSA en temporada seca implican una disminución (exceso) de la precipitación con SST más cálida (fría) de la habitual. Nuestros resultados sugieren que existe una teleconexión entre la SST del Pacífico

Tropical central y el Atlántico a escalas de tiempo decadales. La variabilidad hidrológica en la cuenca está asociada a escalas de tiempo interanual y decadal y está directamente relacionada con la precipitación regional. La mayor parte de las estaciones hidrológicas presentan una correlación negativa con la SST del Pacífico ecuatorial durante la temporada de crecidas o descarga de flujo alto ( $Q_{max}$ ). También se identificó una correlación positiva entre la SST del Atlántico Sur Subtropical en las estaciones Nube y Rurrenabaque, lo que indica que anomalías positivas en el Atlántico Sur Tropical provocan exceso de lluvias durante la estación húmeda. Para la temporada de estiaje o de aguas bajas ( $Q_{min}$ ) no se identifica un patrón característico dominante. Por otro lado los resultados de los productos satelitales de precipitación (PPS: CHIRPS, MSWEP y TRMM) no representan bien los modos de variabilidad climática presentes sobre la cuenca, lo que probablemente se debe a la orografía y topografía muy complejas de la cuenca andina del río Beni y la enorme variabilidad climática.



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL**



**SPATIO-TEMPORAL HYDROCLIMATIC VARIABILITY IN THE ANDEAN BASIN  
OF THE BENI RIVER**

---

Full name: Leonardo Cesar Mamani Jimenez

Address: Lagar Street No. 2484 - Luis Espinal Camps zone - El Alto

Cell: 65576235

E-mail: leonleonfico@gmail.com

**ABSTRACT**

This paper studies the regional hydroclimatic variability of precipitation and runoff (flows) associated with physical-atmospheric processes to the Pacific and Atlantic oceans in the Andean Basin of the Beni River. The spatio-temporal variability of precipitation was studied based on a principal component analysis (ACP) and the regional vector method (MVR) for the period 1972-2016 and for the first time at the seasonal level (DJF, MAM, JJA and SON). Five rainfall regions with a homogeneous behavior were identified using 120 ground stations over the basin and 3 CPs that allowed reducing and synthesizing the information of 55 precipitation series, identifying at the same time the main modes of variability and their causes. Likewise, the results of the grouping by the ACP are checked with the MVR. The strong spatial variability between regional groups is associated with the great physiographic changes that are characteristic of the basin. The results show that the main cause of the interannual variability of rainfall is associated with El Niño-Southern Oscillation (ENSO), in the series of regional vectors La Paz, Sur and Noroeste (CP1) during DEF and MAM. The negative relationship between these time series and the SST of the eastern equatorial Pacific (Niño E or canonical) in the wet season implies a decrease (excess) of precipitation with warmer (colder) SST than usual in the eastern equatorial Pacific. Thus these regional groups indicate rainfall deficit during the strong El Niño events 1982-83, 1997-98 and 2015-16. An interannual-decadal variability associated with the Central Equatorial Pacific (PC ENSO) is presented for the Yungas regional group (CP3) during DEF and MAM. This variability is related to moderate El Niño events that had their maximum positive anomalies in the central equatorial Pacific causing deficit rains in 1982-83, 1991-92, 2002-03 and 2015-16. The decadal variability associated with the Tropical North Atlantic (TNA) and the tropical South Atlantic (TSA) occurs throughout the entire basin during JJA. This pattern could be identified thanks to the application of the continuous wavelet transform (CWT) on the time series. The negative relationship between the time series and the SST of the TNA and TSA in the dry season implies a decrease (excess) of the precipitation with SST warmer (cold) than usual. Our results suggest that there is a teleconnection between the SST of the Central Tropical Pacific and the Atlantic at decade time scales. Hydrological variability in the basin is associated with interannual and decadal time scales and is directly related to regional precipitation. Most of the hydrological

stations have a negative correlation with the SST of the equatorial Pacific during the flood or high flow discharge season ( $Q_{max}$ ). A positive correlation was also identified between the SST of the Subtropical South Atlantic at the Nube and Rurrenabaque stations, indicating that positive anomalies in the Tropical South Atlantic cause excess rainfall during the wet season. For the dry season or low water season ( $Q_{min}$ ) a dominant characteristic pattern is not identified. On the other hand, the results of precipitation satellite products (PPS: CHIRPS, MSWEP and TRMM) do not represent the modes of climatic variability present in the basin, which is probably due to the very complex orography and topography of the Andean basin of the Beni river and the enormous climatic variability.



2019-1125-014-0-2

DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR  
Y DERECHOS CONEXOS  
RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA Nro. 1-2520/2019  
La Paz, 9 de Diciembre del 2019

**VISTOS:**

La solicitud de inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha 3 de Diciembre del 2019, por LEONARDO CESAR MAMANI JIMENEZ, con C.I. N° 9232004 LP., con número de trámite DA 1355-2019, señala la pretensión de inscripción de la Obra Literaria (Proyecto de Grado) titulada: "VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA ESPACIO-TEMPORAL EN LA CUENCA ANDINA DEL RIO BENI", cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

**CONSIDERANDO**

Que, en observación al Artículo 4° del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152 "el Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma desconcentrada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración".

Que, el Artículo 16° del Decreto Supremo N° 27938 establece "Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión". En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N° 1322, Decreto Reglamentario N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6° de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26° inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4° de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

Que, de conformidad al Artículo 18° de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18° de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, en referencia a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: "la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios".

Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4° de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, y Artículo 7° de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: "...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial".



**POR TANTO**

El Director de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas

**RESUELVE:**

**INSCRIBIR** en el Registro de Obras Literarias de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, la Obra Literaria (Proyecto de Grado) titulada: **"VARIABILIDAD HIDROCLIMATICA ESPACIO-TEMPORAL EN LA CUENCA ANDINA DEL RIO BENI"**, a favor del autor y titular: **LEONARDO CESAR MAMANI JIMENEZ**, con C.I. N° 9232004 LP., quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.



Dr. Francisco Bueno Ayala  
**DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR  
Y DERECHOS CONEXOS**  
SERVICIO NACIONAL DE PROPIEDAD INTELECTUAL



FBA/indus  
t.e. Arsh.

Oficina central - La Paz  
Av. Argentina, s/n° 194,  
CSE, República Plurinacional,  
entre Villalón y Vico Barrios,  
CASA MULLER

Oficina distrital - El Alto  
Av. Juan Pablo II, s/n° 2946,  
CSE, Municipio El Valle de la  
Calle 1, OF. 24,  
entre 14 de Julio

Oficina distrital - Cochabamba  
Calle Chepataka, s/n° 446,  
piso 2, entre Andacollo y Lanza,  
zona Surzal - Rosendo  
MIL - 404040

Oficina distrital - Santa Cruz  
Montañas Juveniles,  
Cta. Ingavi, s/n° 78  
CSE, Montañas, las Avilas  
MIL - 30000

Oficina distrital - Ortoplan  
Calle Villavejo 1, s/n° 184  
cas. sup. Ortoplanillo  
zona Parque Bolívar  
MIL - 20000

Oficina distrital - Tarija  
Calle Inga, s/n° 94  
entre Cobos y Salvoche  
CSE, Cerro de la Cruz,  
CSE, 040, zona Central

Oficina distrital - Sucre  
Calle 1 de Mayo, s/n° 101  
entre Ayacucho y Lanza,  
Calle Central, OF. 14, Casa de  
TAR., 010000

# VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA ESPACIO-TEMPORAL EN LA CUENCA ANDINA DEL RÍO BENI

## CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.	1
1.1.	JUSTIFICACIÓN Y ANTECEDENTES.	2
1.2.	FINES.	4
1.3.	ESTADO DEL ARTE.	5
1.4.	OBJETIVO GENERAL.	6
1.5.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	6
1.6.	ALCANCE.	6
2.	ÁREA DE ESTUDIO.	8
2.1.	DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.	8
2.1.1.	Cuenca del Amazonas.	8
2.1.2.	Cuenca del Plata.	9
2.1.3.	Cuenca del Altiplano.	10
2.2.	UBICACIÓN GEOGRÁFICA.	10
2.3.	CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA.	11
2.3.1.	Delimitación de la cuenca.	11
2.3.2.	Geología y zonas de vida.	12
2.3.3.	Cobertura vegetal.	13
2.4.	SISTEMA HIDROGRÁFICO.	14
2.5.	CLIMA.	16
3.	DATOS Y MÉTODOS.	19
3.1.	DATOS.	19
3.1.1.	Datos hidroclimáticos.	19
3.1.2.	Índices climáticos.	19
3.1.3.	Datos de reanálisis.	22
3.2.	MÉTODOS.	23
3.2.1.	Vector Regional.	23
3.2.2.	Análisis de componentes principales.	25
3.2.3.	Pruebas de homogeneidad en series temporales.	27
3.2.4.	Teoría de ondeletas (wavelets).	28

3.2.5.	Correlación espacial y temporal.....	29
3.2.6.	Metodología. ....	30
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
4.1.	VARIABILIDAD CLIMÁTICA.....	32
4.1.1.	Vector regional.....	32
4.1.2.	Análisis de componentes principales. ....	35
4.1.3.	Pruebas de homogeneidad en series temporales. ....	37
4.1.4.	Análisis de señales climáticas (método wavelets).....	39
4.1.5.	Correlación espacial y temporal.....	42
4.2.	VARIABILIDAD HIDROLÓGICA.....	49
4.2.1.	Variabilidad anual (año hidrológico) .....	51
4.2.2.	Variabilidad estacional (Qmax y Qmin) .....	52
4.3.	EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA DE DATOS SATELITALES.....	54
4.3.1.	Análisis de componentes principales. ....	55
4.3.2.	Vector regional.....	58
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	64
6.	REFERENCIAS .....	66
7.	ANEXOS.....	72

## INDICE DE TABLAS.

<b>Tabla 1.</b> Resultados de la prueba de North sometidas a las estaciones terrestres para determinar el número de CP significantes, periodo 1972-2016.....	35
<b>Tabla 2.</b> Correlación entre los índices de los Vectores Regionales y las series de los CP a nivel AH, periodo 1972-2016.....	37
<b>Tabla 3.</b> Resultados de la prueba de Pettitt y Hubert aplicados a los índices de vectores regionales y series de los CP para el periodo 1972-2016.....	38

## ANEXOS

<b>Tabla A1.</b> Lista de estaciones pluviométricas por grupos regionales periodo 1972-2016.	
<b>Tabla A2.</b> Lista de estaciones pluviométricas por grupos regionales periodo 1982-2016.	
<b>Tabla A3.</b> Lista de estaciones pluviométricas por grupos regionales periodo 1999-2016.	
<b>Tabla A4.</b> Matriz de correlaciones Pearson, entre los índices de los vectores regionales, series de los componentes principales e índices climáticos a nivel año hidrológico, periodo 1972-2016.	
<b>Tabla A5.</b> Matriz de correlaciones Pearson, entre los índices de los vectores regionales, series de los componentes principales e índices climáticos para la estación DEF, periodo 1972-2016.	
<b>Tabla A6.</b> Matriz de correlaciones Pearson, entre los índices de los vectores regionales, series de los componentes principales e índices climáticos para la estación MAM, periodo 1972-2016.	
<b>Tabla A7.</b> Matriz de correlaciones Pearson, entre los índices de los vectores regionales, series de los componentes principales e índices climáticos para la estación JJA, periodo 1972-2016.	
<b>Tabla A8.</b> Matriz de correlaciones Pearson, entre los índices de los vectores regionales, series de los componentes principales e índices climáticos para la estación SON, periodo 1972-2016.	
<b>Tabla A9.</b> Correlacion (r) y significancia ( $\alpha$ ) entre series de las CP de estaciones terrestres (EST) y productos satelitales (CHIRPS y MSWEP) a nivel AH y estacional, periodo 1982-2016.	
<b>Tabla A10.</b> Correlacion (r) y significancia ( $\alpha$ ) entre los índices de los grupos regionales de estaciones terrestres (EST) y productos satelitales (CHIRPS y MSWEP) a nivel AH y estacional, periodo 1982-2016.	

## INDICE DE FIGURAS

<b>Fig. 1.</b> Mapa hidrográfico de Bolivia, división de las principales cuencas hidrográficas.....	9
<b>Fig. 2.</b> Ubicación geográfica del área de estudio.....	11
<b>Fig. 3.</b> Mapa orográfico de la cuenca andina del río Beni.....	12
<b>Fig. 4.</b> Mapa de la cobertura vegetal de la cuenca andina del río Beni.....	14
<b>Fig. 5.</b> Mapa de la red hidrográfica y subcuencas principales de la cuenca andina del río Beni.....	15
<b>Fig. 6.</b> Vientos medios a largo plazo a 925 hPa (vectores) y 300 hPa (líneas continuas) y precipitación (sombras) sobre América del Sur.....	17
<b>Fig. 7.</b> Ubicación de los índices climáticos.....	20
<b>Fig. 8.</b> Ejemplo de la transformada wavelet continua (CWT) de a) la serie temporal estandarizada de invierno (DJF) Arctic Oscillation AO (abajo) y su espectro continuo de energía wavelet (arriba) y b) la serie de tiempo del percentil de Baltic maximum sea ice extent record BMI estandarizado (abajo) y su potencia de wavelet continua (arriba). El negro espeso el contorno designa el nivel de significancia del 5 % contra el ruido rojo y el cono de influencia (COI) donde los efectos de borde pueden distorsionar la imagen se muestra como un tono más claro.....	29
<b>Fig. 9.</b> Grupos regionales de precipitación formados con 120 estaciones terrestres, periodo 1972-2016.....	33
<b>Fig. 10.</b> Series temporales de los índices de los Vectores Regionales conformados a nivel AH, periodo 1972-2016 para los grupos regionales La Paz, Norte, Sur y Yungas y periodo 1972-2012 para el grupo regional Noroeste.....	33

<b>Fig. 11.</b> Promedio de las medias calculadas de las estaciones de cada grupo regional a nivel año hidrológico (izquierda). Porcentaje de lluvia durante las estaciones del año (DEF, MAM, JJA y SON), en base al promedio de las medias calculadas a nivel año hidrológico y estacional (derecha).....	34
<b>Fig. 12.</b> Varianza parcial y acumulada de las cuatro primeras CP a nivel AH y estacional (DEF; MAM, JJA y SON), periodo 1972-2016.....	35
<b>Fig. 13.</b> Correlaciones entre estaciones terrestres y CP a nivel AH, periodo 1972-2016.....	36
<b>Fig. 14.</b> Salida del programa Khronostat. Quiebre en el año 1988 identificado por los métodos Pettitt y Hubert para la serie CP1 de estaciones terrestres a nivel año hidrológico.....	38
<b>Fig. 15.</b> Quiebres detectados por los métodos de Pettitt y Hubert periodo 1972-2016 en las series temporales a nivel AH. Las gráficas muestran los quiebres de la Tabla 3 con un año de adelanto indicando el comienzo del segundo periodo de análisis. Un valor de 1 en los índices de VR y el valor de 0 en las series de CP indican el valor normal o promedio anual (año hidrológico), valores por encima indican años lluviosos y valores por debajo indican años secos.....	39
<b>Fig. 16.</b> Transformada wavelet continua (CWT) de los índices de los vectores regionales a nivel AH y estacional (DEF, MAM, JJA y SON). El contorno negro grueso designa el nivel de significancia del 5 % contra el ruido rojo y el cono de influencia (COI) donde los efectos de borde pueden distorsionar la imagen y se muestra con un tono más claro.....	40
<b>Fig. 17.</b> Transformada wavelet continua (CWT) de las series de los CP a nivel AH y estacional (DEF, MAM, JJA y SON), periodo 1972-2016. El contorno negro grueso designa el nivel de significancia del 5 % contra el ruido rojo y el cono de influencia (COI) donde los efectos de borde pueden distorsionar la imagen y se muestra con un tono más claro. ....	41
<b>Fig. 18.</b> Secuencia temporal de las anomalías de la temperatura superficial del mar (SST) en el océano Pacifico central, región Niño 3, durante el periodo 1972–2016. Los tonos amarillos representan las épocas cálidas (Niño) y los azules, las frías (Niña). ....	42
<b>Fig. 19.</b> Correlación entre los índices de los vectores regionales de precipitación y la SST a nivel AH y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) para el periodo 1972-2016, solo se trazan valores de $p < 0,05$ . El valor de la correlación se muestra a la derecha en una paleta de colores entre rojo (+1) y azul (-1).....	43
<b>Fig. 20.</b> Correlación entre las cuatro primeras series estandarizadas de los componentes principales de la precipitación y la SST a nivel AH y estacional (DEF, MAM, JJA y SON), solo se trazan valores de $p < 0,05$ . El valor de la correlación se muestra a la derecha en una paleta de colores entre rojo (+1) y azul (-1).....	44
<b>Fig. 21.</b> Correlación de los vectores regionales La Paz, Sur y la CP3 contra la SST a nivel AH y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) considerando dos periodos correspondientes al año del quiebre, solo se trazan valores de $p < 0,05$ . El valor de la correlación se muestra a la derecha en una paleta de colores entre rojo (+1) y azul (-1).....	47
<b>Fig. 22.</b> Correlaciones entre las señales climáticas con potencias significativas (bajas frecuencias) de los vectores regionales identificadas por la CWT y la SST, la letra f indica la frecuencia en años de la serie estandarizada filtrada (adimensional), solo se trazan valores de $p < 0,05$ . El valor de la correlación se muestra a la derecha en una paleta de colores entre rojo (+1) y azul (-1).....	49
<b>Fig. 23.</b> Mapa de subcuencas y microcuencas en la cuenca andina del río Beni. Ubicación de 12 estaciones hidrológicas. Estaciones pluviométricas por grupo regional.....	50
<b>Fig. 24.</b> Correlaciones entre series de caudal (Q) de estaciones hidrológicas y la SST a nivel año hidrológico, solo se trazan valores de $p < 0,05$ . El valor de la correlación se muestra a la derecha en una paleta de colores entre rojo (+1) y azul (-1).....	51
<b>Fig. 25.</b> Correlación entre: descarga en 12 estaciones hidrológicas con descarga media para los dos meses con descarga máxima (Qmax) y SST (DEF); descarga en las estaciones hidrológicas con descarga media para los dos meses con descarga mínima (Qmin) y SST (JJA). Solo se trazan valores de $p < 0,05$ . El valor de la correlación se muestra a la derecha en una paleta de colores entre rojo (+1) y azul (-1).....	53

<b>Fig. 26.</b> Conformación de grupos regionales con datos pluviométricos de productos satelitales. a) datos CHIRPS_G periodo 1982-2016 con 160 pixeles, b) datos MSWEP_G periodo 1982-2016 con 231 pixeles y c) datos TRMM_G periodo 1999-2016 con 150 pixeles.....	55
<b>Fig. 27.</b> Series estandarizadas de las tres primeras CP de las estaciones terrestres (EST) y los productos satelitales (CHIRPS y MSWEP) a nivel año hidrológico y estacional para el periodo 1982-2016 y sus correlaciones respecto a las series de EST.....	56
<b>Fig. 28.</b> Varianza parcial de las cuatro primeras CP (AH) de estaciones terrestres (EST) y productos satelitales (CHIRPS y MSWEP), periodo 1982-2016.....	57
<b>Fig. 29.</b> Índices de los vectores regionales (AH) de estaciones terrestres (EST) y productos satelitales (MSWEP y CHIRPS), periodo 1982-2016 y sus correlaciones respecto a los índices de EST.....	58
<b>Fig. 30.</b> Índices de los vectores regionales (DEF) de estaciones terrestres (EST) y productos satelitales (MSWEP y CHIRPS), periodo 1982-2016 y sus correlaciones respecto a los índices de EST.....	59
<b>Fig. 31.</b> Índices de los vectores regionales (MAM) de estaciones terrestres (EST) y productos satelitales (MSWEP y CHIRPS), periodo 1982-2016 y sus correlaciones respecto a los índices de EST.....	59
<b>Fig. 32.</b> Índices de los vectores regionales (JJA) de estaciones terrestres (EST) y productos satelitales (MSWEP y CHIRPS), periodo 1982-2016 y sus correlaciones respecto a los índices de EST.....	60
<b>Fig. 33.</b> Índices de los vectores regionales (SON) de estaciones terrestres (EST) y productos satelitales (MSWEP y CHIRPS), periodo 1982-2016 y sus correlaciones respecto a los índices de EST.....	60
<b>Fig. 34.</b> Correlación entre la SST (DEF) y las series (DEF) de: la CP1 y los vectores regionales La Paz, Sur, Noroeste, Norte y Yungas de estaciones terrestres (EST) y productos satelitales (CHIRPS y TRMM), periodo 1982-2016.....	61
<b>Fig. 35.</b> Correlación entre la SST (DEF) y las series (DEF) de: la CP1 y los vectores regionales La Paz, Sur, Noroeste, Norte y Yungas de estaciones terrestres (EST) y productos satelitales (CHIRPS y TRMM), periodo 1982-2016.....	62
<b>Fig. 36.</b> Grupo regional Chapare formado con el PPS MSWEP sobre la cuenca andina del río Beni. Correlación entre el VR Chapare y la SST (arriba), Transformada wavelet continua (CWT) (medio) e índices del vector regional (abajo) a nivel AH y estacional, periodo 1982-2016.....	63
<b>Fig. 37.</b> Grupo regional Chapare formado con el PPS CHIRPS sobre la cuenca andina del río Beni. Correlación entre el VR Chapare y la SST (arriba), Transformada wavelet continua (CWT) (medio) e índices del vector regional (abajo) a nivel AH y estacional, periodo 1982-2016.....	63

## ANEXOS

- Fig. A1.** Series temporales de los índices de los vectores regionales a nivel AH y estacional (DEF, MAM, JJA y SON).
- Fig. A2.** Series estandarizadas y varianza que explican las cuatro primeras componentes principales a nivel AH y estacional, periodo 1972-2016.
- Fig. A3.** Correlaciones entre estaciones terrestres pluviométricas y las componentes principales a nivel año hidrológico y estacional, periodo 1972-2016.
- Fig. A4.** Correlación de la CP1, CP2 y el grupo regional Norte contra la SST a nivel AH y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) tomando en cuenta los quiebres, solo se trazan valores de  $p < 0,05$ . El valor de la correlacion se muestra a la derecha en una paleta de colores entre rojo (+1) y azul (-1).
- Fig. A5.** Correlaciones entre series de caudal (Q) y la SST a nivel año hidrológico, solo se trazan valores de  $p < 0,05$ . El valor de la correlacion se muestra a la derecha en una paleta de colores entre rojo (+1) y azul (-1).

**Fig. A6.** Correlación entre: descarga de estaciones hidrológicas con descarga media para los dos meses con descarga máxima (Qmax) y SST (DEF); descarga en las estaciones hidrológicas con descarga media para los dos meses con descarga mínima (Qmin) y SST (JJA). El periodo de analisis se muestra para estación hidrológica. Solo se trazan valores de  $p < 0.05$ . El valor de la correlacion se muestra a la derecha en una paleta de colores entre rojo (+1) y azul (-1).

**Fig. A7.** Varianza parcial de las cuatro primeras CP de estaciones terrestres (EST) y productos satelitales (CHIRPS y MSWEP) a nivel estacional, periodo 1982-2016.

**Fig. A8.** Comparación entre las series estandarizadas de las cuatro primeras CP de las estaciones terrestres (EST) y el producto satelital TRMM para el periodo 1999-2016. La tabla muestra las correlaciones y sus significancias a nivel AH y estacional.

**Fig. A9.** Comparación entre los indices de los grupos regionales de las estaciones terrestres (EST) y el producto satelital TRMM, para el periodo 1999-2016. La tabla muestra las correlaciones y sus significancias a nivel AH y estacional.

**Fig. A10.** Comparacion de SST, transformada wavelet continua (CWT), y series temprales (VR y CP) entre estaciones terrestres (EST) y PPS (CHIRPS y MSWEP) durante DEF y JJA, periodo 1982-2016.

**Fig. A11.** Comparacion de SST, transformada wavelet continua (CWT), y series temprales (VR y CP) entre estaciones

# VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA ESPACIO-TEMPORAL EN LA CUENCA ANDINA DEL RÍO BENI

## 1. INTRODUCCIÓN.

El clima es un factor ambiental que comúnmente se define como el estado medio de la atmósfera que representa las condiciones predominantes en un lugar, en una región o en el planeta entero, durante un período determinado (varios meses, años). El clima de la Tierra depende del equilibrio radiativo que está controlado por factores radiativos forzantes, por factores determinantes y por la interacción entre los diferentes componentes del sistema climático (Serna 2013).

El clima varía en escalas de tiempo y espacio. A través de los años, desde épocas remotas, se han presentado fluctuaciones del clima en diversas escalas de tiempo. Tales fluctuaciones se originan, generalmente, por modificaciones en la forma de interacción entre los distintos componentes del sistema climático y por cambios en los factores radiativos forzantes (Pabón 1997). La variabilidad climática se refiere a las fluctuaciones observadas en el clima durante períodos de tiempo relativamente cortos. Durante un año en particular, se registran valores por encima o por debajo de lo normal. La Normal Climatológica o valor normal, se utiliza para definir y comparar el clima y generalmente representa el valor promedio de una serie continua de mediciones de una variable climatológica durante un período de por lo menos 30 años. A la diferencia entre el valor registrado de la variable y su promedio se le conoce como Anomalía. La secuencia de estas oscilaciones alrededor de los valores normales, se conoce como variabilidad climática y su valoración se logra mediante la determinación de las anomalías (Montealegre 2009). Dentro de las escalas temporales de la variabilidad climática, las siguientes se consideran las de mayor importancia en la determinación y modulación de procesos atmosféricos:

**Estacional.** A esta fase corresponde la fluctuación del clima a escala mensual (trimestral). La determinación del ciclo anual de los elementos climáticos es una fase fundamental dentro de la variabilidad climática a este nivel. En latitudes medias, la secuencia de las estaciones de invierno, primavera, verano y otoño es algo común para los habitantes de dichas regiones, en tanto que en latitudes tropicales, lo frecuente es la alternancia de temporadas lluviosas y temporadas secas.

**Intraestacional.** Existen evidencias que dentro de las estaciones se presentan perturbaciones que determinan las condiciones de tiempo durante decenas de días. La mayoría de las veces estas oscilaciones pasan desapercibidas porque su amplitud es pequeña, en comparación con las del ciclo anual. Dentro de las oscilaciones intraestacionales se destaca una señal de tipo ondulatorio, denominada de 30-60 días. Ésta ha sido detectada en la actividad convectiva en el Pacífico Tropical Oriental y en la precipitación de esta región y de la América Tropical.

**Interanual.** A esta escala corresponden las variaciones que se presentan en las variables climatológicas de año en año. Normalmente percibimos que la precipitación de la estación lluviosa en un determinado lugar, no siempre es la misma de un año a otro, sino que fluctúa por encima o por debajo de lo normal. Ejemplos típicos de la variabilidad climática interanual corresponden a los fenómenos enmarcados dentro del ciclo El Niño - La Niña - Oscilación del Sur (ENSO) y la Oscilación Cuasibienal, la cual corresponde a una oscilación de largo plazo en la

dirección del viento zonal de la baja y media estratósfera ecuatorial, con un período irregular que varía entre 20 y 35 meses; en cada lapso se alternan los vientos de componente este con los del oeste. Por lo general, el estudio de variabilidad interanual se realiza sobre ciclos climáticos o hidrológicos que son diferentes al inicio y final de un año calendario.

**Interdecadal.** En esta escala se manifiestan fluctuaciones del clima a nivel decadal. Comparativamente con la variabilidad interanual, la amplitud de estas oscilaciones es menor. Ésta es una de las razones por las cuales este tipo de variabilidad pasa desapercibida para el común de la gente.

Se ha optado por la precipitación como la variable fundamental de este estudio, porque este parámetro es en definitiva, el elemento climatológico que caracteriza el denominado estado del tiempo atmosférico y de su comportamiento depende el desarrollo de un sin número de actividades de trascendencia económica para el país. La variabilidad de la precipitación, incluidas sus fluctuaciones extremas: excesos (inundaciones) y déficits (sequías) afecta de forma directa y muchas veces catastrófica la actividad humana, produciendo impactos no solo en la economía sino también en el ambiente y en la sociedad en general. Una forma de mitigar o reducir tales impactos es a través del conocimiento previo de sus fluctuaciones y tendencias con anticipación de meses.

En este trabajo se estudia la variabilidad hidroclimática regional de la precipitación y del escurrimiento (caudales) asociada con procesos físico-atmosféricos a los océanos del Pacífico y el Atlántico en la cuenca andina del río Beni. Se pretende identificar y analizar la variabilidad estacional, interanual y decadal de la precipitación en relación con los procesos relacionados con la temperatura superficial del océano, usando varios índices climáticos y realizando un proceso exploratorio de las causas de esa variabilidad. Identificadas dichas relaciones se puede realizar una predicción climática con el propósito de contribuir con un método objetivo para mejorar las actuales técnicas de predicción estacional, aprovechando la información que ofrecen los centros internacionales especializados sobre la evolución y el comportamiento de la estructura térmica de los océanos, con anticipación de meses.

## **1.1.JUSTIFICACIÓN Y ANTECEDENTES.**

La cuenca andina del río Beni tiene una gran diversidad geográfica y climática, además de un potencial hidroenergético de alrededor de 22.000 MW, del que apenas se explota el 1.5% para abastecer de energía a la ciudad de La Paz (Molina 2000). Ocupa porciones de los departamentos de Beni, Cochabamba y La Paz, siendo uno de los principales sistemas hídricos del país. El Gobierno nacional a través de la Empresa Nacional de Electricidad (ENDE) se encuentra estudiando en esta cuenca el megaproyecto Chepete-Bala, junto a varios proyectos hidroeléctricos de mediano tamaño y menor impacto ambiental, uno de los cuales ya está en fase de construcción: Miguillas de 202 MW. Recientemente el Estudio de Potencial hidroeléctrico de Bolivia - Segunda Fase (CNDC, 2018) identificó nuevamente a la cuenca del río Beni como la de mayor potencial hidroeléctrico del país. Cuatro de los diez proyectos hidroeléctricos priorizados por ese estudio se encuentran en la cuenca andina de este río, incluyendo los dos proyectos con los costos de generación más bajos.

El embalse del proyecto Chepete tendrá el nivel máximo extraordinario en la cota 400 msnm, nivel normal de operación cota 390 msnm en el vertedero y nivel mínimo de operación en la cota 321,35 msnm. El embalse máximo extraordinario en la cota 400 msnm, tendrá una superficie de inundada de 679,98 Km<sup>2</sup> y un volumen de 37,78 km<sup>3</sup>. El volumen normal de operación en el nivel 390 msnm tendrá una superficie inundada de 595,28 km<sup>2</sup> y volumen de 31,43 Km<sup>3</sup>. El volumen mínimo de operación en el nivel de 321,35 msnm, inundará una superficie de 195,06 Km<sup>2</sup> con volumen de 5,53 Km<sup>3</sup> (ENDE 2016). El Bala es un proyecto situado a 2,5 Km aguas abajo del angosto El Bala. Este proyecto aprovechará las aguas reguladas y de rebose del proyecto superior Chepete, además de las aguas entre estos dos sectores, siendo el caudal de diseño de la central de 2.400 m<sup>3</sup>/s. El nivel máximo extraordinario del embalse, estará en la cota 220 msnm donde se inundarían 92,88 Km<sup>2</sup>. El nivel normal de operación es la cota 218,50 msnm, inundando un área de 66,64 km<sup>2</sup> (ENDE 2016). Actualmente este proyecto tiene conflictos entre los indígenas de esta región y el gobierno, la UMSA a petición de los mismos indígenas, realizó un análisis sobre el Estudio de Identificación (EI) realizada por ENDE determinando inviable el proyecto Chepete-Bala, dando justificaciones sobre aspectos ambientales, técnicos y otros. Además de su potencial hidroeléctrico, la cuenca alberga la región de mayor biodiversidad y endemismo del país, así como parques nacionales de importancia mundial, como el Madidi (Pauquet 2005). Presenta también una gran diversidad climática y geográfica, junto con las cadenas montañosas más importantes de Bolivia: la Cordillera Real y la de Apolobamba, así como la ciudad de La Paz, sede del Gobierno boliviano. Por todo esto tiene también un enorme potencial para el turismo. El estudio de esta cuenca es por tanto de gran interés económico, social, ambiental además de científico.

El conocimiento del clima y su variabilidad a nivel espacial y temporal es fundamental para diversos estudios de cambios e impactos en los ecosistemas, medio ambiente y actividades socio-culturales y económicas en nuestro planeta. El clima y la hidrología son fenómenos naturales que influyen en la configuración físico-geográfica de una región, ya que modelan el relieve y determinan la distribución del agua para el beneficio de los seres vivos. La variabilidad climática y la ocurrencia de eventos extremos (inundaciones, sequías, etc.) resulta en perjuicios muy importantes para diferentes sectores en Bolivia, especialmente el sector agropecuario que requiere de varios años para recuperarse económica y financieramente de los impactos.

El relativo desconocimiento y falta de información sobre la variabilidad espacial y temporal del clima y la hidrología de la cuenca del río Beni motivan este proyecto de grado. Además del interés científico, los avances en esta área serían de gran ayuda para el pronóstico estacional, los sistemas de alerta de sequías y contribuirían grandemente a mejorar el balance hídrico de la cuenca, que hasta la fecha permanece relativamente indeterminado (Builes & Poveda 2018). Será también un aporte a la comprensión de la biogeografía y diversidad biótica de la región. El trabajo se llevó a cabo en el marco del proyecto PHYBAAM (Procesos Hidrológicos en Cuencas Andino-Amazónicas), que lleva a cabo el Instituto de Hidráulica e Hidrología de la UMSA en cooperación con el Institut de recherche pour le développement (IRD) (Molina *et al.* 2017b).

En la región existen estudios climatológicos e hidrológicos precedentes como:

Campos (1992), realizó un estudio Climatológico de la cuenca andina del río Beni con datos mensuales 1972-1990.

Carrasco (1992), elaboró un estudio hidrológico del régimen de escurrimiento superficial en la Cuenca Andina del Río Beni.

Coritza (2017), realizó un estudio climatológico de la cuenca del río Beni, basado en información de estaciones meteorológicas. Elaboró y validó una base de datos climáticos en Hydraccess.

López (2017), realizó un estudio de la precipitación en la cuenca del río Beni, basado en información satelital GSMAP. Elaboró y validó una base de datos climáticos grillados.

Alejo (2017), realizó un estudio sobre el Análisis de la información hidrométrica y régimen hidrológico en la cuenca andina del río Beni.

Noriega (2018), realizó la evaluación y tratamiento estadístico de datos de precipitación de los productos TRMM y CHIRPS para la cuenca andina del río Beni.

Farfán (2019), creó una base de datos climáticos consistente y homogénea de la cuenca andina del río Beni, mediante el análisis de calidad y homogeneización de datos terrestres de precipitación, temperatura máxima y mínima.

## **1.2.FINES.**

Estudiar la variabilidad espacial y temporal del clima e hidrología de una cuenca tan diversa como la del río Beni, es un desafío científico que además tiene muchas aplicaciones prácticas, como:

- a) la relación entre la gran variabilidad hidroclimática espacial y la orografía de la región;
- b) la regionalización climática;
- c) el estudio de la relación entre la variabilidad temporal con fenómenos de escala global como ENSO<sup>1</sup>, PDO o TNA;
- d) la predicción estacional como herramienta de prevención y planificación.

Por otro lado este estudio pretende identificar las causas de esa variabilidad intrarregional a escalas de tiempo anual correspondiente al año hidrológico (septiembre-agosto) y estacional (primavera, verano, otoño, invierno), que corresponden a épocas de transición/inicio, lluvia, de transición y época seca respectivamente.

Otro aporte que tendrá este proyecto es la validación de los datos satelitales de precipitación (CHIRPS<sup>2</sup>, MSWEP<sup>3</sup> y TRMM<sup>4</sup>) con un enfoque específico sobre la variabilidad climática para la cuenca andina del río Beni en relación a índices climáticos.

---

<sup>1</sup> ENSO, El Niño - Oscilación del Sur.

<sup>2</sup> CHIRPS, Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data.

<sup>3</sup> MSWEP, Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation.

El presente estudio será de gran utilidad para proyectos y estudios futuros en la cuenca del río Beni.

### 1.3.ESTADO DEL ARTE.

En los últimos años se han llevado a cabo estudios de variabilidad climática en muchos lugares del mundo con el objeto de evaluar la variabilidad espacio temporal de la hidroclimatología en una determinada región y sus causas (CONAMA 2006, Espinoza *et al.* 2009, Bidegain *et al.* 2012, Alzate *et al.* 2015, IDEAM-UNAL 2018). Es un tema innovador, cuyos resultados se usan para predecir con cierto grado de confianza el comportamiento del clima. Se emplean también datos de reanálisis, que a su vez usan los resultados más recientes de modelos avanzados de reconstrucción de variables climáticas a escala global con la aplicación extensiva de técnicas de asimilación de datos.

La cuenca andina del río Beni ha sido el objeto de numerosas investigaciones y fenómenos climáticos de los últimos años. El aumento de la frecuencia de fenómenos hidrológicos extremos en diferentes regiones de la cuenca del Amazonas durante estos últimos 15 años (sequías sin precedente en 2005 y 2010, fuertes lluvias e inundaciones históricas en 2009 y 2012) llama la atención a los hidrólogos amazónicos. Los cambios medioambientales regionales y globales podrían así tener consecuencias sobre el río más grande del mundo. El estudio de la crecida del 2014 en la cuenca del río Madeira llegó a la conclusión de que fueron precipitaciones excepcionalmente fuertes en el pie de monte y las llanuras del Beni las responsables de la intensidad de la crecida del año 2014 (Vauchel 2014, Espinoza *et al.* 2014).

Recientemente se presentó una caracterización del clima de los Andes húmedos y su variabilidad espacial, con énfasis en el rango altitudinal de 2.000 a 4.000 m. Mediante el análisis de registros climáticos diarios y horarios se logró identificar los procesos atmosféricos dominantes en la cuenca andina del río Beni y los Yungas de La Paz. Se halló que la mayor parte de los múltiples máximos lluviosos en el subandino y Yungas son consecuencia de la interacción entre el flujo sudamericano de bajo nivel (SALLJ<sup>5</sup>, por sus siglas en inglés) y la compleja orografía regional. (Molina-Carpio *et al.* 2019).

El presente estudio es el primero que se realizó sobre la variabilidad de la precipitación y el escurrimiento a nivel estacional sobre la cuenca del río Beni. Es también el primero que usa extensivamente datos de reanálisis de temperatura superficial del mar (SST<sup>6</sup>, por sus siglas en inglés) e índices climáticos globales para identificar las causas probables de la variabilidad hidroclimática en esta cuenca a escala detallada. Se usarán métodos avanzados para el análisis de series temporales, a través de programas computacionales como: el Hydraccess, Rstudio, Matlab, Khronostat y SPSS Statistics.

---

<sup>4</sup> TRMM, Tropical Rainfall Measuring Mission.

<sup>5</sup> SALLJ, South American Low Level Jet.

<sup>6</sup> SST, Sea Surface Temperature.

#### **1.4.OBJETIVO GENERAL.**

Estudiar la variabilidad hidroclimática espacio-temporal en la cuenca andina del río Beni y sus posibles causas.

#### **1.5.OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

Los objetivos específicos del estudio en las regiones de la cuenca andina del río Beni, son:

- Realizar la regionalización pluviométrica con datos terrestres homogenizados y de satélite.
- Evaluar la consistencia de datos satelitales (TRMM, CHIRPS y MSWEP), para describir la variabilidad temporal de la precipitación, contrastados con los datos terrestres de estaciones pluviométricas.
- Analizar la variabilidad espacial y temporal de la precipitación y sus probables causas en relación al comportamiento climático global.
- Analizar la variabilidad espacial y temporal de las series hidrológicas y sus probables causas en relación al comportamiento climático global.

#### **1.6.ALCANCE.**

##### **Series de precipitación (P).**

- Aplicar el método del vector regional a los datos de precipitación a nivel de año hidrológico de estaciones terrestres y datos satelitales, para evaluar regiones con un mismo comportamiento pluviométrico. Las estaciones de cada grupo deben tener correlaciones aceptables mayores o iguales a 0,7, para ser una región pluviométrica homogénea aceptable. Obtener los índices de cada vector regional tanto a nivel año hidrológico (SEP-AGO) como estacional (DEF, MAM, JJA y SON).
- Comparar a nivel año hidrológico y estacional los índices de los vectores de precipitación de estaciones terrestres con los obtenidos de productos satelitales para un mismo periodo de tiempo, 1982-2016 para CHIRPS y MSWEP, 1999-2016 para TRMM.
- Correlacionar los índices de los vectores de la cuenca con los índices climáticos: NIÑO 1+2<sup>7</sup>, NIÑO 3.4<sup>8</sup>, NIÑO 3<sup>9</sup>, NIÑO 4<sup>10</sup>, C y E, SOI<sup>11</sup>, AMM<sup>12</sup>, PDO<sup>13</sup>, MEI<sup>14</sup>, AMO<sup>15</sup> no suavizada, AMO suavizada, TNA<sup>16</sup> y TSA<sup>17</sup>.

---

<sup>7</sup> NIÑO 1+2, Extreme Eastern Tropical Pacific SST.

<sup>8</sup> NIÑO 3.4, East Central Tropical Pacific SST.

<sup>9</sup> NIÑO 3, Eastern Tropical Pacific SST.

<sup>10</sup> NIÑO 4, Central Tropical Pacific SST.

<sup>11</sup> SOI, Southern Oscillation Index.

<sup>12</sup> AMM, Atlantic Meridional Mode.

<sup>13</sup> PDO, Pacific Decadal Oscillation Index.

<sup>14</sup> MEI, Multivariate ENSO Index.

<sup>15</sup> AMO, Atlantic multidecadal Oscillation.

<sup>16</sup> TNA, North Tropical Atlantic SST Index.

<sup>17</sup> TSA, South Tropical Atlantic SST Index.

- Aplicar el análisis de componentes principales (CP) a las series de precipitación de estaciones terrestres (con mayor periodo de registro) y de satélite a nivel estacional y de año hidrológico.
- Comparar las series de los CP de precipitación de estaciones terrestres con las satelitales sobre un periodo común, 1982-2016 para CHIRPS y MSWEP, 1999-2016 para TRMM a nivel año hidrológico y estacional.
- Correlacionar las series de los CP con los índices climáticos: NIÑO 1+2, NIÑO 3.4, NIÑO 3, NIÑO 4, C, E, SOI, AMM, PDO, MEI, AMO no suavizada, AMO suavizada, TNA y TSA.
- Realizar un análisis de quiebres de los índices de los vectores regionales y de las series de los CP de las estaciones terrestres para el periodo 1972-2016.
- Correlacionar los datos reanálisis de la temperatura superficial del mar (SST) con los índices de los vectores, las series de los CP de las estaciones terrestres y los datos satelitales a nivel año hidrológico y estacional, aplicando una significancia de 0,05.
- Comparar las correlaciones SST de los índices de los vectores regionales y series de los CP de las estaciones terrestres respecto a las estaciones satelitales.
- Analizar los índices de los vectores regionales y las series de los CP aplicando el método de la transformada de ondícula (wavelets).

#### **Series hidrológicas (Q).**

- Realizar un análisis de quiebres de las series de caudales de las estaciones hidrométricas.
- Correlacionar las series de caudales de la cuenca con los índices climáticos: NIÑO 1+2, NIÑO 3.4, NIÑO 3, NIÑO 4, C, E, SOI, AMM, PDO, MEI, AMO no suavizada, AMO suavizada, TNA y TSA.
- Correlacionar las series de caudales con datos reanálisis de la temperatura superficial del mar (SST) a nivel año hidrológico, aplicando una significancia de 0,05.
- Correlacionar las series de caudal máximo (Qmax) y caudal mínimo (Qmin) con datos reanálisis de la temperatura superficial del mar (SST) para las estaciones DEF y JJA respectivamente, aplicando una significancia de 0,05.
- Analizar las series de caudales aplicando la transformada de ondícula (wavelets)

## 2. ÁREA DE ESTUDIO.

### 2.1.DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El sistema hidrográfico de Bolivia comprende tres grandes cuencas: la cuenca Amazónica ubicada entre los 9°38' a 20°30' de latitud sur y 59°58' a 69°30' de longitud oeste, con una extensión aproximada de 724.000 km<sup>2</sup>, ocupando el 65,9 % del territorio nacional; la cuenca cerrada o endorreica ubicada entre los 14°38' a 22°58' de latitud sur y 66°14' a 69°40' de longitud oeste, cubriendo 145.081 km<sup>2</sup> de superficie (13,2 %) y por último, la vertiente del Plata que abarca 229.500 km<sup>2</sup> (20,9 %) del territorio nacional y situada entre los 18°36' a 22°59' de latitud sur y 57°30' a 66°40' de longitud oeste (Fig. 1) (Mattos & Crespo 2000).

#### 2.1.1. Cuenca del Amazonas.

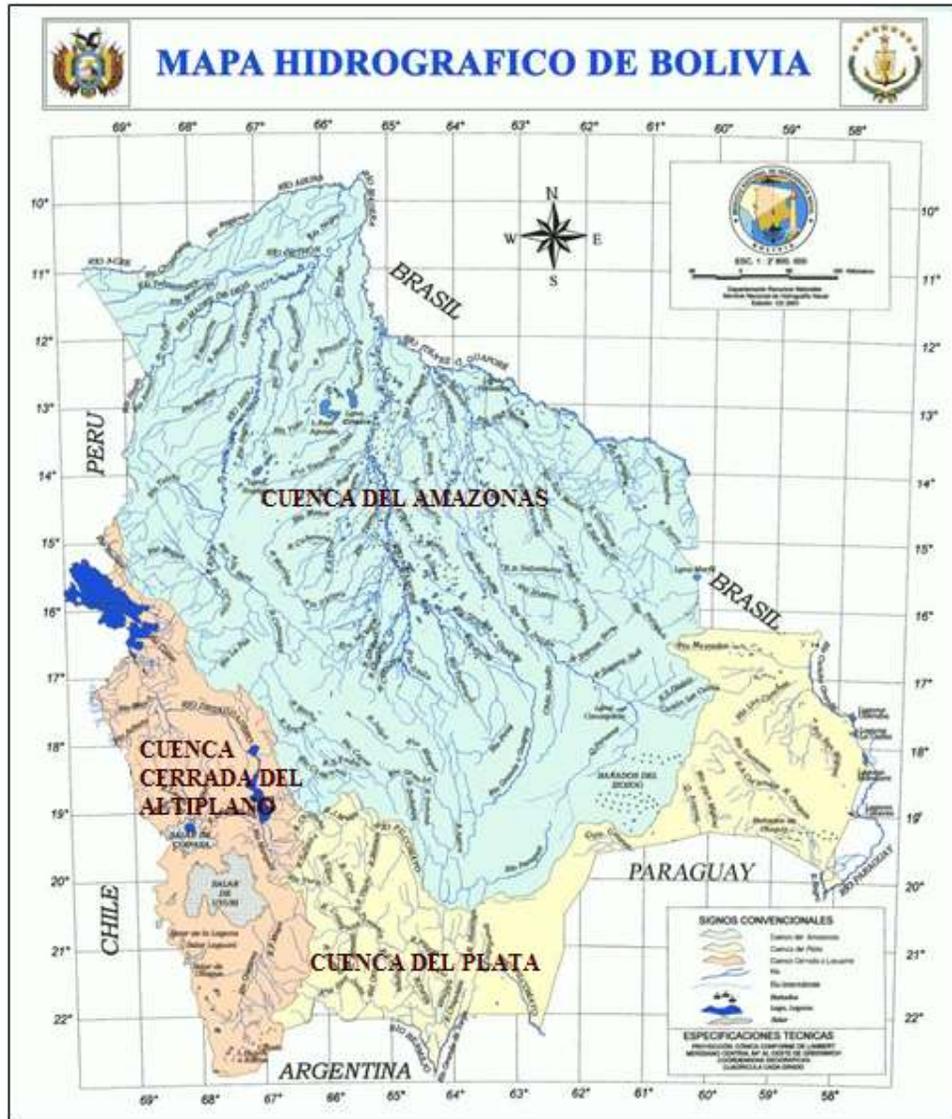
La Cuenca hidrográfica del Amazonas ocupa el 41 % del espacio del continente Sur Americano con una extensión de aproximadamente 6.187.461,09 km<sup>2</sup>, que atraviesa Brasil, Bolivia, Ecuador, Colombia, Perú, Venezuela, Guyana, Guyana Francesa y Surinam. La concepción de la cuenca bajo un criterio hidrográfico permite la inclusión de zonas no consideradas tradicionalmente amazónicas, como las cabeceras de sus ríos, que cumplen un papel importante en el funcionamiento del ecosistema y el ciclo hidrológico dada la cantidad de nexos estructurales y funcionales dentro de este sistema (Rodríguez 2012).

La cuenca Amazónica en Bolivia se encuentra ubicada en el norte del territorio nacional, es la más importante por los volúmenes de agua que fluyen y por ser la más extensa geográficamente. Las principales cuencas de la cuenca Amazónica son:

- Cuenca del río Madeira.
- Cuenca del río Mamoré.
- Cuenca del río Abuná.
- Cuenca del río Beni.
- Cuenca del río Acre.

El río Madeira es el segundo afluente más grande del Amazonas, con una descarga media anual estimada de 31.200 m<sup>3</sup>/ s en su confluencia con el Amazonas (Molinier 1996). La descarga media anual en la estación de Porto Velho, que controla toda la cuenca del Alto Madeira, es calcula como 18.500 m<sup>3</sup>/ s para el período 1967–2013, casi una décima parte de la descarga del río Amazonas en el Océano Atlántico. En Porto Velho, el río drena un área de casi 1 millón de km<sup>2</sup> (aproximadamente un sexto de la superficie de la cuenca del Amazonas), que se caracteriza por un amplio rango de altitud de 50-6.450 msnm. La cuenca del Alto Madeira presenta una amplia gama de características climáticas, geomorfológicas y biológicas. Tres de sus cuatro afluentes principales, el Beni, Madre de Dios y Mamoré, se originan en los Andes e influyen fuertemente en la hidrología, morfología, biogeoquímica y ecología del río Madeira (Guyot 1993, McClain & Naiman 2008). El río Itenez (conocido como Guaporé en Brasil) es el único que proviene del escudo brasileño, que tiene una altitud máxima de 800 m (Molina *et al.* 2017a).

El sector boliviano de la cuenca del río Acre tiene una extensión aproximada de 2.080 Km<sup>2</sup>, ocupa el último lugar en extensión de todas las cuencas del país ya que comprende el 0,2 % de la superficie del territorio nacional y forma parte de la frontera norte con Brasil. Se encuentra situada al noreste de Bolivia, en el departamento de Pando. Sus principales afluentes en territorio boliviano son el arroyo Bahía, Arroyo Piapi, arroyo Henohaya y Arroyo San Miguel (Mattos & Crespo 2000).



**Fig. 1.** Mapa hidrográfico de Bolivia, división de las principales cuencas hidrográficas.  
Fuente: Atlas Digital de Bolivia – SNHN.

### 2.1.2. Cuenca del Plata.

El río Bermejo integra la gran cuenca del río de la Plata, que drena las aguas de casi la cuarta parte del continente sudamericano hacia el Océano Atlántico. El Bermejo es un afluente del río Paraguay, el que a su vez desemboca en el río Paraná. Este último fluye hacia el Océano Atlántico a través del río de la Plata. La Alta Cuenca del río Bermejo o Cuenca Activa se halla

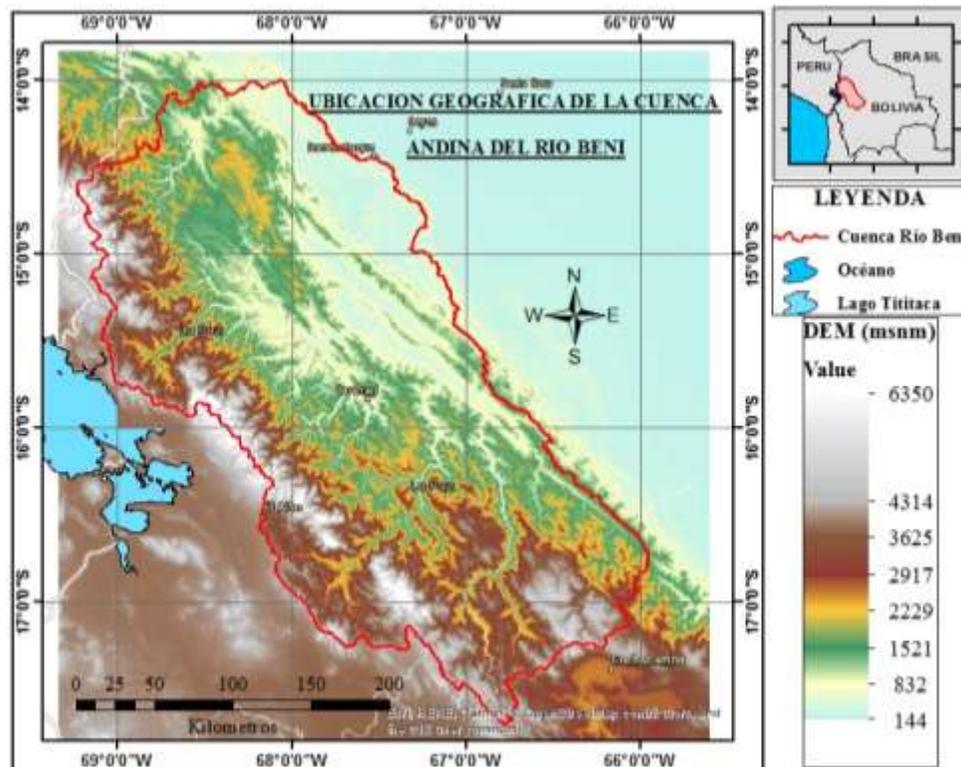
situada en el extremo noroeste de Argentina y extremo sureste de Bolivia. La Cuenca es atravesada por el Trópico de Capricornio y sus coordenadas geográficas extremas son 21°13' y 25°02' latitud sur y 63°47' y 65°46' longitud oeste. El área total medida por la Unidad Técnica del Estudio es de 50.550 km<sup>2</sup> y se divide en dos subcuencas principales de superficie similar: La subcuenca norte, denominada "Tarija - Bermejo", tiene como colector principal al río Bermejo. Es la parte internacional de la Alta Cuenca y su superficie se extiende en los territorios de Argentina (52 %) y de Bolivia (48 %). La subcuenca sur, denominada "Grande - San Francisco", es drenada por el río San Francisco y pertenece totalmente a territorio argentino. A pesar de la similitud de sus áreas de drenaje, dichas subcuencas difieren notoriamente en los respectivos aportes de caudal superficial, correspondiendo el mayor a la subcuenca Tarija - Bermejo, con el equivalente al 71 % del total. Los caudales de ambas se reúnen en la Junta de San Francisco, a partir de la cual escurren hasta su desembocadura en el río Paraguay, utilizando como colector común al río Bermejo en sus tramos medio e inferior (OEA 1974).

### **2.1.3. Cuenca del Altiplano.**

El Altiplano, extenso llano endorreico caracterizado por una elevación entre 3.650 y 3.900 m, está ubicado en los Andes centrales (14° a 22° sur y 66° a 71° oeste), entre las cordilleras orientales y occidentales que culminan a más de 6000 metros de altura. El sistema hídrico del Altiplano se caracteriza por la presencia de dos grandes lagos (Titicaca y Poopó) conectados por el río Desaguadero y dos grandes salares al sur. El río Desaguadero lleva el caudal excedente del lago Titicaca al lago Poopó, del cual es la principal fuente de agua. Esos cuerpos de agua dan origen al acrónimo TDPS (Titicaca-Desaguadero-Poop-Salar de Coipasa) con que se conoce al sistema, cuya superficie es de 144.000 km<sup>2</sup>, excluyendo al Salar de Uyuni y la región altiplánica al sur de este salar. El punto más alto del sistema TDPS es el volcán Sajama (6.542 m) (Pouilly *et al.* 2014). El lago Titicaca, uno de los sistemas hidrológicos del Altiplano, ubicado en la parte de sotavento, recibe 680 mm de lluvia por año, mucho menos que el lado oriental de los Andes. Además, la cuenca del lago Titicaca está caracterizada por un gradiente norte-sur con lluvias que disminuyen desde 800 mm por año (1.300 mm en el lago mismo) hasta 300 mm en el sur, en la región del lago Poopó (Roche *et al.* 1992). El abastecimiento del lago se hace con la lluvia (47 %) y con el agua de los ríos (53 %), principalmente el río Ramis. El lago pierde agua mediante la evapotranspiración (91 %) y el desagua en el río Desaguadero (9 %). La temperatura media anual en la cuenca del lago comprende entre 7 y 10 °C (Roche *et al.* 1992).

## **2.2. UBICACIÓN GEOGRÁFICA.**

La cuenca andina del río Beni está situada entre los paralelos 14°10' - 17°42' de latitud sur y 66°03' - 69°15' de longitud oeste, se extiende sobre una superficie de 70.000 Km<sup>2</sup>, 6,3 % del territorio de Bolivia (Molina-Carpio *et al.* 2017b). Abarcando gran parte del departamento de La Paz, una parte de Cochabamba y una pequeña superficie del Beni (Fig. 2).



**Fig. 2.** Ubicación geográfica del área de estudio. Fuente: Elaboración Propia.

Su topografía es variada, ya que presenta zonas altas o cordilleranas en sus regiones del oeste y del sur, pasando por zonas de transición o valles interandinos, para posteriormente confluir en el subandino, que es el límite natural con el llano beniano. Por todo ello, no resulta extraño que en la cuenca se tengan marcadas diferencias de altitud, desde los 6.450 m en el Nevado Illimani, hasta los 200 m en el Angosto del Bala (Molina-Carpio *et al.* 2019).

## 2.3. CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA.

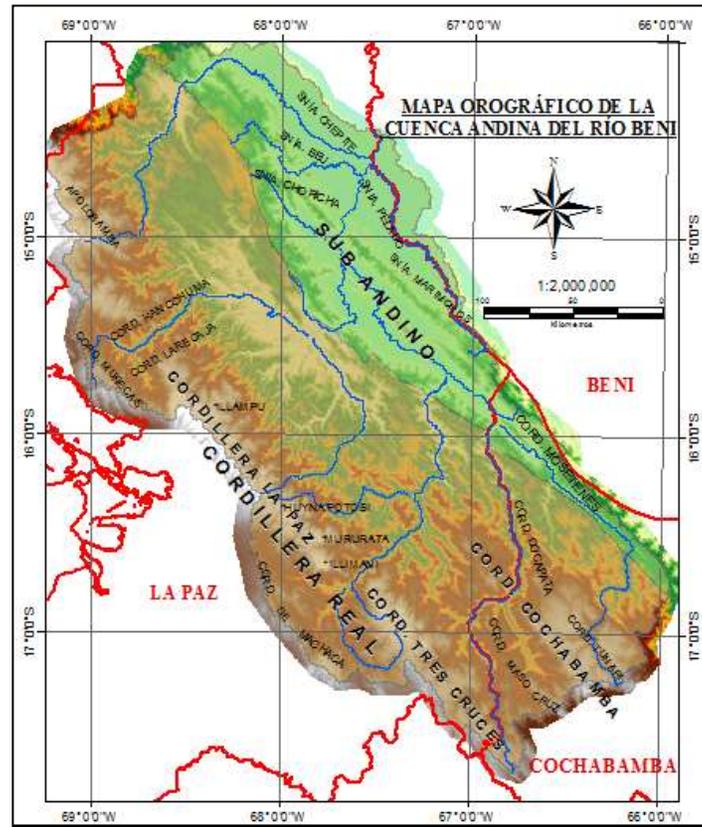
### 2.3.1. Delimitación de la cuenca.

La delimitación de la cuenca andina del río Beni se realizó en base el modelo digital de elevaciones SRTM90<sup>18</sup> (CAN 2008). La divisoria de aguas o de contorno de la cuenca vertiente se halla constituida por las configuraciones orográficas siguientes (Fig. 3):

- A partir del nudo de Apolobamba y en la dirección noroeste, está definida por las cordilleras de Apolobamba, Muñecas y La Paz, en la dirección suroeste está definida por las cordilleras Tres Cruces, Machaca y/o la cordillera Real todos en la misma dirección. También se halla conformada por el Sub Andino, región caracterizada por serranías paralelas, tales como las serranías: Tigre, Eslabón y Chepite y la Cordillera Mosetenes, accidentes orográficos que en su conjunto marcan la división con los llanos orientales.

<sup>18</sup> SRTM90, The Shuttle Radar Topography Mission obtained 90 meter.

- En la dirección noroeste, está constituida por el Sub Andino Norte y en la parte sureste se destacan las Cordilleras de Cochabamba, Cocapata y del Tunari (Alejo 2017).



**Fig. 3.** Mapa orográfico de la cuenca andina del río Beni. Fuente: Alejo 2017.

Las altitudes varían notablemente, siendo el nevado Illimani la máxima elevación con 6.450 msnm, mientras que el Angosto del Bala se sitúa a 200 msnm (Molina-Carpio *et al.* 2019). La altura media es de 2.300 msnm, siendo que la mayor proporción del área está comprendida entre las cotas 1.000 y 2.000 msnm (Campos & Peña 1992).

La variabilidad orográfica de la cuenca es determinante en la definición del régimen climático, puesto que la cuenca andina del río Beni al estar situada en la región sub-tropical, debería responder a las características climáticas de una zona sub-tropical, situación que no es efectiva. Por esta razón se ha empleado el término "topoclimático" que describe y refleja la relación entre clima y topografía que existe en la zona de estudio (Campos & Peña 1992).

### 2.3.2. Geología y zonas de vida.

McQuarrie (2002) dividió la subcuenca en cuatro zonas tectonoestructurales: (1) el Altiplano, una meseta de bajo relieve en rocas cuaternarias; (2) la Cordillera Andina Oriental, un cinturón de empuje que deforma las rocas del Paleozoico inferior; (3) la zona interandina, con una estructura similar a la de la Cordillera Oriental, pero con rocas más jóvenes y deformación a niveles estructurales más altos; y (4) los Sub-Andes, que consisten en pliegues con fallas dentro de las rocas sedimentarias de la parte superior del Terciario.

El clima y la geología dan origen a paisajes muy contrastantes: desde subcuencas semiáridas y altamente erosionables incisas en el Altiplano (río La Paz), hasta subcuencas hiperhúmedas densamente vegetadas en la Cordillera Oriental (valles de los Yungas) y las estribaciones del Alto-Beni en la región Subandina (Guyot 1999). Esos factores también permiten una recarga significativa de agua subterránea en casi el 70 % de la subcuenca, estimada en 100-300 mm/año, deduciendo que el agua subterránea soporta una parte significativa del flujo total de la corriente (Ayes 2019).

La erosión en Angosto del Bala (antigua estación de medición de RU) y RU se estimó en 3.140 y 2.745 t • km<sup>2</sup>/año en dos períodos diferentes, 1984-1989 y 2002-2011, respectivamente; con una carga de sedimento suspendida estimada de casi 212 y 192 Mt/año y una descarga de agua promedio anual (Q) de 1.990 y 2.014 m<sup>3</sup>/s para las mismas ubicaciones y períodos. La carga de sedimentos suspendidos en RU representa el 55 % de la carga de sedimentos del río Beni estimada en la estación de medición a la salida de Cachuela Esperanza para el período 2002-2011. Con respecto a la distribución del tamaño de partícula, el material suspendido parece estar dominado por arenas finas y limos, con una fracción de arcilla que excede el 10 % (Ayes 2019).

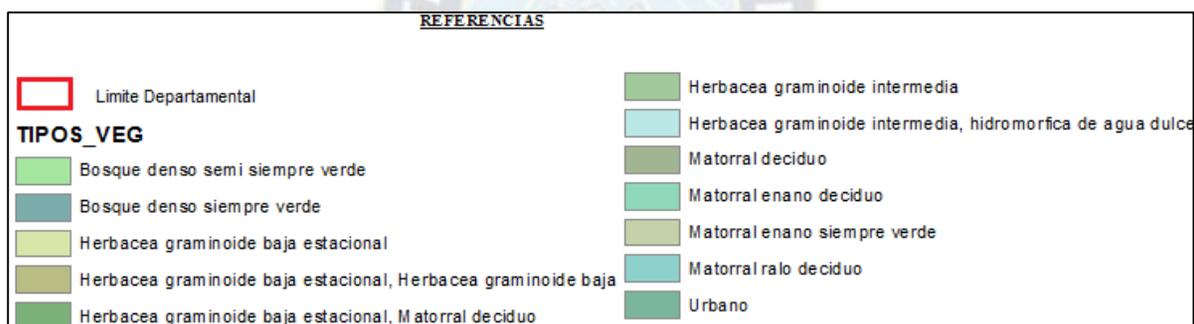
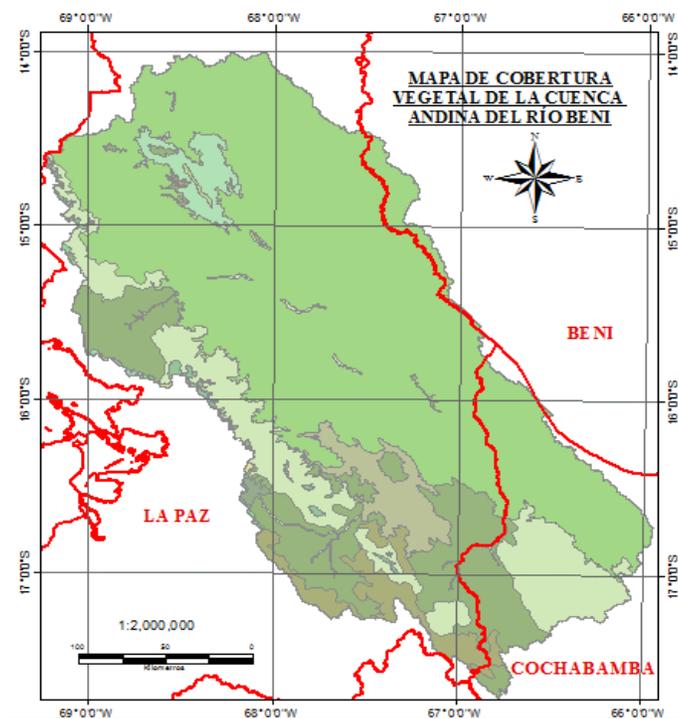
La zona de vida predominante en el área de estudio es la ST=SUBTROPICAL que ocupa dos regiones:

- Región Subtropical de tierras de valles, llamada también "Yungas" y "Faja Subandina", es la más extensa y de ecología más variada en toda la cuenca.
- Región Subtropical Andina, se destacan los valles profundos, valles interandinos y cumbres cordilleranas, muchas de nieves perpetuas, lo que da lugar a numerosos ríos y arroyos.

### **2.3.3. Cobertura vegetal**

De acuerdo a la clasificación hecha en la memoria explicativa de los mapas de cobertura vegetal (Fig. 4) y uso actual del suelo, predomina la vegetación que no pierde su follaje en todo el año excepto durante la floración: "bosques siempre verdes". Es evidente su presencia en serranías y colinas de las alturas intermedias comprendidas entre 500 y 3.000 m generalmente erosionadas, con pendientes que varían de abruptas a moderadas, siendo su participación aproximadamente del 65 % del área total (Guyot 1999).

A medida que se asciende hacia las zonas altas (por encima de los 3.000 msnm) tenemos la presencia de herbácea graminoide baja estacional e intermedia, ocupando un porcentaje aproximado de 2 % del total de la cuenca. Ya en las zonas altas, la cuenca presenta matorrales enanos, deciduos y ralos deciduos, los cuales representan un 31 % de la cuenca. Las zonas urbanas y tierras destinadas al cultivo ocupan una pequeña parte de la cuenca, aproximadamente 2 % (Alejo 2017).



**Fig. 4.** Mapa de la cobertura vegetal de la cuenca andina del río Beni. Fuente: GeoBolivia- Mapa de Unidades de Vegetación de Bolivia 2002.

## 2.4.SISTEMA HIDROGRÁFICO.

Surcada por más de 120 cursos de agua, esta cuenca presenta los siguientes ríos principales: Cotacajes, Santa Elena, La Paz, Tamampaya, Boopi, Alto Beni, Coroico, Mapiri, Kaka, Quendeque, Hondo, Tuichi, Quiquibey y Beni, que definen unidades hidrológicas (Fig. 5).

Los escurrimientos de estos ríos se monitorean con algunas estaciones hidrológicas y sus comportamientos presentan las siguientes características:

Las marcadas variaciones de un año a otro en Santa Rita, se explican por la densidad de drenaje y coeficiente de torrencialidad altos de la sub-cuenca y por hallarse en una zona (como los Yungas), de alta pluviosidad. Los caudales en el Río Kaka son atenuados por la variación gradual de un año a otro en Angosto Quercano, fenómeno que es función del régimen de lluvias y tipo de clima en la zona. Las dos características anteriores unidas al efecto generado por los ríos Tipuani-



## 2.5. CLIMA.

La cuenca andina del río Beni se ubica en la transición Andes-Amazonas, caracterizada por su excepcional diversidad climática. La complejidad topográfica y gran variación altitudinal influyen mucho sobre el clima regional. Por sobre los 5.100 m de altitud la temperatura media está por debajo de cero grados centígrados. La zona Altiplánica al oeste se caracteriza por un clima frío y por ser una de los sectores más húmedos del Plan alto Andino. En la zona Sub andina, la región de los valles presenta un clima cálido y menos húmedo que la región de los Yungas, que se caracteriza por un clima húmedo y templado con bancos de niebla frecuentes en las partes más altas. (Coritza 2017).

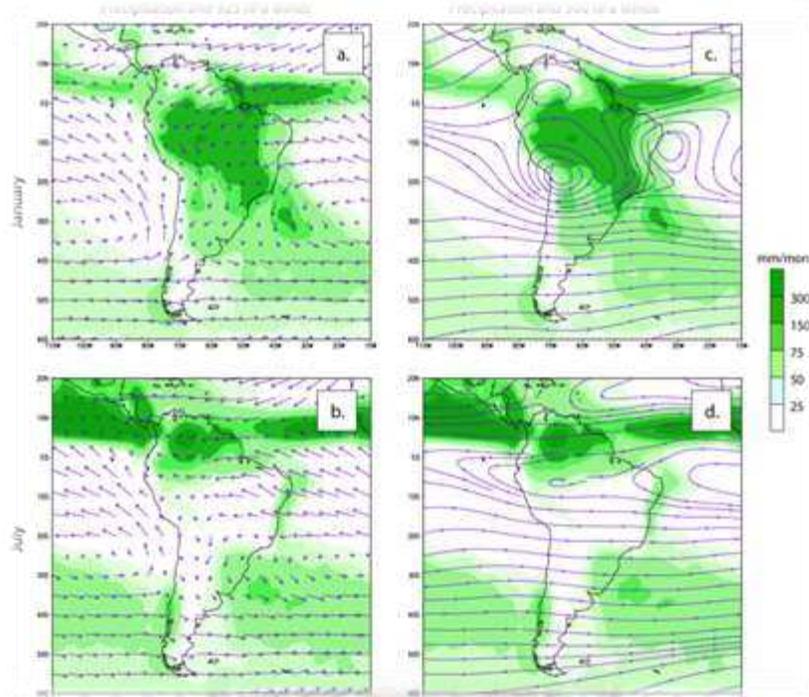
Ubicada en el sector sudoccidental de la Amazonía, la cuenca andina del río Beni tiene al Atlántico tropical como la principal fuente oceánica de humedad, transportada por los vientos alisios de bajo nivel (SALLJ) y reciclada ampliamente por evapotranspiración en la planicie amazónica, que es la principal fuente continental de humedad. Estos vientos se desvían a lo largo de los Andes siguiendo la dirección sureste de la cadena montañosa, llevando humedad hasta la cuenca del Plata. A escala sinóptica el vapor precipitable ingresa al área de estudio por el norte/noroeste. La mayor parte de la precipitación ocurre durante el verano austral, entre diciembre y marzo, coincidiendo con la inflexión hacia el sur de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Al mismo tiempo se observa al sur y sobre el Altiplano la formación de un centro de alta presión (“Alta de Bolivia”) en la troposfera superior. Durante el invierno este anticiclón desaparece y la ZCIT se mueve hacia el norte, lo que coincide con una menor disponibilidad de agua en la atmósfera (Molina-Carpio *et al.* 2019).

La ZCIT se desplaza hacia aproximadamente los lugares de mayor radiación solar durante el año. En el invierno en el hemisferio Sur (Austral), la ZCIT se sitúa hacia el norte del Ecuador y esto origina la estación seca en Bolivia; mientras que en el verano austral el movimiento de dicha zona es hacia el sur y por ende tenemos la estación húmeda en el país. Entonces este fenómeno tiene periodicidad anual. Por lo tanto la circulación atmosférica explica el régimen anual de las precipitaciones y de su distribución espacial en Bolivia (Fig. 6).

Si bien la existencia de un flujo húmedo de bajo nivel (SALLJ) es una condición para que exista alta precipitación orográfica, los procesos atmosféricos locales son también importantes. En el nivel regional y sinóptico, los profundos valles de la ladera oriental andina tienden a canalizar las masas de aire húmedo provenientes de la Amazonía, pero su orientación muy variada y frecuentes cambios de dirección, como es el caso del río Huarinilla-Coroico, incrementan y complejizan la variabilidad espacial. Además entre la llanura amazónica al norte de Rurrenabaque y la Cordillera Real al sur del área de estudio, existen varias serranías o cadenas montañosas de menor altitud y de orientación y fisiografía muy diversas, que contribuyen a incrementar la variabilidad climática y diversidad biológica de la región de los Yungas (Molina-Carpio *et al.* 2019).

La influencia de la variación de altitudes se comprueba también en este caso, verificándose la existencia de las mayores temperaturas (con valores entre 25,7 °C y 22,4 °C) en las regiones cercanas al llano beniano, situadas en la porción oriental de la cuenca y con altitudes que no

superan los 1.000 msnm. Las regiones de Los Yungas e Inquisivi, situadas en altitudes menores a los 1.500 msnm, registran valores cercanos a los 19 °C. Finalmente en las zonas cordilleranas y cercanas a ésta se presentan las menores temperaturas (14,2 °C y 10 °C), comprobándose así la relación inversa entre altitud y temperatura (Coritza 2017).



**Fig. 6.** Vientos medios a largo plazo a 925 hPa (vectores) y 300 hPa (líneas continuas) y precipitación (sombras) sobre América del Sur. Fuente: Datos del reanálisis NCEP/NCAR.

El Balance Hídrico Superficial de Bolivia (Roche *et al.* 1992) menciona que la masa de aire pacífico actúa en forma opuesta a las zonas precedentes. La vertiente occidental de los Andes está sujeta a estas condiciones de estabilidad atmosférica cada vez más fuertes, desde la cresta que la separa del Altiplano hasta la costa. Estas condiciones son engendradas por la presencia permanente del anticiclón sud pacífico y por la corriente fría de Humboldt asociada al mismo. Si bien la humedad atmosférica en los primeros 1.000 m es muy elevada, una permanente subsidencia del aire y una inversión de la estratificación térmica de la troposfera en los 1.300 m, impiden el ascenso de aire húmedo y las precipitaciones. En invierno, una capa de estratocúmulos, poco espesa (200 a 300 m), se establece por encima de esta inversión, acompañada de neblinas durante la noche y temprano en la mañana. En invierno esta neblina desaparece frecuentemente al mediodía y se vuelve casi inexistente en verano. En esta vertiente las isoyetas siguen las curvas topográficas (Coritza 2017).

La variación espacial de la humedad relativa está influenciada por la presencia de barreras naturales que se levantan en zonas intermedias de la cuenca y cambian su comportamiento. En el caso de que no existieran estos accidentes, toda la cuenca tendría porcentajes elevados de humedad relativa, originados principalmente por las masas húmedas que proceden del este. Se puede observar esta situación, por ejemplo, en el Norte de la cuenca, pues desde el llano (81,3 %

en el Angosto del Bala), hasta la Cordillera de Apolobamba (83,5 % en Pelechuco) no existen barreras montañosas de elevaciones importantes y es la zona con mayores rangos de humedad relativa (Campos & Peña 1993). Los mayores valores de humedad relativa se presentan en Chuspipata donde se observa un estado de saturación (humedad ambiental cercana al 100 %) en horas de la noche (Salcedo 2008), por otro lado se determinó que Chuspipata y Hornuni3010 presentan los valores más altos de humedad relativa y los más bajos de radiación y ETP (evapotranspiración potencial), no solo en los Yungas sino en todo Bolivia (Molina-Carpio *et al.* 2019). Además en la zona con niebla persistente la humedad no disminuye considerablemente en horas del día, mientras que en zonas no nubladas se aprecia una disminución considerable. Siguen en orden de magnitud las estaciones de Chorocona (85 %) y Sapecho (84,2 %), disminuyendo hacia el occidente donde los valores son inferiores al 50 % (característica de climas áridos) como Laykacota. Los valores de humedad relativa más altos se registran entre los meses de diciembre a marzo (época de lluvias) y los más bajos entre los meses de mayo a noviembre. Se tiene un promedio anual de 68,1 % de humedad relativa para el conjunto de estaciones (Coritza 2017).

La variación de la evapotranspiración potencial (ETP) a nivel anual en la cuenca oscila entre 560 y 1.680 mm. Los mayores valores de ETP se registran en el periodo de septiembre-marzo (verano) y los menores valores en el periodo de mayo-agosto (invierno), siguiendo principalmente la evolución de la radiación. La cuenca del río Beni presenta la siguiente variación: La ETP más baja se registra en zonas de neblina donde se puede alcanzar valores tan bajos como es el caso de Chuspipata con un valor de 560 mm/año (Salcedo 2008). La región de Pelechuco al nor-occidente de la cuenca con baja temperatura y poco viento, presenta un ETP menor, próximo a 900 mm/año al igual que la parte sur de la cuenca comprendida entre Independencia y Morochata. Otra región con valores próximos a 1.000 mm/año es la región de Coroico e Inca Pampa en la Parte de los Yungas. Por el contrario las regiones con un ETP más elevado se encuentran en la región de Caranavi y Alcoche con valores promedio en torno a 1.680 mm/año (mayor velocidad de viento y Temperatura) y la región comprendida entre Laykacota y Patacamaya en la parte occidental de la cuenca con valores cercanos a 1.400 mm/año (mayor radiación solar y menor humedad relativa), al igual que la parte nor-oriental de la cuenca comprendida entre Apolo y Rurrenabaque (mayor Temperatura) (Coritza 2017).

### **3. DATOS Y MÉTODOS.**

#### **3.1.DATOS.**

##### **3.1.1. Datos hidroclimáticos.**

Los datos hidroclimáticos provienen del proyecto PHYBAAM y consisten en:

- Series de datos pluviométricos de 149 estaciones terrestres de la cuenca del río Beni homogenizados (Farfán 2019).
- Datos pluviométricos de estaciones satelitales CHIRPS y TRMM (Noriega 2018), con una resolución espacial de 0,25°.
- Datos pluviométricos de estaciones satelitales MSWEP (Satgé 2019), con una resolución espacial de 0,20°.
- Datos hidrológicos de caudales de 16 estaciones hidrométricas de la cuenca del río Beni (Alejo 2018).

Todas estas fuentes de datos inicialmente se obtuvieron a paso diario e incluso horario, sin embargo para este proyecto estos datos se trabajaron a nivel mensual. El periodo utilizado para analizar la climatología es 1972-2016 (mayor periodo de registro común). Para las series hidrométricas se utilizó el periodo correspondiente al registro de cada estación, cabe resaltar la estación hidrométrica de Rurrenabaque con un periodo de registro entre 1968-2015. Para la comparación entre los registros de precipitación de estaciones terrestres y productos satelitales o PPS<sup>19</sup> se utilizaron los periodos: 1982-2016 para CHIRPS y MSWEP y 1999-2016 para TRMM, debido al periodo disponible de estos productos.

##### **3.1.2. Índices climáticos.**

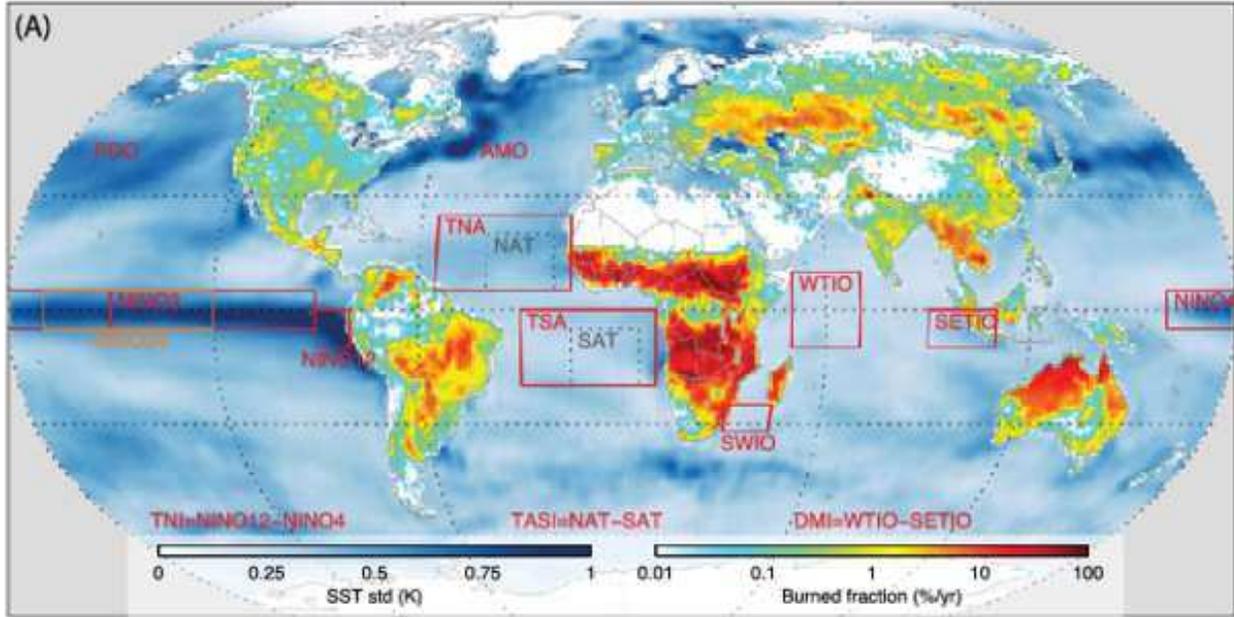
Un índice climático es un valor que puede ser usado para describir el estado y los cambios en el sistema climático. El clima de un sitio en particular es el estado promedio de la atmósfera durante un periodo prolongado de tiempo por lo que los cambios en el clima son mucho más lentos que los del estado del tiempo ya que éste puede cambiar bruscamente día con día. Los índices climáticos permiten realizar análisis estadísticos tales como la comparación de series de tiempo, la estimación de medias y la identificación de valores extremos y tendencias (Quiroz 2011).

Existe una amplia variedad de indicadores descritos en la literatura porque cada uno de ellos se basa en determinadas variables y describe solo ciertos aspectos del clima; por otro lado, cada uno de ellos es definido por una ecuación que utiliza variables que son determinantes en el sistema climático ya sea de tipo atmosférico, como la presión, la temperatura, la precipitación y la radiación solar, o de otro tipo, como la temperatura superficial marina o la cobertura de hielo.

Los índices de meso y gran escala analizados en el contexto de este estudio, corresponden, generalmente, a una expresión numérica que resume la complejidad de una serie de procesos físicos que se desarrollan en el seno de la atmósfera y principalmente en el océano (Fig. 7).

---

<sup>19</sup> PPS, Servicio de Posicionamiento Preciso.



**Fig. 7.** Ubicación de los índices climáticos. Fuente: NOAA/NCEP/CAC, USA.

Los índices climáticos que se utilizaron en este proyecto son: NIÑO 1+2, NIÑO 3.4, NIÑO 3, NIÑO 4, C, E, SOI, AMM, PDO, MEI, AMO no suavizada, AMO suavizada, TNA y TSA, a paso mensual y están disponibles en: ESRL | Physical Sciences Division: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>. Los índices climáticos mencionados fueron seleccionados debido a que son los que más influencia y relación tienen con el comportamiento del clima regional. Se describen a continuación:

### **Oscilación Decadal del Pacífico (PDO)**

El Índice de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO por sus siglas en inglés), resume las variaciones mensuales de la temperatura superficial marina en el Océano Pacífico al norte de los 20°N. La periodicidad de este evento es de 15 a 20 años. Los cambios de temperatura en esa región tienen un gran impacto en el clima de Norteamérica porque alteran el patrón de vientos, particularmente la ubicación de la corriente de chorro y de las tormentas. El índice es positivo cuando la temperatura es anormalmente cálida a lo largo de la costa de Norteamérica, Centroamérica y el Ecuador y fría en el interior del Pacífico Norte, y negativo cuando esa distribución se invierte (Quiroz 2011).

### **Modo Meridional Atlántico (AMM)**

El Modo Meridional Atlántico (AMM del inglés Atlantic Meridional Mode) es un modo dinámico de variabilidad intrínseca del sistema acoplado océano-atmósfera en los trópicos. Está fuertemente relacionado con la actividad de huracanes estacional en escalas de tiempo tanto decadales como interanuales. La conexión surge debido a la relación de la AMM con una serie de condiciones climáticas locales que influyen conjuntamente sobre la actividad de los huracanes. Un análisis más detallado indica que la Oscilación Multidecadal atlántica (AMO) puede excitar el AMM en escalas de tiempo decadales (Vimont & Kossin 2007).

### **El Índice ENSO Multivariado (MEI)**

El Niño / Oscilación del Sur (ENOS), es un estado anómalo natural de las condiciones de la atmósfera oceánica acoplada al Pacífico tropical que es el principal predictor de las interrupciones del clima global. El MEI, que combina variables oceánicas y atmosféricas, facilita en un solo índice una evaluación de ENOS. En especial, proporciona indicaciones en tiempo real de la intensidad de ENOS y, a través del análisis histórico, proporciona un contexto para un estudio comparativo significativo de las condiciones en evolución. Estas seis variables son: los componentes de presión del nivel del mar (P), zonal (U) y meridional (V) del viento en la superficie, la temperatura de la superficie del mar (S), la temperatura del aire en la superficie (A) y la fracción de nubosidad total del cielo (DO). El MEI se calcula por separado para cada una de las doce temporadas bimensuales (diciembre / enero, enero / febrero, ..., noviembre / diciembre). Después de filtrar espacialmente los campos individuales en grupos, el MEI se calcula como el primer Componente Principal (PC) sin rotar de los seis campos observados combinados. Esto se logra al normalizar primero la varianza total de cada campo y luego realizar la extracción de la primera PC en la matriz de covarianza de los campos combinados. Para mantener el MEI comparable, todos los valores estacionales están estandarizados con respecto a cada temporada y al período de referencia 1950-93. (Ronchail 2006).

### **Índices Niño 1+2, 3, 3.4 y 4**

Hay varios índices utilizados para monitorear el Pacífico tropical, todos los cuales se basan en anomalías de temperatura superficial del mar promediadas en una región determinada. Por lo general, las anomalías se calculan en relación con un período base de 30 años. El índice de Niño 3.4 y el Índice de Niño de Oceanía (ONI) son los índices más utilizados para definir los eventos de El Niño y La Niña. Se utilizan otros índices para ayudar a caracterizar la naturaleza única de cada evento. Los números de las regiones Niño 1, 2, 3 y 4 corresponden a las etiquetas asignadas a diferentes regiones del Pacífico ecuatorial (ver Fig. 7). Niño 1 + 2 (0-10°S, 90°W-80°W) es la región más pequeña y oriental del Niño, y se corresponde con la región costera de América del Sur, donde El Niño fue reconocido por primera vez por poblaciones locales. Este índice tiende a tener la mayor varianza de los índices de Niño SST. La región del Niño 3 (5°N-5°S, 150°W-90°W) fue el foco principal para monitorear y predecir El Niño, pero luego los investigadores descubrieron que la región clave para las interacciones acopladas océano-atmósfera para ENOS se encuentra más al oeste. Por lo tanto, el Niño 3.4 y ONI se usan más frecuentemente para definir los eventos de El Niño y La Niña. Se puede considerar que las anomalías de Niño 3.4 (5°N-5°S, 170°W-120°W) representan el promedio de las TSM ecuatoriales en todo el Pacífico desde aproximadamente la línea de datos hasta la costa sudamericana. El índice de Niño 3.4 normalmente utiliza una media móvil de 5 meses, y los eventos de El Niño o La Niña se definen cuando las SST de Niño 3.4 superan los +/- 0,4 °C durante un período de seis meses o más. ONI (5°N-5°S, 170°W-120°W) usa la misma región que el índice Niño 3.4. La ONI utiliza una media de 3 meses consecutivos, y para ser clasificada como El Niño o La Niña en toda regla, las anomalías deben superar el + 0,5 °C o el -0,5 °C durante al menos cinco meses consecutivos. Esta es la definición operacional utilizada por NOAA<sup>20</sup>. Niño 4 (5°N-5°S, 160°E-150°W): captura

---

<sup>20</sup> NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration.

anomalías de temperatura superficial del mar en el Pacífico ecuatorial central. Esta región tiende a tener menos varianza que las otras regiones de El Niño (Montealegre 2009)

### **Índices C y E**

Los índices E y C resumen la variabilidad asociada a El Niño y La Niña, representando el calentamiento superficial anómalo en el Pacífico este y centro, respectivamente. Debido a la forma en que fueron calculados (usando componentes principales) la correlación lineal entre ellos es baja, por lo que permite distinguir mejor la variabilidad propia de cada una de estas regiones (Takahashi *et al.* 2011).

### **Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO)**

La AMO describe los ciclos de mediano plazo en la temperatura superficial marina que se presentan en el Atlántico Norte; las fases frías y cálidas duran, cada una, de 20 a 40 años aproximadamente y los cambios entre los valores extremos son de alrededor de 1,8 °C (1 °F). Esta oscilación se presenta en la mayor parte del océano comprendida entre Groenlandia y el ecuador e incluso puede afectar el Pacífico Norte. Influye en la temperatura del aire y la precipitación de gran parte de Norteamérica y Europa, por lo cual se ha asociado con la frecuencia de las sequías y de los huracanes más intensos. Por otro lado, dependiendo de la fase, se menciona que enmascara o exagera el incremento de temperatura inducido por el calentamiento global de origen antrópico (Quiroz 2011).

### **Índice del Atlántico Norte Tropical (TNA)**

El TNA es una serie de tiempo de las anomalías de la temperatura superficial marina promediadas sobre un cuadrante comprendido entre las coordenadas 60-20°W, 6-18°N y de 20-10°W, 6-10°N. Este índice está estrechamente relacionado con los procesos globales que se producen en el trópico, en particular con las condiciones en la región Niño 3 (Quiroz 2011).

### **Índice del Atlántico Sur Tropical (TSA)**

El TSA Índice del Atlántico sur tropical es una serie de tiempo de las anomalías de la temperatura superficial marina mensual de 0-20°S y 10°E-30°W (Quiroz 2011).

### **Índice de la Oscilación del Sur (SOI)**

Este valores un indicador de la diferencia de presión entre Tahití y Darwin que se presenta debido al efecto de subibaja que se presenta en el Pacífico Ecuatorial. Con frecuencia la magnitud de esta oscilación está relacionada con el desarrollo e intensidad de los eventos de El Niño y la Niña. Los valores negativos de la diferencias de presión sin normalizar menores a -8 indican los episodios El Niño, en tanto que los valores positivos mayores a 8 son típicos de La Niña (Quiroz 2011).

#### **3.1.3. Datos de reanálisis.**

Se utilizaron los datos de reanálisis de temperatura superficial del mar (SST) de NOAA ERSSTv5 a paso mensual, que está disponible a una resolución de cuadrícula de 2° x 2° en: ESRL | Physical Sciences Division: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/tables/sst.html>.

El reanálisis es un método científico para estimar a nivel global el comportamiento del clima en el tiempo. En él, las observaciones y un modelo numérico que simula uno o más procesos del sistema de la Tierra se combinan objetivamente para generar una estimación sintetizada del

estado del sistema. Un reanálisis típicamente se extiende por varias décadas o más, y cubre todo el globo terrestre desde la superficie de la Tierra hasta muy por encima de la estratósfera. Los productos de reanálisis se utilizan ampliamente en la investigación y los servicios climáticos, incluso para monitorear y comparar las condiciones climáticas actuales con las del pasado, identificar las causas de las variaciones y cambios climáticos y preparar predicciones climáticas. La información derivada de los reanálisis también se usa cada vez más en aplicaciones comerciales y en sectores como la energía, la agricultura, los recursos hídricos y los seguros. Este análisis del clima proporciona una descripción numérica del clima reciente, producida mediante la combinación de modelos meteorológicos globales con observaciones. Contiene estimaciones de variables atmosféricas, como la temperatura del aire, la presión y el viento a diferentes altitudes, y los parámetros de la superficie, como la lluvia y la temperatura de la superficie del mar. Las estimaciones se producen para todos los lugares de la Tierra y abarcan un período de tiempo prolongado que se puede extender por décadas o más. Los reanálisis del clima generan grandes conjuntos de datos que pueden ocupar varios gigabytes de memoria virtual.

Una de las aplicaciones oceanográficas que puede derivarse del empleo de sensores remotos a escala regional es el cálculo de la temperatura de superficie del mar, donde cada píxel de la imagen contiene información sobre la temperatura a la que se encuentra el territorio, lo que es de especial aplicación al medio marino (Pinilla & Fenoy 2008).

No obstante, uno de los mayores problemas que plantea la medida de la SST desde datos satelitales, es la acción combinada de la perturbación generada por la atmósfera y la variabilidad espacial de la emisividad. La perturbación atmosférica es debida casi por entero a la absorción y emisión de radiación térmica por parte del contenido de vapor de agua atmosférico, mientras, que la emisividad se debe a la heterogeneidad de los elementos presentes en la superficie terrestre. En el caso de la superficie del mar, la emisividad presenta mayor homogeneidad que en el caso terrestre. (Morales & Parra 2002).

En este proyecto hemos determinado la correlación y su significancia entre los datos de reanálisis de anomalías de la temperatura superficial del mar (SST) con las series de los componentes principales, los índices de los vectores regionales y las series hidrológicas de caudales.

## **3.2.MÉTODOS.**

### **3.2.1. Vector Regional**

El Vector Regional es, ante todo, un método de crítica de datos, elaborado en el ORSTOM-IRD en los años setenta, con el objeto de regionalizar los datos pluviométricos anuales con un comportamiento homogéneo.

Imaginemos un juego de datos anuales como lluvias, reuniendo cierto número de estaciones de una misma región climática sobre una duración de a lo menos 5 años. El método clásico de crítica de un juego de datos semejante consistía en efectuar análisis de dobles masas entre los valores de las estaciones tomadas dos a dos, para detectar eventuales heterogeneidades, luego en completar eventualmente datos faltantes por correlación entre los datos de una estación y de sus vecinas. Cuando el número de estaciones es elevado, y el juego de estaciones presenta años faltantes, esta

operación puede ser muy fastidiosa y sobre todo ignora desde el comienzo cuáles son las estaciones que presentan problemas (Hiez 1977, Brunet-Moret 1979).

El método del Vector Regional consiste en elaborar, a partir del conjunto de la información disponible, una estación ficticia que sea representativa de toda la zona de estudio. Para cada estación se calcula un promedio extendido sobre todo el período de estudio, y para cada año, se calcula un índice que será superior a 1 cuando el año es excedentario, e inferior a 1 cuando el año es deficitario. A esta serie de índices anuales se le llama Vector Regional, ya que toma en cuenta la información de una región que se supone es climáticamente homogénea. Este método también puede aplicarse a datos mensuales, tratando separadamente cada uno de los meses del año como si se tratara de un valor anual. Pero en este caso, especialmente respecto a los meses de estiaje, el carácter pseudo-proporcional de los datos será menos evidente. Esta última condición significa que los datos de las diferentes estaciones deben variar en el mismo sentido y en proporciones casi idénticas, con variaciones ligeras debidas al ruido de fondo. Es generalmente el caso para estaciones de una zona que no sea demasiado extendida, sometida al mismo comportamiento climático (Hiez 1977, Vauchel 2005).

Una vez elaborado el Vector Regional, la crítica de los datos se facilita enormemente, ya que se puede:

- Evaluar la calidad de los datos de una estación por curvas de dobles acumuladas con los índices del Vector Regional, lo que ayuda a poner de relieve problemas de calidad eventuales sobre una estación.
- Comparar gráficamente y correlacionar los datos de una estación con los índices del Vector Regional.
- En cierta medida y con precaución, completar los datos faltantes de una estación multiplicando el índice de un año del Vector Regional por el promedio extendido de la estación sobre el período de estudio.

Es evidente que la calidad del Vector Regional depende de la calidad de los datos de entrada. Aunque los algoritmos utilizados por los dos métodos intentan minimizar la influencia de los datos erróneos, el vector calculado al comienzo sigue contaminado por los errores que existen en los datos de las estaciones. Sólo de manera iterativa, eliminando los datos visiblemente erróneos y corrigiendo poco a poco los errores más evidentes sobre los datos de entrada, se llegará a un Vector Regional de buena calidad. Cuando el Vector Regional es de buena calidad, puede ser utilizado, si se desea, para reconstituir datos faltantes. Una opción del módulo permite incluso agregar a los datos reconstituidos una diferencia aleatoria tomada al azar en una ley de Gauss, para evitar disminuir la variancia de las series reconstituidas. Sin embargo, no hay que perder de vista que para una reconstitución fina de datos faltantes sobre una estación, es preferible proceder por correlación con las estaciones más cercanas (Hiez 1977, Vauchel 2005).

El Vector Regional presenta las variaciones climáticas de una región en forma sintética, y no basándose en una sola estación a la vez.

Dos métodos concurrentes fueron elaborados en el ORSTOM - IRD por G. Hiez (1977) y Brunet Moret (1979) y se indican a continuación:

El **método de Y. Brunet Moret** calcula el promedio extendido y los índices del Vector Regional por un método de mínimos cuadrados, tratando de minimizar las desviaciones entre los índices de las estaciones y el Vector. Considera que el índice regional de un año es el promedio de los índices de todas las estaciones. Sin embargo, durante el proceso toma la precaución de filtrar los índices de las estaciones que se alejan demasiado del promedio, puesto que el promedio es influenciado por los valores extremos. La filtración de los valores se hace en forma iterativa. Cuando tales valores se detectan durante una iteración, son remplazados por su estimación por medio del Vector que acaba de calcularse, y el cálculo recomienza con estos nuevos valores, hasta obtener un Vector Regional con ningún valor demasiado alejado. Por lo tanto se puede notar que a pesar de filtrar los valores demasiado alejados del promedio, estos valores guardan una cierta influencia sobre el Vector Regional calculado. En efecto, el Vector calculado durante una iteración y utilizado para re-estimar estos valores está contaminado por estos valores, sobre todo si las estaciones son poco numerosas (Brunet-Moret 1979).

El **método de G. Hiez** considera que el índice regional de un año es el índice más frecuentemente observado sobre las diferentes estaciones. Por lo tanto, no es necesario filtrar los datos que se alejan demasiado del promedio, puesto que los datos extremos tienen poco efecto sobre el cálculo de la moda o valor más frecuente. (Hiez 1977). Este método permite reducir la influencia de los valores atípicos (outliers en inglés), que pueden estar presentes incluso en bases de datos que hayan pasado un control de calidad estándar. La observación al método es que la moda es un estadístico menos representativo que la media y de cálculo más incierto cuando hay pocos datos. Se lo escogió para este proyecto después de un análisis experimental de los resultados obtenidos por ambos métodos.

El paquete computacional HYDRACCESS, ejecuta la interfaz del método del vector regional (MVR) y proporciona información diversa en hojas de cálculo Microsoft Excel. La calidad de la serie de datos de una estación se determina en función de varios parámetros, entre los que destacan **(a)** La Desviación Standard de los Desvíos (D.E.D), compara la desviación de una estación respecto al vector, un valor alto indica desviaciones fuertes. **(b)** Correlación entre la estación y el vector, si la zona es homogénea climáticamente, los valores serán cercanos entre sí, si un valor es sensiblemente más bajo que el promedio de la zona, entonces la estación tiene fuerte probabilidad de tener errores o climáticamente pertenezca a otra región.

Con estos conceptos, es posible realizar la crítica de datos siguiendo un proceso iterativo de cálculo del vector, inspección de resultados, separación de estaciones desaprobadas, recálculo del vector, etc. Al término del proceso de crítica, y según el nivel de precisión que se requiera, se obtienen regiones de estaciones con semejante comportamiento multianual.

### **3.2.2. Análisis de componentes principales.**

El análisis de componentes principales (ACP) es una técnica utilizada para describir un conjunto de datos en términos de nuevas variables ("componentes") no correlacionadas. Los componentes se ordenan por la cantidad de varianza original que describen, por lo que la técnica es útil para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos. Los primeros componentes principales describen la mayor parte de la varianza de los datos (más cuanto más correlacionadas estuvieran

las variables originales) (Peña 2014). Estos componentes de bajo orden contienen el aspecto "más importante" de la información, y los demás componentes se pueden ignorar.

El ACP se emplea sobre todo en análisis exploratorio de datos y para construir modelos predictivos. El ACP comporta el cálculo de la descomposición en autovalores de la matriz de covarianza, normalmente tras centrar los datos en la media de cada atributo (Peña 2014).

La finalidad de este análisis es:

- Generar nuevas variables que expresen información acerca del conjunto de datos (series de precipitación).
- Reducir la dimensión del espacio en el que están contenidos los datos.
- Eliminar (si es posible) las variables que aportan poca información al estudio del problema
- Facilitar la interpretación de la información contenida en los datos.
- Determinar los componentes principales (CP) que retengan la mayor variabilidad contenida en los datos.

Se aplicó el lenguaje de programación R, ideal para el manejo de series de datos cuantitativos de gran tamaño, cuyos algoritmos y comandos están establecidos dentro del mismo programa para el cálculo y análisis de CP. El Análisis de Componentes Principales en R es un análisis estadístico multivariante que consiste en generar nuevas variables que sean resultado de la combinación lineal de las originales, consiguiendo agrupar la mayor variación posible reduciendo su número. Es decir, su objetivo principal es reducir el número de variables en nuestro análisis al menor número posible, normalmente a dos o tres. Estas nuevas variables reciben el nombre de componentes principales. La primera componente principal agrupa la mayor parte de varianza, la segunda algo menos, y así sucesivamente. De esta forma, en vez de tener muchas variables tenemos solo unas pocas que agrupan la mayor parte de la variación observada.

Una de las limitaciones de este método es que el conjunto de datos a ser analizado debe ser continuo y completo. Por esta razón, para este análisis, los datos de entrada fueron los índices del VR de precipitación calculadas por el Hydraccess para las estaciones con mayor número de datos en el periodo de análisis correspondiente. Para los años en estaciones donde no se pudo calcular su índice, estos fueron rellenados con el índice del vector regional correspondiente. Así se obtuvieron conjuntos de series de datos de precipitación continuos y completos. Para obtener unas componentes principales que no dependan de las unidades en que han sido medidas las variables originales, las series de CP fueron estandarizadas solamente dividiendo cada serie del componente principal entre su desviación estándar del componente principal correspondiente.

Diversos estudios muestran que el número de CP independientes que se puede obtener de un conjunto de series temporales es limitado. Para determinarlo existen varios métodos: (i) El método gráfico consistente en representar la función de autovalores y seleccionar los primeros autovalores que representan la mayor proporción de la varianza. (ii) La prueba de Bartlett, para descartar las CP no significativamente diferentes una de la otra. (iii) La selección del número CP que representan el 80 % de la varianza total, de uso popular por su facilidad de comprensión. (iv). La prueba de Velicer, basada en las correlaciones parciales entre las variables originales,

removiendo una o más variables y (v) la prueba de validación cruzada, Krzanowski (1983), que es quizás el procedimiento más analítico y de mayor costo computacional, usado especialmente, para obtener modelos y evaluar datos futuros.

Para este proyecto se utilizó (vi) la prueba de errores de muestreo en series ortogonales (North et al. 1982), basada en un análisis de los valores propios de las series ortogonales con una regla general para estimar los errores de muestreo. La regla es simplemente que si el error de muestreo de un valor propio particular  $\lambda$  afectado por un factor  $\delta\lambda \sim (2/N)^{1/2} \lambda$  (para una muestra particular de  $N$  realizaciones, para nuestro caso el número de años de análisis) es comparable o mayor que el espacio o distancia entre  $\lambda$  y un valor propio vecino, entonces los errores de muestreo para la serie ortogonal asociado con  $\delta\lambda$  será comparable al tamaño de la serie ortogonal vecina. La interpretación es que si un grupo de valores propios verdaderos se encuentra dentro de uno o dos  $\delta\lambda$  entre sí, entonces forman un "multiplete efectivamente degenerado", y los vectores propios de muestra son una mezcla aleatoria de los vectores propios verdaderos, es decir las series ortogonales no son separables.

### 3.2.3. Pruebas de homogeneidad en series temporales.

La homogeneidad de una serie temporal continua, puede definirse como el comportamiento estable, donde su variabilidad no presenta quiebre o rupturas.

Una ruptura puede definirse por un cambio en la ley de probabilidad de las variables aleatorias cuyas realizaciones sucesivas determinan las series de tiempo estudiadas. Estos quiebres o rupturas en una serie temporal se evalúan a través de diferentes métodos.

El enfoque de Pettitt no es paramétrico y se deriva de la prueba de Mann-Whitney. La ausencia de una ruptura en la serie  $(x_i)$  de tamaño  $N$  constituye la hipótesis nula. Los valores de las dos muestras se agrupan y clasifican en orden ascendente. Luego se calcula la suma de los rangos de los elementos de cada submuestra de la muestra total. Una estadística se define a partir de las dos sumas así determinadas y se prueba bajo la hipótesis nula de pertenencia de las dos submuestras a la misma población. La implementación de esta prueba asume que, en cualquier momento  $t$  entre 1 y  $N$ , las series de tiempo  $(x_i)$   $i = 1$  en  $t$  y  $t + 1$  en  $N$ , pertenecen a la misma población. Si se rechaza la hipótesis nula, se proporciona una estimación de la fecha de interrupción para el momento  $t$ , definiendo el máximo del valor absoluto de la variable (Pettitt 1979). Se considera una de las pruebas más completas para la identificación de los cambios en las series de tiempo (Zbigniew 2004).

El procedimiento de Buishand es de naturaleza bayesiana y se refiere al modelo simple que supone un cambio en la media de la serie. Los valores críticos de la estadística  $U$  están dados por Buishand (1982) a partir de un método de Monte Carlo. Para cualquier cambio de promedio que ocurra en la mitad de la serie, la estadística  $U$  demuestra ser eficiente. La estadística  $U$  es una estadística robusta que sigue siendo válida incluso para distribuciones de la variable estudiada que se desvían de la normalidad. Se dice que las pruebas son robustas cuando sus condiciones de aplicación no son estrictas (Buishand 1982). La prueba de Buishand se refiere al mismo modelo y las mismas suposiciones que el enfoque de Lee y Heghinian. En caso de rechazo de la hipótesis nula, esta prueba no propone una estimación de la fecha de interrupción (Pereira 2012).

La prueba de Lee y Heghinian usa la media como un indicador de cambio gracias a una posterior distribución de Student (Lee & Heghinian 1977). Por último, la segmentación de Hubert se basa en la diferencia significativa de la media y la desviación estándar entre los períodos. Se adapta particularmente bien para la búsqueda de múltiples cambios en la serie (Hubert *et al.* 1989).

#### **3.2.4. Teoría de ondeletas (wavelets).**

Una función wavelet es una pequeña onda cuya energía se encuentra concentrada en el tiempo y sirve como herramienta para el análisis de fenómenos transitorios, no estacionarios y variantes en el tiempo. Una de las características que ha permitido la aplicación de la teoría wavelet en diferentes campos de estudio es la capacidad de realizar un análisis en tiempo y frecuencia de fenómenos estacionarios y no estacionarios. El análisis wavelet se basa, al igual que la teoría de Fourier, en el concepto de aproximación de señales usando la superposición de señales. La diferencia entre la teoría de Fourier y la teoría wavelet radica en que las funciones wavelet varían tanto en frecuencia como en escala. Una forma general de ver las funciones wavelet es como familias de funciones que tienen una buena localización tanto en frecuencia como en tiempo. Esta característica hace del análisis wavelet una herramienta poderosa para diversas aplicaciones que involucran el procesamiento de señales (Mallat 1999). En otras palabras una wavelet es una señal oscilatoria de corta duración cuya energía es finita y se encuentra concentrada en un determinado intervalo de tiempo.

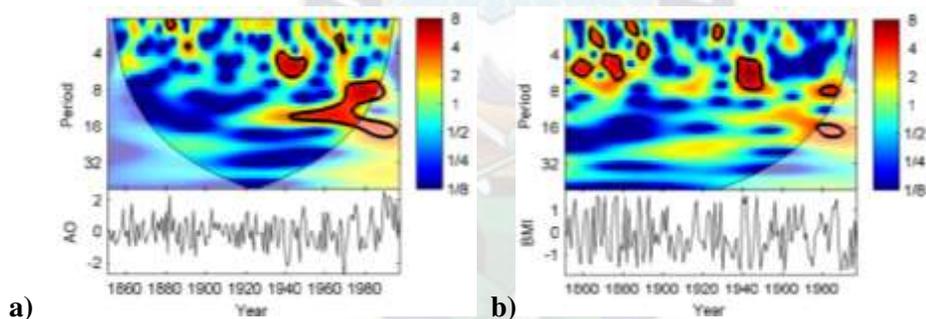
Las transformadas de wavelets están dadas por la transformada wavelet continua (CWT) y la transformada wavelet discreta. Son dos herramientas que permiten el análisis de señales de manera similar a la transformada de Fourier con la diferencia que la transformada wavelet puede entregar información temporal y frecuencial en forma cuasi-simultánea, mientras que la transformada frecuencial solo da una representación frecuencial.

En cuanto a sus aplicaciones, la transformada wavelet discreta se utiliza para la codificación de señales, mientras la continua se utiliza para el análisis de señales. Como consecuencia, la versión discreta de este tipo de transformada se utiliza fundamentalmente en ingeniería e informática, mientras que la continua se utiliza sobre todo en la física (Mallat 1999).

Mientras CWT es una herramienta común para el análisis de las oscilaciones intermitentes localizadas en una serie de tiempo, muy a menudo es conveniente examinar dos series de tiempo juntas que se espera que estén vinculadas de alguna manera. En particular, para examinar si las regiones en el espacio de frecuencia tiempo con gran potencia común tienen una relación de fase constante y por lo tanto son indicativos de causalidad entre las series de tiempo. Muchas series de tiempo geofísicas no se distribuyen normalmente y sugieren la aplicación de la CWT a tales series de tiempo. A partir de dos series de tiempo se construye la transformada wavelet cruzada (XWT) que expondrá su poder común y fase relativa en el espacio tiempo-frecuencia (Grinsted *et al.* 2004).

Muchos científicos han hecho uso del método wavelet en el análisis de series de tiempo, a menudo usando software libres populares. Nosotros utilizamos el programa Matlab, cuyos algoritmos y comandos están establecidos dentro del mismo programa para aplicar este análisis a series temporales. La CWT tiene artefactos de borde porque la wavelet no es completamente

localizada en el tiempo. Por lo tanto, es útil introducir un Cono de Influencia (COI) en el que los efectos de borde no pueden ser ignorados. El COI es la región donde los efectos de borde llegan a ser importantes (Torrence & Compo, 1998), estos efectos se presentan por tener la consideración en la transformada de Fourier de que las señales son cíclicas; para disminuir esto se rellena con ceros los bordes de la señal hasta la siguiente potencia de dos para después removerse; la implementación de los ceros produce discontinuidades generando errores en los extremos de la señal, de igual manera la potencia wavelet al inicio y al final de los bordes decae por un factor de  $e^{-2}$  (Torrence & Compo, 1998), por lo tanto la información fuera de esta región no es clara para la interpretación. Si asumimos que la serie de tiempo tiene un espectro de potencia promedio (respecto al espectro de Fourier de ruido rojo), un pico en el espectro de potencia wavelet superior al espectro anterior lo asumimos como característica verdadera con cierto porcentaje de confianza (o cierto nivel de significancia). La confiabilidad dentro del cono de influencia y en el espectro Global Wavelet se encuentra definido con el 95 % de confianza. La CWT de dos series de tiempo se muestra en las Fig. 8. Hay características claramente comunes en el poder wavelet de las dos series de tiempo como el significativo pico en la banda de 5 años alrededor de 1940. Ambas series también tener un alto poder en la banda de 2 a 7 años en el período comprendido entre 1860–1900, aunque para AO la potencia no está por encima del 5 % del nivel de significancia.



**Fig. 8.** Ejemplo de la transformada wavelet continua (CWT) de a) la serie temporal estandarizada de invierno (DJF) Arctic Oscillation AO (abajo) y su espectro continuo de energía wavelet (arriba) y b) la serie de tiempo del percentil de Baltic maximum sea ice extent record BMI estandarizado (abajo) y su potencia de wavelet continua (arriba). El negro espeso el contorno designa el nivel de significancia del 5 % contra el ruido rojo y el cono de influencia (COI) donde los efectos de borde pueden distorsionar la imagen se muestra como un tono más claro (Grinsted *et al.* 2004).

El análisis de señales climáticas, se aplicó a los índices de los Vectores Regionales, las series de CP y las series hidrométricas, utilizando el método de la transformada wavelet continua (CWT).

### 3.2.5. Correlación espacial y temporal.

Los coeficientes de asociación son valores numéricos que permiten cuantificar el grado de ajuste y de relación lineal entre dos variables. Se utilizó la correlación de Pearson, que es un coeficiente paramétrico cuyo objetivo es medir la fuerza o grado de asociación entre dos variables aleatorias cuantitativas que poseen una distribución normal bivariada conjunta (Restrepo & Gonzales 2007), mediante la aplicación del programa SPSS. Adicionalmente este programa también nos

permite determinar el grado de significancia de cada correlación. Los valores de la correlación de Pearson van desde -1 hasta 1, siendo los valores extremos los que indican mayor correlación entre variables, y siendo el 0 el punto que indica la no existencia de correlación. El signo positivo o negativo del coeficiente indica si la relación es directa (positivo) o inversa (negativo).

Mediante esta técnica se logró establecer espacial y temporalmente el grado de asociación, de los índices de vectores y series de componentes principales, de los regímenes año hidrológico y estacional para cada periodo contra las anomalías de la temperatura superficial del mar y los índices climáticos respectivamente. Las anomalías de la SST se calcularon restando el valor registrado de la SST y su promedio correspondiente sobre el periodo 1960-2010 (50 años) a nivel mensual. Una vez obtenidas las anomalías mensuales se determinó el promedio de anomalías correspondiente a cada estación (DEF, MAM, JJA y SON). Así por ejemplo, se puede correlacionar el promedio de anomalías de SST para los meses de junio, julio y agosto (JJA) con el índice o serie correspondiente a la estación JJA del VR o CP para cada año, el mismo criterio se usó con los índices climáticos.

De igual manera se utilizó la correlación de Pearson para evaluar la consistencia entre datos de estaciones terrestres y productos satelitales o PPS, desde el punto de vista de la variabilidad climática (VR y CP) tanto a nivel año hidrológico y estacional.

### **3.2.6. Metodología.**

Procedimientos y técnicas al análisis de variabilidad hidroclimática en la cuenca andina del río Beni.

1. Recopilación de datos e información. Los datos pluviométricos de precipitación de estaciones terrestres pasaron por el control de calidad y homogenización realizados por Farfán (2019). Los productos de precipitación basados en satélites o PPS (CHIRPS, MSWEP y TRMM) también se encuentran disponibles para ser estudiados. Las series hidrológicas fueron tratadas por Alejo (2018). Los datos de reanálisis de temperatura superficial del mar (SST) provienen de la fuente NOAA ERSSTv5 a nivel mensual. Las series de los índices climáticos fueron obtenidas y descargadas de la página [ESRL | Physical Sciences Division: https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/](https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/).
2. Regionalización pluviométrica (datos terrestres y satelitales). Con las series anuales y trimestrales de lluvia de estaciones terrestres se aplicó el método del Vector Regional y se creó grupos de estaciones de igual comportamiento a nivel año hidrológico y a nivel estacional utilizando el programa Hydraccess. Para comparar la lluvia terrestre (estaciones) con los PPS, se tomó el valor del dato puntual-satelital, que corresponde a cada estación terrestre que conforma cada grupo. Los grupos regionales a nivel estacional tienen la misma conformación que los grupos formados a nivel año hidrológico. Por otra parte también se realizó una regionalización independiente para cada fuente PPS (CHIRPS Y MSWEP) a nivel de año hidrológico. Los resultados obtenidos fueron los índices de cada vector a nivel año hidrológico y estacional para las series de precipitación terrestres y PPS.

3. Análisis de componentes principales (ACP). A las series pluviométricas de estaciones y PPS, se aplicó la técnica de ACP utilizando Rstudio. Los resultados obtenidos fueron las series de los componentes principales a nivel de año hidrológico y estacional de las series de lluvias terrestres y PPS.
4. Análisis de quiebres y homogeneidad. Las series temporales de los índices de los vectores regionales para cada grupo, las series de CP y las series hidrométricas fueron analizadas mediante los métodos de Pettit y Hubert para identificar quiebres, a través del software KHRONOSTAT que permite una visualización gráfica de los resultados, así como salidas numéricas.
5. Análisis de las SST (reanálisis) y su relación con la hidroclimatología. Se evaluó la correlación de los datos de reanálisis de temperatura superficial del mar (SST), con las series de los índices de los vectores regionales y con los componentes principales pluviométricos, tomando en cuenta los quiebres. Se correlacionó de igual forma la SST con las series hidrológicas de caudales de las estaciones hidrométricas. Para realizar esta correlación se utilizó el software Matlab.  
Los resultados fueron mapas globales de correlación de los índices de los vectores regionales pluviométricos, series de los componentes principales pluviométricos y series de caudales de estaciones terrestres contra la temperatura superficial del mar. Esto para analizar y evaluar la influencia de los índices climáticos.
6. Análisis de señales climáticas a nivel temporal y frecuencial. A los índices de vectores regionales pluviométricos, a las series de los componentes principales pluviométricos y a las series de caudales de estaciones se les aplicó la teoría de la transformada de ondícula continua (CWT), utilizando el software Matlab. Los resultados permitieron examinar si las regiones en el espacio de frecuencia-tiempo con gran potencia común tienen una relación de fase constante y por lo tanto son indicativos de causalidad de la serie de tiempo estudiada.
7. Análisis y discusión de resultados. Se comparó y analizó los resultados de la variabilidad espacial y temporal obtenidos.

## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**

Para una mejor comprensión de los resultados, estos se presentan en tres subsecciones: la variabilidad climática (precipitación), variabilidad hidrológica (caudal) y la evaluación y consistencia de los productos satelitales (CHIRPS, MSWEP y TRMM).

### **4.1.VARIABILIDAD CLIMÁTICA.**

Para analizar la variabilidad climática se consideró el mayor periodo de registro común (1972-2016) de estaciones terrestres de precipitación disponibles.

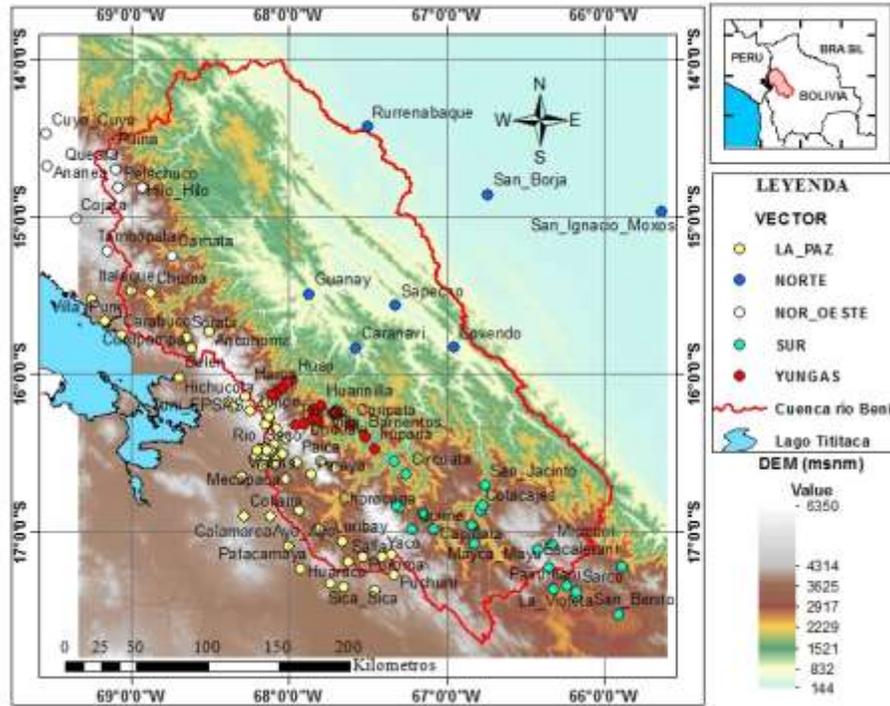
#### **4.1.1. Vector regional.**

La aplicación del MVR sometida a 149 estaciones terrestres para la regionalización en la cuenca andina del río Beni, dio como resultado la conformación de 5 grupos regionales denominados: Vector La Paz, Vector Norte, Vector Sur, Vector Yungas y el Vector Noroeste con un total de 120 estaciones terrestres después de la depuración (Fig. 9). El Vector Noroeste, debido a la falta de datos en los últimos años, solo pudo formarse para el periodo 1972-2012. La conformación de grupos regionales para este proyecto se realizó a nivel año hidrológico correspondiente a agosto-septiembre (Fig. 10) utilizando los siguientes criterios de evaluación: Desviación Standard de los Desvíos  $< 0,2$  y correlación entre la estación y el vector  $> 0,7$ . Bajo estos criterios se eliminaron 29 estaciones terrestres. Existen estaciones en los grupos regionales que no cumplen estrictamente estos criterios, pero que se decidió mantener debido a dos causas:

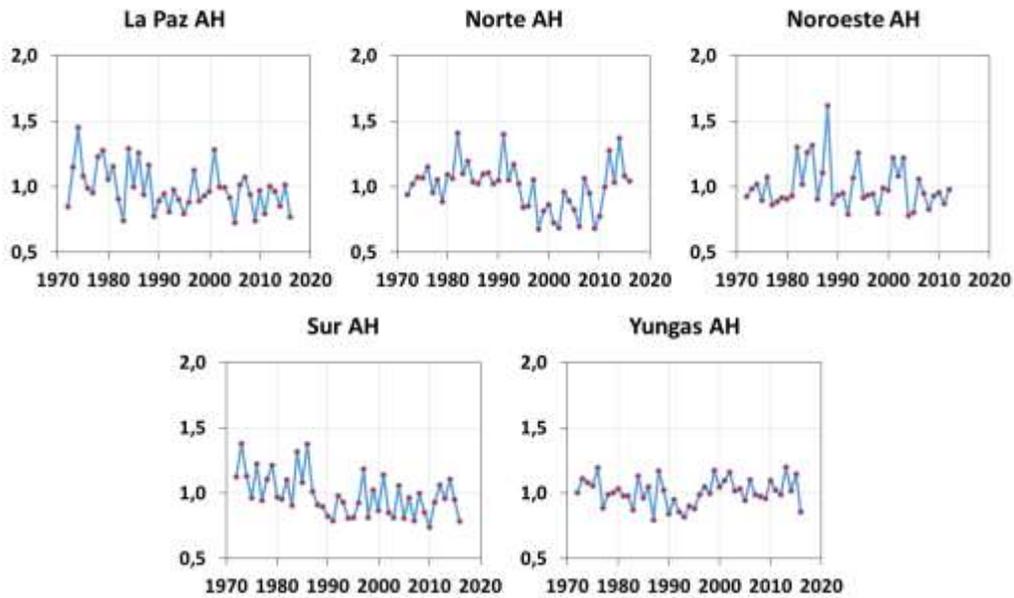
- la primera es que eliminando estas estaciones no se lograban formar vectores continuos dentro del periodo de estudio,
- y la segunda es que estas estaciones tienen registros de varios años, siendo valiosas para el vector regional.

A nivel estacional los grupos regionales fueron definidos con los mismos grupos regionales conformados a nivel AH (ver Tabla A1, A2 y A3 del Anexo). El “Vector Regional” muestra la variabilidad pluviométrica multianual en la región que lo define y es además semejante al comportamiento de las estaciones constituyentes de esa región. Este vector es, en consecuencia, un buen indicador de la variabilidad climática espacial de la región (ver Fig. A1 del Anexo).

La variabilidad espacial de la precipitación en la cuenca se evaluó a partir de los resultados del MVR y principalmente se debe a los grandes cambios fisiográficos en la cuenca. Se identifica al grupo regional La Paz, que se ubica al suroeste de la cuenca andina del río Beni como la región más árida de la cuenca. Las estaciones que lo conforman presentan un valor promedio de precipitación de 630 mm/año, con un mínimo registrado en la estación Caracato de 259 mm/año. El promedio altitudinal de esas estaciones es 3.770 msnm y lo que corresponde al bosque altoandino por encima de 3.400 msnm (Navarro & Ferreira 2007). La relativa aridez de la región se debe a que las depresiones topográficas provocan una subsidencia del aire oriental que llega lateralmente después de haber perdido una gran parte de su humedad sobre el flanco este de la cordillera oriental de Los Andes. A medida que disminuye la altura, la presión y la temperatura del aire aumentan, permitiendo una disminución de la humedad relativa. Las precipitaciones disminuyen del mismo modo (Coritza 2017).



**Fig. 9.** Grupos regionales de precipitación formados con 120 estaciones terrestres, periodo 1972-2016.



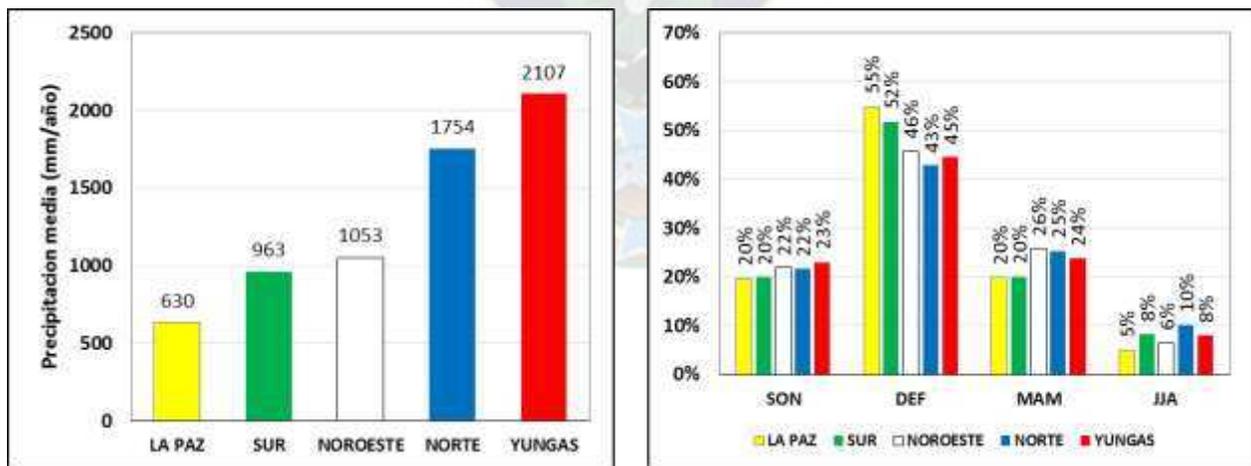
**Fig. 10.** Series temporales de los índices de los Vectores Regionales conformados a nivel AH, periodo 1972-2016 para los grupos regionales La Paz, Norte, Sur y Yungas y periodo 1972-2012 para el grupo regional Noroeste.

La región de los Yungas es la más húmeda de la cuenca, con un valor promedio de 2.107 mm/año y un máximo registrado de 3.909 mm/año en la estación Chuspipata que se encuentra a 3.000

msnm. El promedio altitudinal de este grupo regional es de 2.251 msnm ubicándose en el bosque montano y altimontano pluvial donde se observa una franja húmeda entre 2.000 y 3.400 msnm (Mueller *et al.* 2002), también denominada ceja de monte (Navarro & Ferreira 2007). Esta variabilidad esta también asociada a un fenómeno orográfico. El perfil longitudinal de estos valles, que termina a menudo río arriba en verdaderos acantilados, obliga a los flujos de las masas de aire a una rápida ascensión que provoca precipitaciones intensas (Coritza 2017). Por otra parte los ejes longitudinales de varias serranías situadas antes de la cadena montañosa principal (cordillera Real) forman con el SALLJ ángulos adecuados para inducir precipitación orográfica (Molina-Carpio *et al.* 2019).

El grupo regional Norte se extiende sobre los valles del Subandino de la cuenca del río Beni a una altura promedio de 355 msnm. Es la segunda región más húmeda de la cuenca, con un valor promedio de precipitación de 1.754 mm/año y un máximo de 2.440 mm/año registrado en la estación pluviométrica de Rurrenabaque. El grupo regional Sur que tiene un valor promedio de precipitación de 963 mm/año. Es la segunda región más árida de la cuenca. Las estaciones que lo conforman se encuentran a una altura promedio de 2.865 msnm ubicándose en el bosque altimontano. Finalmente las estaciones del vector Noroeste se encuentran a una altura promedio de 3.416 msnm, presentan un valor promedio de precipitación de 1.053 mm/año, registrando un máximo de 2.044 y un mínimo de 636 mm/año en las estaciones Queara y Ananea respectivamente.

La distribución estacional de la lluvia en porcentaje del total anual por grupo regional se muestra en la Fig. 11, recuadro de la derecha. El mayor porcentaje de lluvia se produce durante la estación húmeda (DEF), entre 43 y 55 % de la lluvia anual; entre 20 y 23 % se produce durante la estación de transición/inicio (SON); durante la siguiente estación de transición (MAM) se produce entre 20 y 26 % de la lluvia anual y finalmente entre 5 y 10 % de la lluvia anual en la estación seca JJA.



**Fig. 11.** Promedio de las medias calculadas de las estaciones de cada grupo regional a nivel año hidrológico (izquierda). Porcentaje de lluvia durante las estaciones del año (DEF, MAM, JJA y SON), en base al promedio de las medias calculadas a nivel año hidrológico y estacional (derecha).

#### 4.1.2. Análisis de componentes principales.

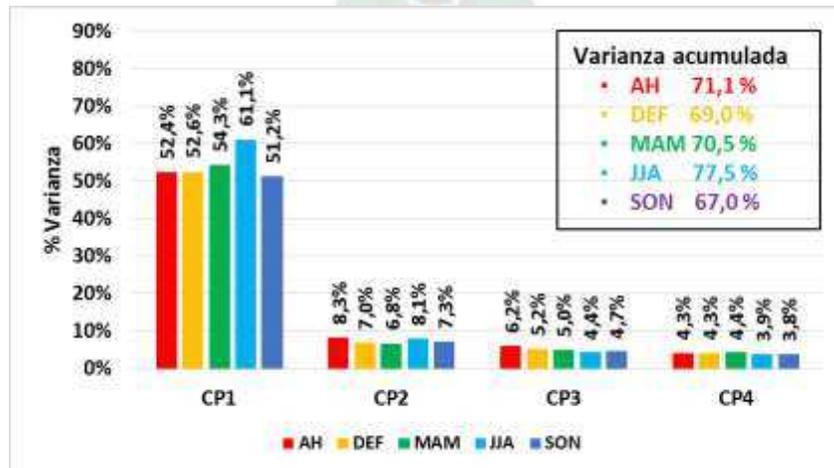
Se aplicó el ACP a 55 estaciones terrestres con datos de precipitación a nivel año hidrológico y estacional para el periodo 1972-2016 (ver Tabla A1 del Anexo). Estas 55 estaciones pertenecen a los grupos regionales de La Paz, Norte, Sur y Yungas. No se consideró las estaciones del grupo regional Noroeste debido a que este no presenta un periodo común con los demás grupos regionales.

Una vez obtenidas las series de los componentes principales, estos fueron sometidos a la prueba de North (prueba de errores de muestreo de series ortogonales) para la determinación de los CP significativos (Tabla 1).

**Tabla 1.** Resultados de la prueba de North sometidas a las estaciones terrestres para determinar el número de CP significantes, periodo 1972-2016.

Periodo	AH	DEF	MAM	JJA	SON
Número de CP	5	3	3	3	4

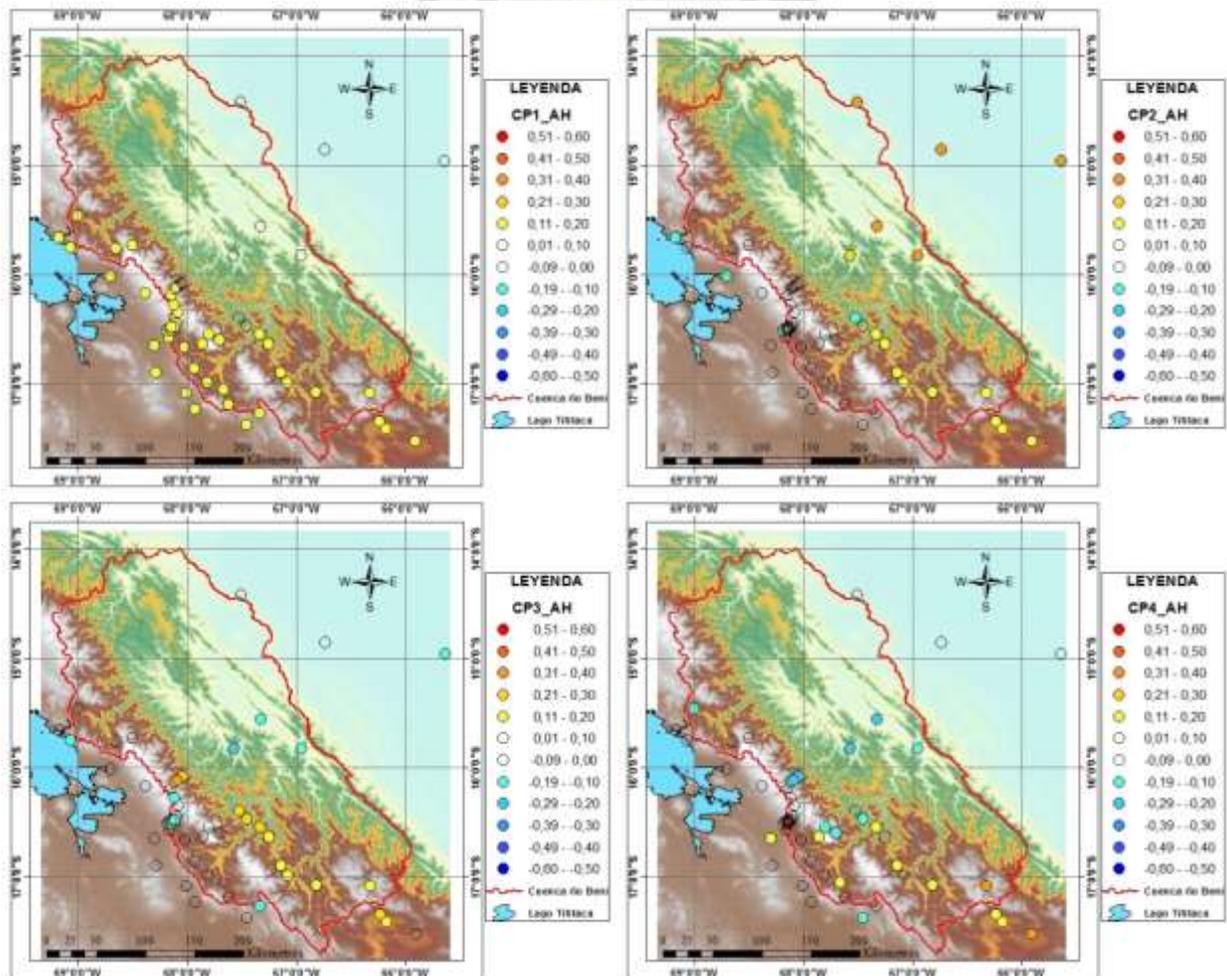
Uno de los objetivos del análisis de componentes principales, aplicados a un grupo de series temporales, es identificar y relacionar la información que resumen. Por los resultados de la prueba de North, solamente se debió considerar las tres primeras CP. Sin embargo se seleccionaron las cuatro primeras CP a nivel AH y estacional (ver Fig. A2 del Anexo) para mostrar que la cuarta CP ya no presenta un patrón de variabilidad consistente y diferenciable, haciendo difícil su interpretación. La CP1, es la que explica la mayor parte de la variabilidad (más del 50%) en las estaciones estudiadas (Fig. 12). A nivel espacial, esta componente se correlaciona con las estaciones de la parte occidental y sur de la cuenca. La CP2, que explica ~7-8 % de la varianza está relacionada espacialmente con las estaciones terrestres al noreste de la cuenca. La CP3, que explica un porcentaje menor al 6 % de la varianza está relacionada con la variabilidad de las estaciones ubicadas al centro (vector Yungas) y sur de la cuenca (vector Sur). La CP4 no pudo asociarse a una región específica de la cuenca.



**Fig. 12.** Varianza parcial y acumulada de las cuatro primeras CP a nivel AH y estacional (DEF; MAM, JJA y SON), periodo 1972-2016.

La técnica del ACP permitió también realizar un agrupamiento más robusto y reducir la incertidumbre respecto a la representatividad y consistencia de los datos de precipitación: Los resultados del agrupamiento se comprobaron con el método del vector regional. Ambos métodos verificaron la correcta clasificación de las estaciones, destacándose que la aplicación del análisis de componentes principales no requiere de procesos iterativos y tiene como ventaja una menor exigencia computacional.

La Tabla 2 muestra la relación entre el ACP y el MVR a nivel AH. La CP1 está correlacionada positivamente con las estaciones pertenecientes a los grupos regionales de La Paz, Noroeste y Sur, la CP2 con una correlación positiva bien marcada con las estaciones del grupo regional Norte, la CP3 con correlación positiva con las estaciones de los grupos regionales Sur y Yungas y la CP4 se correlaciona positivamente con el grupo regional Yungas, pero con bajo nivel de significancia. Estas mismas relaciones espaciales se presentan en las correlaciones entre las estaciones terrestres y los componentes principales, uno de los resultados del ACP. Se puede observar que la CP4 presenta una correlación positiva y negativa con estaciones del mismo grupo regional La Paz, lo que hace difícil su interpretación (Fig. 13).



**Fig. 13.** Correlaciones entre estaciones terrestres y CP a nivel AH, periodo 1972-2016.

**Tabla 2.** Correlación entre los índices de los Vectores Regionales y las series de los CP a nivel AH, periodo 1972-2016.

AH		CP1	CP2	CP3	CP4
VECTOR LA PAZ	r	,957**	-0,172	-0,143	-0,002
	$\alpha$	0,000	0,258	0,348	0,988
VECTOR NORTE	r	0,192	,782**	-,380**	0,252
	$\alpha$	0,207	0,000	0,010	0,096
VECTOR SUR	r	,725**	,362*	0,266	-0,241
	$\alpha$	0,000	0,014	0,077	0,110
VECTOR YUNGAS	r	,520**	-0,134	,582**	,394**
	$\alpha$	0,000	0,380	0,000	0,007
VECTOR NOROESTE	r	,347*	0,019	-0,208	0,257
	$\alpha$	0,026	0,905	0,191	0,105

\*\* . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

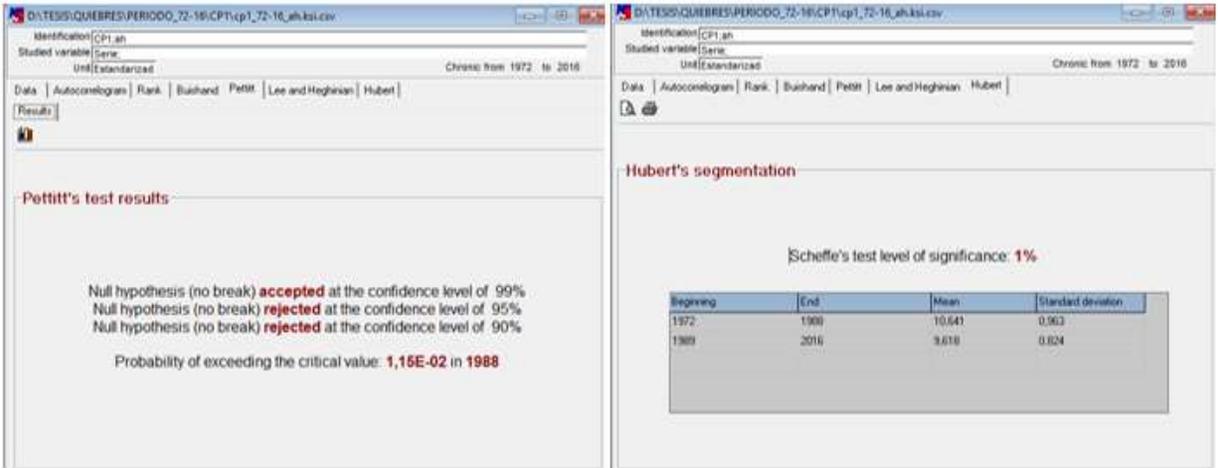
\* . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

A nivel estacional los componentes principales presentan el mismo comportamiento que a nivel AH, pero hay que tomar en cuenta que como los CP están ordenados según la varianza que cada uno explica, estas pueden intercambiarse. Tal es el caso de la estación de transición MAM, donde CP3 presenta correlaciones positivas con las mismas estaciones identificadas por la CP2 y viceversa (ver Fig. A3 del Anexo).

#### 4.1.3. Pruebas de homogeneidad en series temporales.

Se aplicó los métodos de Pettitt y Hubert a las series temporales (VR y CP) para la detección de quiebres. Estos dos métodos son considerados los métodos más completos para la identificación de quiebres y su aplicación es a través del software Khronostat que permite una visualización gráfica de los resultados, así como salidas numéricas (Fig. 14).

La Tabla 3 muestra los resultados de estas pruebas sometidas a las series temporales (VR y CP) de precipitación de estaciones terrestres, a nivel AH y estacional para analizar la variabilidad climática de la cuenca sobre el periodo 1972-2016 tomando en cuenta los quiebres. Ambos métodos identifican los quiebres alrededor del mismo año. Estas series se dividieron en dos periodos para correlacionar contra las SST, el primer periodo corresponde desde 1972 hasta el año marcado en la tabla con color rojo correspondiente al año del quiebre para cada serie temporal y el segundo periodo el restante de años hasta el 2016. No se consideró los quiebres en los extremos del periodo de análisis detectados por el método de Hubert, debido a que estos quiebres solo fueron influenciados por pocos años que presentan eventos extremos al inicio o final de la serie, tal es el caso de la crecida del año 2014 (Vauchel 2014), fenómeno identificado en el vector Norte y CP2 (Fig. 15). El vector Yungas, vector Noroeste y el CP4 no presentan ningún quiebre.

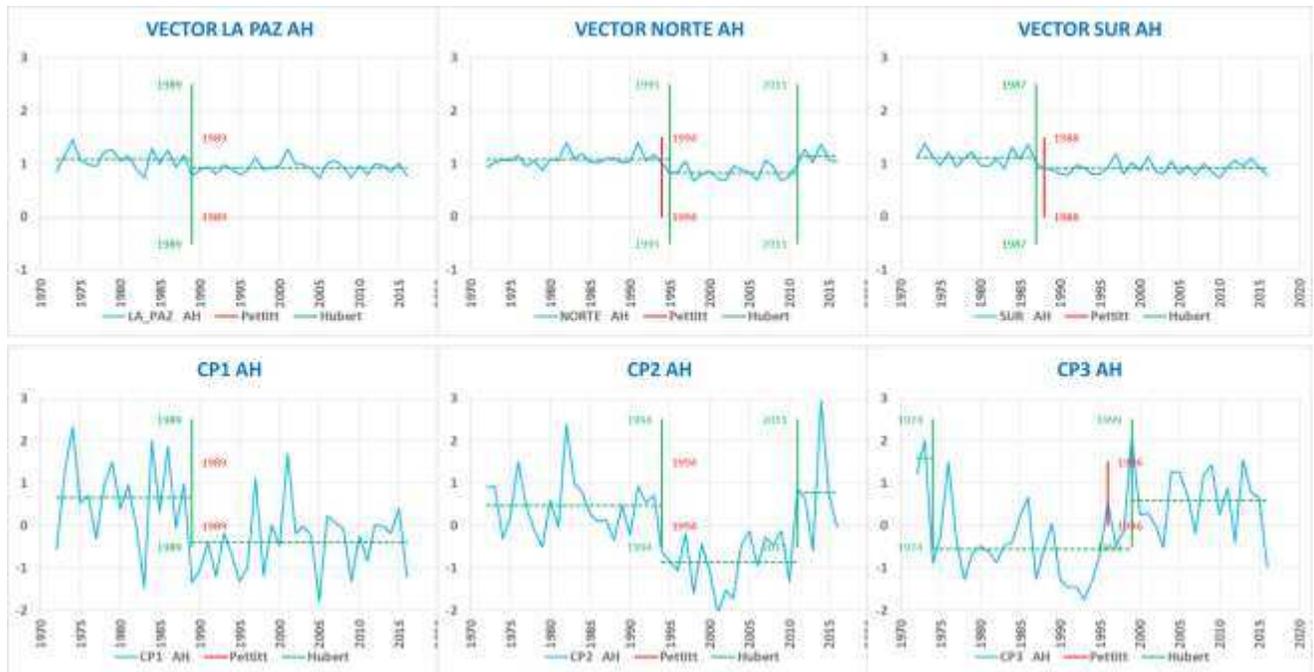


**Fig. 14.** Salida del programa Khronostat. Quiebre en el año 1988 identificado por los métodos Pettitt y Hubert para la serie CPI de estaciones terrestres a nivel año hidrológico.

**Tabla 3.** Resultados de la prueba de Pettitt y Hubert aplicados a los índices de vectores regionales y series de los CP para el periodo 1972-2016.

Prueba	VECTORES					CP				
	AH	DEF	MAM	JJA	SON	AH	DEF	MAM	JJA	SON
	<b>LA PAZ</b>					<b>CP1</b>				
Pettitt	1988	-	-	-	-	1988	-	-	-	1988
Hubert	1988	-	-	-	-	1988	-	-	1974	1988
	<b>NORTE</b>					<b>CP2</b>				
Pettitt	1993	1991	1991	-	-	1993	-	-	-	-
Hubert	1994 y 2010	1991 y 2013	1992 y 2010	-	-	1993 y 2010	2013	-	-	-
	<b>SUR</b>					<b>CP3</b>				
Pettitt	1987	-	-	-	1988	1995	-	1992	-	-
Hubert	1986	1979	-	1992 y 2013	1988	1973 y 1998	-	1993 y 2011	-	-

El método de Hubert también identifica en los índices de los vectores La Paz, Norte y Sur, una reducción de la precipitación después del año de quiebre. Las medias del VR antes y después del quiebre son 1,09/0,93; 1,09/0,83 y 1,12/0,92 respectivamente. Las series de la CP1 y CP2 presentan cambios del mismo sentido (reducción) con medias de 0,66/-0,4 y 0,47/-0,87 respectivamente (Fig. 15). Esto significa que la precipitación ha disminuido en las regiones La Paz y Sur después del periodo 1986-88 y después del año 1993 en la región Norte. Estos es consistente con la reducción de la precipitación sobre la cuenca del río Madeira y las tendencias significativas de disminución de lluvia al sur y oeste de la cuenca del Amazonas después de mediados de la década de 1980 (Lavado *et al.* 2012). La CP3 presenta un comportamiento inverso, es decir, valores más bajos antes del quiebre y más altos después del quiebre con medias de -0,55/0,59. Esto podría explicarse por el calentamiento de la SST del Atlántico Tropical Norte a partir de los 90 y la disminución de la intensidad y frecuencia de los eventos El Niño oriental o canónicos (Gloor 2013).

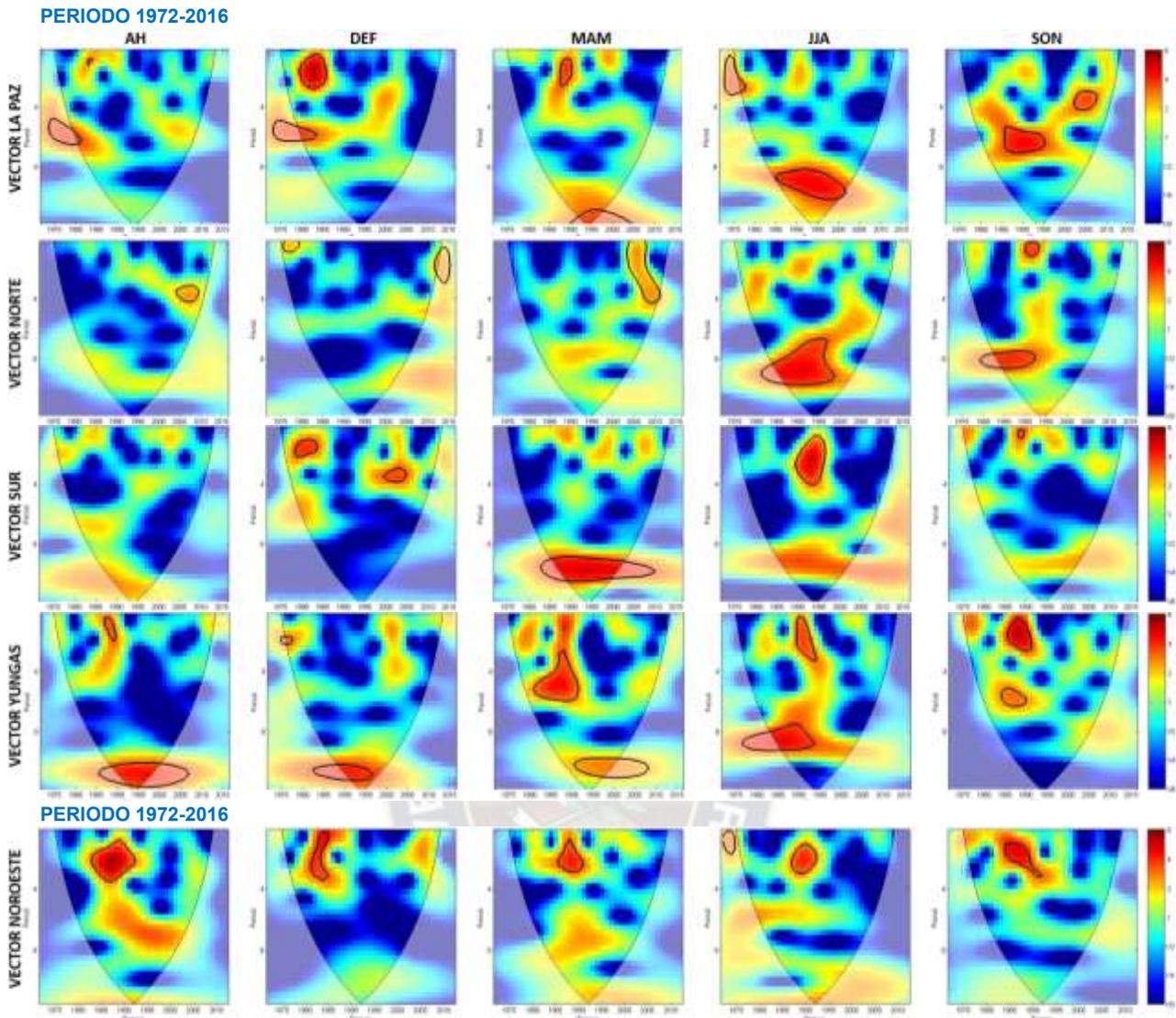


**Fig. 15.** Quiebres detectados por los métodos de Pettitt y Hubert periodo 1972-2016 en las series temporales a nivel AH. Las gráficas muestran los quiebres de la Tabla 3 con un año de adelanto indicando el comienzo del segundo periodo de análisis. Un valor de 1 en los índices de VR y el valor de 0 en las series de CP indican el valor normal o promedio anual (año hidrológico), valores por encima indican años lluviosos y valores por debajo indican años secos.

#### 4.1.4. Análisis de señales climáticas (método wavelets).

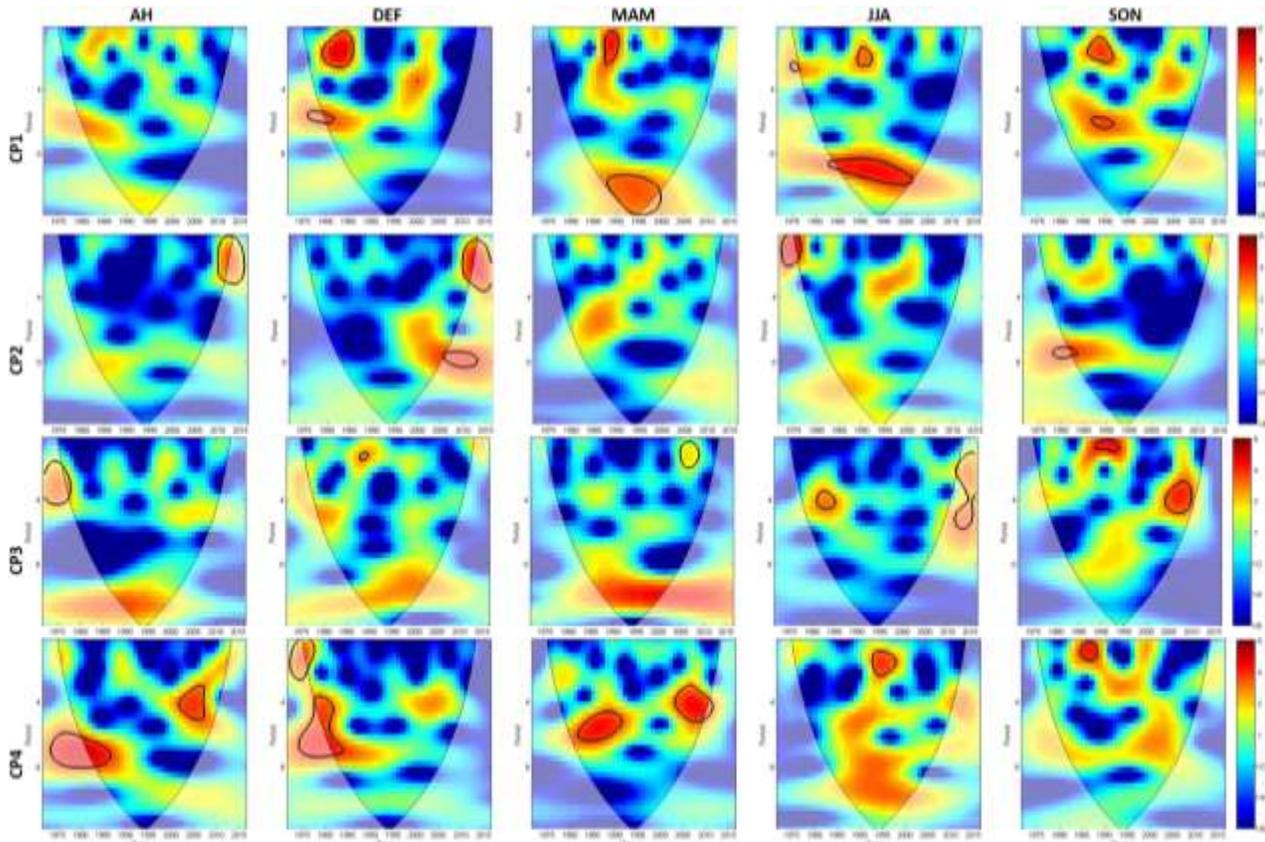
La transformada wavelet continua (CWT) aplicada a los índices de los vectores regionales y las series de los CP de la precipitación presentan estadísticamente potencias significativas presentes en bajas frecuencias (~6 a 10 años) y altas frecuencias (menor a 4 años) para algunas estaciones del año. El periodo de análisis (1972-2016) solo nos permite identificar hasta frecuencias de tipo decadal, el análisis wavelet no nos permite identificar frecuencias mayores (multidecadal) ya que solo contamos con 45 años de registro.

El vector La Paz muestra una potencia significativa en una banda de 6 años para AH, DEF y SON de los cuales solo la potencia en SON esta dentro del cono de influencia (COI) entre mediados de la década de 1980 y 1995. Durante la estación seca JJA se observa una potencia decadal durante casi todo el periodo y significativa durante 1985-2002. El vector Norte muestra potencias significativas en una banda de ~8 a 10 años para las estaciones JJA y SON desde principios de la década del 1980 hasta alrededor del 2000. El vector Sur presenta claramente una frecuencia decadal para la estación MAM durante el periodo 1982-2010. Esta frecuencia está también presente en las estaciones JJA y SON aunque no son significativas. El vector Yungas muestra potencias significativas en una banda de ~8-10 años para AH, DEF, MAM y JJA durante los periodos 1985-2007, 1982-1997, 1990-2010 y 1975-1995, respectivamente (Fig. 16).



**Fig. 16.** Transformada wavelet continua (CWT) de los índices de los vectores regionales a nivel AH y estacional (DEF, MAM, JJA y SON). El contorno negro grueso designa el nivel de significancia del 5 % contra el ruido rojo y el cono de influencia (COI) donde los efectos de borde pueden distorsionar la imagen y se muestra con un tono más claro.

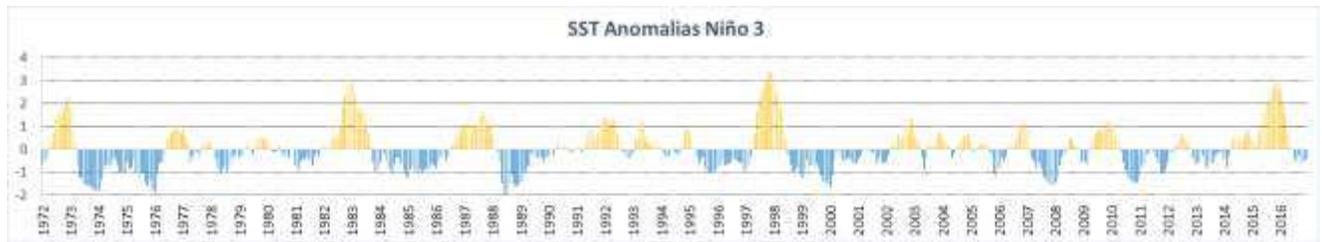
La CP1 muestra una potencia significativa en la frecuencia de ~8-10 años centrada en el periodo de 1983 hasta alrededor del 2000 para durante MAM y JJA. También presenta una potencia significativa de 6 años centrada en la década de 1980 y principios de la década de 1990 para la estación SON. La CP2 presenta potencias significativas con una frecuencia de 8 años para las estaciones DEF y SON pero estas se encuentran a los extremos del periodo de análisis y fuera del COI lo cual podría ocasionar una distorsión. La CP3 muestra frecuencias decadales para AH, DEF y MAM pero no significantes. La CP4 presenta potencias significativas en una banda de ~6-8 años para AH y DEF durante 1973 hasta alrededor de 1990 y 6 años para MAM durante 1980-1995 (Fig. 17).



**Fig. 17.** Transformada wavelet continua (CWT) de las series de los CP a nivel AH y estacional (DEF, MAM, JJA y SON), periodo 1972-2016. El contorno negro grueso designa el nivel de significancia del 5 % contra el ruido rojo y el cono de influencia (COI) donde los efectos de borde pueden distorsionar la imagen y se muestra con un tono más claro.

Por otra parte, las CWT también identifican señales significativas de altas frecuencias (menores a 4 años) que en general están centrados en eventos extremos de El Niño. La influencia de El Niño/La Niña en el clima de toda la región de Bolivia se da por la teleconexión que se presenta con las anomalías positivas y negativas respectivamente en la SST del Pacífico ecuatorial (Fig. 18). Hay varios estudios que mencionan que El Niño está asociado con el déficit de precipitaciones en el Altiplano, los valles interandinos y la región del Chaco, así como el exceso de precipitaciones en las llanuras del noreste de Bolivia (ej.: Ibisch & Mérida 2003, Espinoza *et al.* 2009). Nuestros resultados son consistentes a esos estudios y principalmente en la época de lluvias se detecta una disminución de la precipitación durante los eventos de El Niño.

Los vectores La Paz, Sur y Noroeste y la CP1 indican lluvias deficitarias a nivel anual y durante la estación húmeda ( $VR < 1$  y  $CP < 0$ ) durante los fuertes eventos El Niño 1982-83, 1997-98, 2004-05 y 2015-16. Por otro lado, los vectores La Paz, Sur, Yungas, Noroeste y la CP1 indican sequías o lluvias por debajo de lo normal en los eventos El Niño 1987-88 y 2004-05 durante la estación seca. El vector Yungas y la CP3 indican lluvias deficitarias durante fuertes y moderados eventos de El Niño 1982-83, 1991-92, 2002-03 y 20015-16 (ver Fig. A1 y A2 del Anexo).



**Fig. 18.** Secuencia temporal de las anomalías de la temperatura superficial del mar (SST) en el océano Pacífico central, región Niño 3, durante el periodo 1972–2016. Los tonos amarillos representan las épocas cálidas (Niño) y los azules, las frías (Niña). Fuente de datos: NOAA/NCEP/CAC, USA.

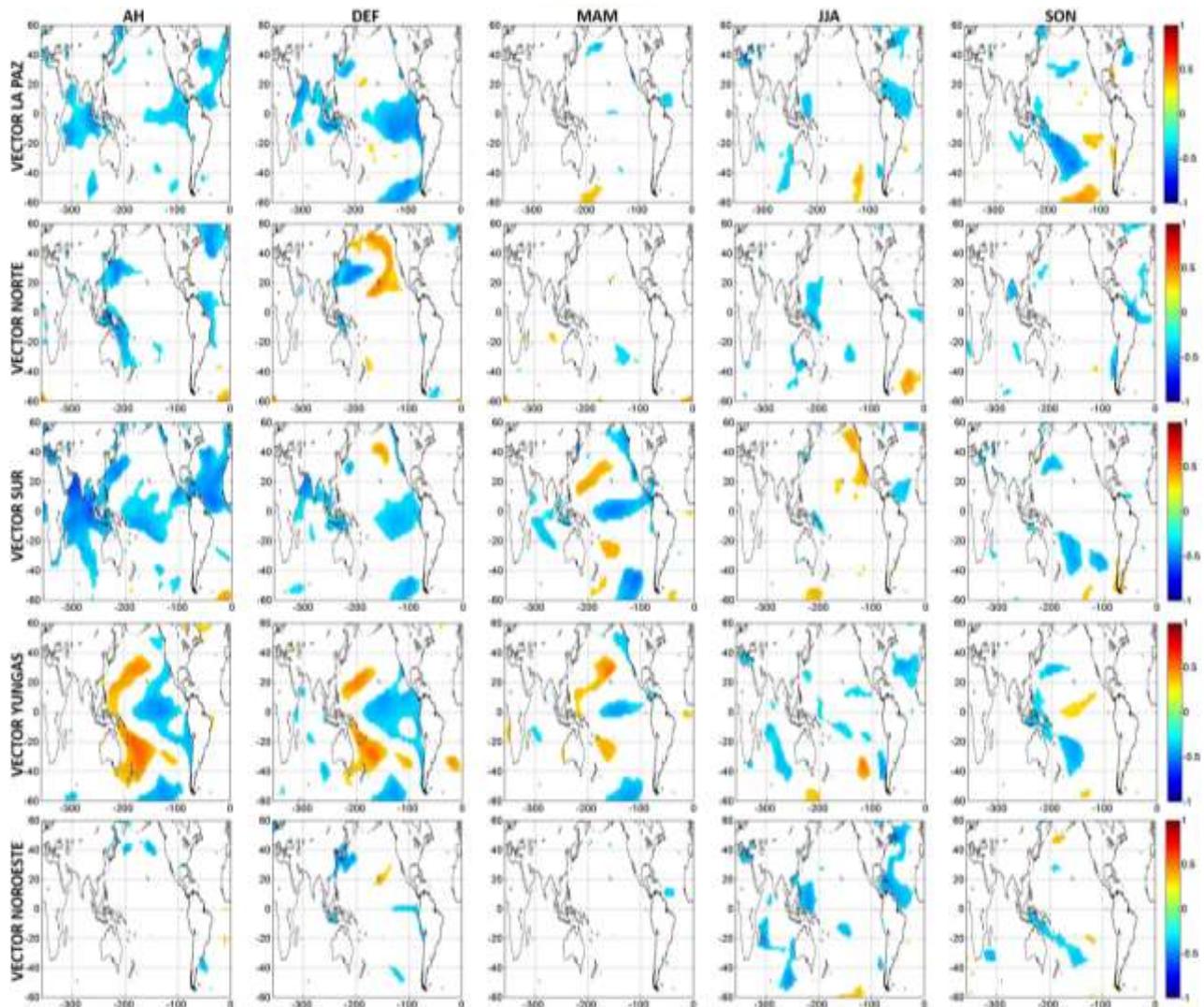
El grupo regional Norte y la CP2 identifican una potencia significativa alrededor del año 2014 en la estación DEF, esta señal indica un exceso de precipitación ( $VR > 1$  y  $CP > 0$ ) y está asociado a la excepcional crecida en la cuenca del río Madeira. Vauchel (2014) indicó que fueron las fuertes precipitaciones que se produjeron en las llanuras del Beni y el pido de monte andino durante enero y febrero del 2014 la causa de esa crecida.

#### 4.1.5. Correlación espacial y temporal.

En esta sección se evaluó la relación entre la variabilidad climática de la cuenca andina del río Beni (VR y CP) y el clima global (índices climáticos y SST) a nivel año hidrológico (AH) y estacional (DEF, MAM, JJA y SON). Se analizó los quiebres y las señales con potencias significativas (bajas frecuencias) identificadas por la transformada wavelet continua.

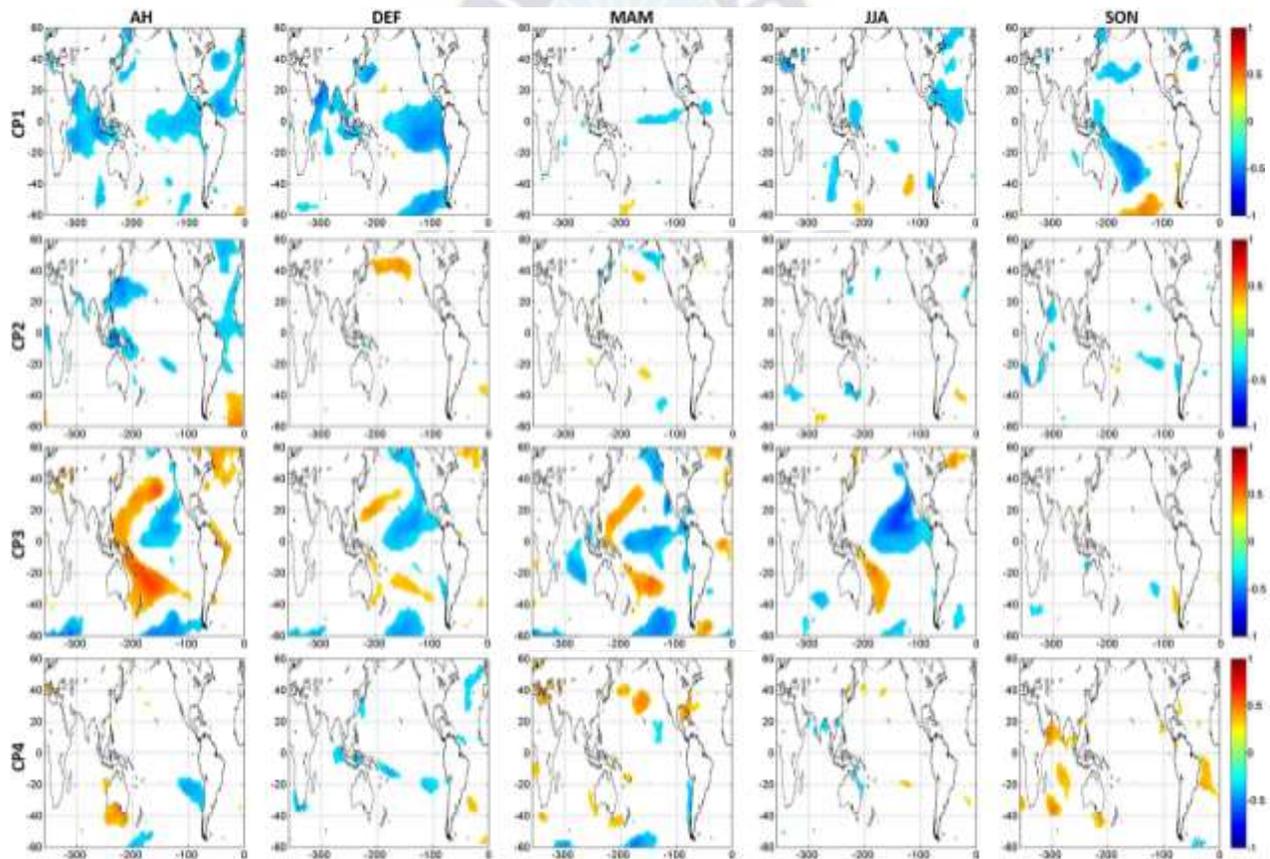
La correlación entre los vectores regionales de precipitación y la SST se muestra en la Fig. 19. A nivel de AH los vectores La Paz y Sur presentan una correlación significativa negativa con el Atlántico Norte Tropical (TNA) y el Pacífico ecuatorial. El vector Norte se correlaciona negativamente con el TNA, el Vector Yungas con correlación negativa con el Pacífico ecuatorial central y el vector Noroeste no presenta correlación significativa con ningún índice climático. Las anteriores relaciones entre el clima regional y la SST aparecen, en algunos casos con más fuerza, en regiones climáticas y estaciones del año específicas y concuerdan con los resultados de la correlación de Pearson entre las series temporales y los índices climáticos (ver Tabla A4, A5, A6, A7 y A8 del Anexo), con excepción del vector Norte que presenta problemas para su interpretación. En DEF, la estación húmeda, los vectores La Paz, Sur y Noroeste se encuentran correlacionados negativamente con el Pacífico ecuatorial oriental (Niño 1+2, Niño 3 y el índice E). El vector Norte no presenta correlación significativa con ningún índice climático pero la figura 19 sugiere una relación con la SST de la región oceánica de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO). El vector Yungas está correlacionado negativamente con el Pacífico ecuatorial central (Niño 3.4 y el índice C). Durante MAM, la señal de los vectores Sur y Yungas se traslada hacia el Pacífico ecuatorial central, con una correlación significativa negativa con el Niño 3, Niño 3.4 y el índice C. El vector La Paz no presenta una correlación significativa pero se puede observar una señal débil en la SST del Pacífico central. Durante MAM los vectores Norte y Noroeste no presentan correlaciones significativas con índices o SST. En la estación seca (JJA), la señal se presenta con una correlación negativa con el Atlántico. Los vectores La Paz y Noroeste correlacionándose negativamente con el TNA, el vector Norte con una correlación,

aunque no significativa, con el Atlántico Sur Tropical (TSA), el vector Sur presenta una correlación negativa con el Modo Atlántico Meridional (AMM). El vector Yungas no presenta correlación significativa con ningún índice climático. Finalmente en la estación de transición SON, los vectores La Paz, Noroeste y Sur no presentan correlación significativa con ningún índice climático: Sin embargo, la figura 19 sugiere que estos grupos regionales presentan un comportamiento similar al vector Yungas, que se correlaciona positivamente con el Pacífico ecuatorial central (Niño 3.4 y el índice C), es decir de signo contrario a su comportamiento en la estación MAM. El vector Norte se correlaciona negativamente con el Atlántico Norte Tropical (TNA) y el Atlántico Sur Tropical (TSA). Es decir temperaturas cálidas (frías) en estas regiones oceánicas durante SON provocan déficit (incremento) de lluvias en la región Norte.



**Fig. 19.** Correlación entre los índices de los vectores regionales de precipitación y la SST a nivel AH y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) para el periodo 1972-2016, solo se trazan valores de  $p < 0,05$ . El valor de la correlación se muestra a la derecha en una paleta de colores entre rojo (+1) y azul (-1).

La correlación entre las cuatro primeras componentes principales (CP) de precipitación y la SST se muestra en la Fig. 20. Para AH la CP1 presenta una correlación significativa negativa con el Atlántico Norte Tropical (TNA) y el Pacífico ecuatorial, la CP2 se correlaciona negativamente con el TNA, la CP3 con correlación negativa con el Pacífico ecuatorial central y la CP4 no presenta correlación significativa con ningún índice climático. La CP1 que explica más del 50 % de la varianza total de los datos de precipitación (ver Fig. 12), presenta el mismo comportamiento que el vector La Paz y en menor grado, que los vectores Sur, Noroeste. Esto era de esperarse con los resultados de la Tabla 2. En época húmeda la CP1 se correlaciona negativamente con el Pacífico ecuatorial oriental (Niño 1+2, Niño 3 y el índice E). La señal se traslada al Pacífico ecuatorial central durante la estación MAM correlacionándose negativamente (Niño 3.4 y Niño 3). En JJA la señal se traslada al TNA con una correlación negativa. Para la estación SON la CP1 asocia los comportamientos de los vectores La Paz, Sur, Yungas y Noroeste indicando la fase inicial y de desarrollo de El Niño.



**Fig. 20.** Correlación entre las cuatro primeras series estandarizadas de los componentes principales de la precipitación y la SST a nivel AH y estacional (DEF, MAM, JJA y SON), solo se trazan valores de  $p < 0,05$ . El valor de la correlación se muestra a la derecha en una paleta de colores entre rojo (+1) y azul (-1).

La CP2 está relacionada con el vector Norte y no presenta correlaciones significativas con ninguna región climática o índice climático. La CP3 presenta un comportamiento similar que el

vector Yungas, en DEF se correlaciona negativamente con el Pacífico ecuatorial central (Niño 3.4, Niño 4 y el índice C) y aparece más clara la señal de la PDO. En MAM y JJA esta correlación negativa se mantiene con la misma región del Pacífico ecuatorial central y la PDO. Para la estación SON no existe correlación significativa con ninguna región climática. Finalmente la CP4 no se correlaciona significativamente con ninguna región climática o índice climático, haciendo difícil su interpretación (Fig. 20).

Se identificó dos escalas temporales de variabilidad: la interanual (ENSO) y decadal (ENSO, PDO y TNA) que modulan la variabilidad climática en los grupos regionales de la cuenca del río Beni.

Se identifica El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) como la principal causa de la variabilidad interanual de la lluvia en la cuenca de estudio. Los eventos cálidos extremos (1983, 1998 y 2016) provocan déficits de lluvia en los grupos regionales La Paz, Sur y Noroeste y por tanto valores negativos de la CP1. Esto es consistente con el modo principal de variabilidad que presenta la cuenca del Amazonas (Marengo *et al.* 1992, Espinoza *et al.* 2009). La relación negativa entre estas series temporales y la SST del Pacífico ecuatorial oriental en temporada húmeda implica una disminución (exceso) de la precipitación con SST más cálida (fría) de la habitual, lo que es consistente con el déficit de precipitaciones en el altiplano y valles interandinos de Bolivia asociados a eventos de El Niño (Ibisch & Mérida 2003). Luego que la señal se traslada al Pacífico ecuatorial central en la estación MAM, se produce un debilitamiento o retorno a la normalidad de El Niño: Varios autores (Poveda & Mesa 1997, Builes *et al.* 2018) han hallado una teleconexión entre las anomalías positivas del Pacífico central y el TNA, lo que explicaría la correlación negativa de la precipitación durante la estación seca con el TNA. Esto implica que las sequías durante JJA son provocadas por SST más cálidas de lo normal en el TNA, que es consistente con el puente tierra-atmósfera (Amazonas) que una la SST del Pacífico Tropical y TNA en escalas de tiempo interanual (Builes *et al.* 2017), y que las temperaturas más cálidas de lo habitual en el Atlántico provocan disminución de la precipitación y sequías en el Amazonas (Lavado *et al.* 2012).

El grupo regional Yungas y la CP3 están asociadas a la variabilidad interanual y decadal de eventos moderados de El Niño que tuvieron sus máximos de anomalías positivas en el Pacífico ecuatorial central durante la estación húmeda y que va perdiendo fuerza durante la estación MAM. Este fenómeno corresponde a la evolución no lineal de ENSO que está asociado a eventos ordinarios fríos y moderadamente cálidos en el Pacífico central PC ENSO SST (Takahashi *et al.* 2011). El grupo regional Yungas y la CP3 presentan una variabilidad decadal correlacionándose negativamente con la PDO, que es consistente con la capacidad de la CP ENSO SST de generar variabilidad de circulación atmosférica que se proyecta en las anomalías de la SST del Pacífico norte exhibiendo el patrón PDO característico sin retraso significativo (Stuecker 2018). En la estación seca (JJA) no se identifica ningún patrón característico, lo que significa que el déficit de la precipitación se debe directamente al impacto que tuvo El Niño del Pacífico ecuatorial central durante el verano austral. La estación SON corresponde a la fase inicial y de desarrollo de El Niño desplazando las aguas cálidas del occidente hacia el oriente del Pacífico ecuatorial (Rasmusson & Carpenter 1982) y es consistente con la correlación positiva entre el grupo regional Yungas y la SST del Pacífico central, indicando el comienzo y un aumento de la

precipitación con anomalías positivas de la SST durante esta estación del año. El mismo comportamiento, aunque debilitado, puede apreciarse en los grupos regionales La Paz, Sur y Noroeste durante la estación SON.

Finalmente el grupo regional Norte y la CP2 no presentan ningún patrón característico de variabilidad durante las estaciones DEF y MAM, por lo que no podemos identificar la relación del exceso de lluvia durante eventos extremos como el del año 2014 con la SST, tal vez porque estas relaciones son poco frecuentes (Espinoza *et al.* 2014). Probablemente otros índices atmosféricos (VVA165W<sup>21</sup>, VVS175W<sup>22</sup>, VVS135W<sup>23</sup> y otros) ayuden a complementar e identificar el patrón de la variabilidad de estas dos series temporales. Sin embargo en el grupo regional Norte puede observarse una relación inversa con el Atlántico Sur Tropical (TSA) en la estación seca (JJA) y una correlación significativa negativa con el TNA y TSA en la estación SON, lo que implica que temperaturas más cálidas de lo habitual en el TNA y TSA provocan disminución de la precipitación y sequías en el grupo regional Norte, que es consistente con una tendencia significativa de sequías altamente correlacionadas con anomalías del Atlántico Tropical de la SST para cuencas del sur del Amazonas (Lopes *et al.* 2016).

Las correlaciones entre las series temporales que identifican quiebres y la SST se muestran en la Fig. 21. El vector La Paz y la CP1 presentan una fuerte correlación negativa durante el primer periodo (1972-1988) con el Pacífico ecuatorial (ENSO) durante el verano austral (DEF). Para el segundo periodo (1989-2016) hay un debilitamiento de El Niño durante DEF y aparece una correlación significativa negativa con el TNA para las estaciones MAM y JJA. Esto sugiere que eventos extremos de El Niño tipo E (canónico), como el de 1983, más frecuentes o intensos durante el periodo 1972-88, provocaron grandes déficit de la precipitación en la estación húmeda y sequías severas durante la temporada seca en la región del vector La Paz. Después del quiebre destaca el calentamiento en el TNA asociado a eventos moderados de El Niño y un aumento de sequías en temporada seca, que es consistente con las sequías de los años 1995, 2005 asociadas a El Niño durante el verano austral y que se intensificaron como consecuencia del calentamiento en el TNA (Espinoza *et al.* 2011, Marengo *et al.* 2011, Lavado *et al.* 2012). Lo contrario sucedió con el grupo regional Sur, una correlación negativa con el Pacífico central oriental se produce después del quiebre (1987-2016) durante las estaciones DEF y MAM, es decir los eventos de El Niño (ENSO) que inicialmente modulaban la variabilidad climática en el grupo regional La Paz paso a tener más influencia sobre el grupo regional Sur, provocando una disminución de la precipitación después del quiebre. A esto se suma el calentamiento del Atlántico (AMM) provocando más sequías durante la temporada seca, que es consistente con las tendencias significativas de disminución de la lluvia y la esorrentía en cuencas orientales del Amazonas después de mediados de la década de 1980 y durante las temporadas de niveles bajos (Lavado *et al.* 2012). La CP3 presenta una fuerte correlación negativa con el TNA acompañado con una débil señal en el Pacífico ecuatorial, durante la estación MAM antes del quiebre. La correlación negativa con el Pacífico ecuatorial central aumenta y desaparece la influencia del TNA después del quiebre. Para JJA se puede observar que durante el primer periodo la influencia principal es

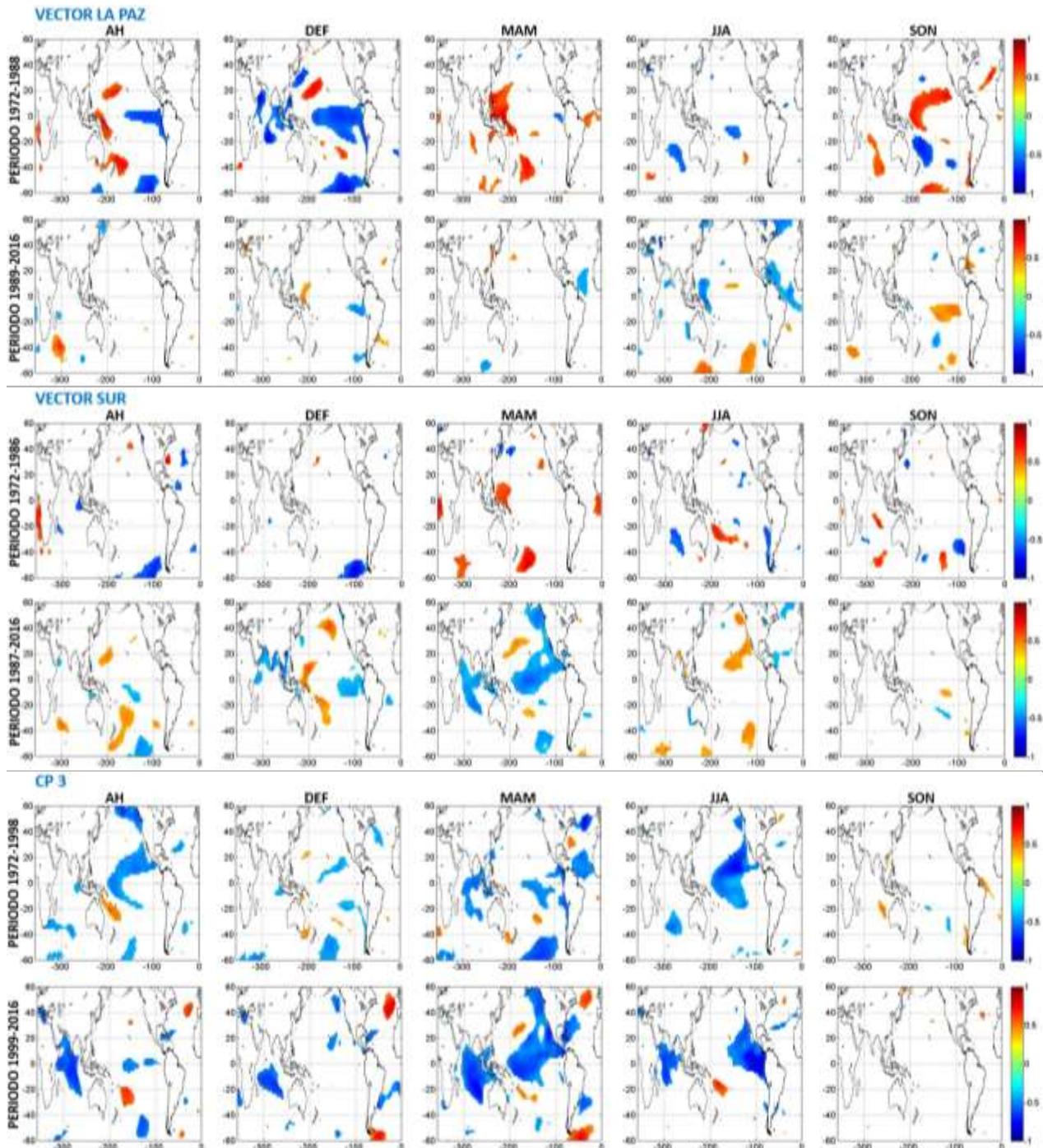
---

<sup>21</sup> VVA165W, Viento zonal a 200 hPa en el Pacífico Centro Oriental, región 5°N - 5°S y 165°W - 110°W.

<sup>22</sup> VVS175W, Viento zonal al Nivel de 850 hPa en el Pacífico Central, región 5°N - 5°S y 175°W - 140°W.

<sup>23</sup> VVS135W, Viento zonal al Nivel de 850 hPa en el Pacífico Oriental, región 5°N - 5°S y 135°W - 120°W.

del Niño central, mientras que El Niño oriental influye más después del quiebre. El vector Norte y la CP2, aun tomando en cuenta el quiebre en el año 1993, no muestran correlaciones significativas con ninguna región climática (ver Fig. A4 del Anexo).

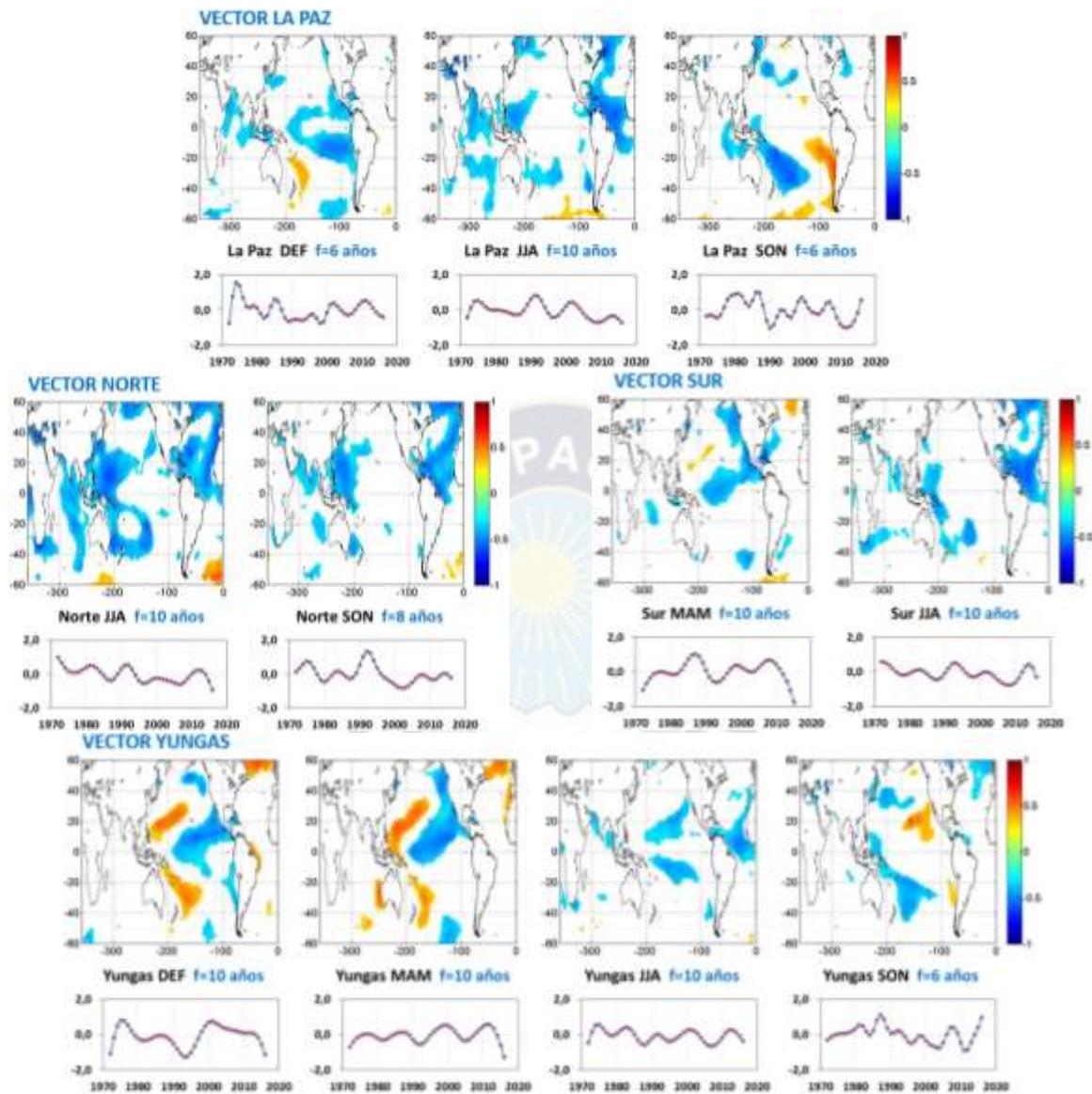


**Fig. 21.** Correlación de los vectores regionales La Paz, Sur y la CP3 contra la SST a nivel AH y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) considerando dos periodos correspondientes al año del quiebre, solo se trazan valores de  $p < 0,05$ . El valor de la correlación se muestra a la derecha en una paleta de colores entre rojo (+1) y azul (-1).

La transformada wavelet continua (CWT) permitió identificar señales climáticas con frecuencias entre 6 a 10 años con potencias significativas dentro del periodo de análisis en algunos vectores y estaciones del año (ver acápite 4.1.4). Estas señales fueron filtradas y correlacionadas con la SST con ayuda del programa Matlab. Los resultados se muestran en la Fig. 22. Las series filtradas del vector La Paz presentan las siguientes relaciones con la SST: en DEF correlacionándose negativamente con el Pacífico ecuatorial oriental y en menor grado con el Pacífico central y la zona de la PDO. En JJA con correlación negativa con el Atlántico Tropical Norte y Sur (TNA y TSA). Las series filtradas del vector Norte ya muestran alguna relación, correlacionándose negativamente con el Atlántico Norte Tropical y el Modo Atlántico Meridional para las estaciones JJA y SON. Las series filtradas del vector Sur, se correlacionan negativamente con el Pacífico ecuatorial central y la PDO para la estación MAM y con el TNA y TSA para la estación JJA. El comportamiento del vector Yungas es más claro con las series filtradas, correlacionándose negativamente con el Pacífico ecuatorial central y la PDO durante DEF. Esta correlación aumenta para la estación MAM y en la estación seca (JJA) la señal se traslada al Atlántico Norte Tropical con una correlación negativa.

En general estas series filtradas de frecuencia más baja permiten explicar mejor el patrón de la variabilidad y las relaciones con las regiones climáticas o índices climáticos ya descritos en las secciones anteriores. Se identifica una variabilidad decadal asociada al calentamiento por encima de lo normal en el Atlántico Norte Tropical y Sur, provocando una disminución de la precipitación y sequías intensas durante la temporada seca, en todos los grupos regionales. Durante la estación húmeda (DEF) la variabilidad decadal está asociada sobre todo al Pacífico central en los grupos Yungas y Sur. Stuecker (2018) ya identificó que la PDO y la PMM pueden considerarse manifestaciones de la variabilidad decadal del Pacífico central.

Durante la temporada húmeda, se identifica, una variabilidad interanual para los grupos regionales La Paz, Sur y Noroeste con un patrón característico de El Niño oriental y una variabilidad decadal en el grupo regional Yungas asociada a los eventos de El Niño central durante DEF y MAM.

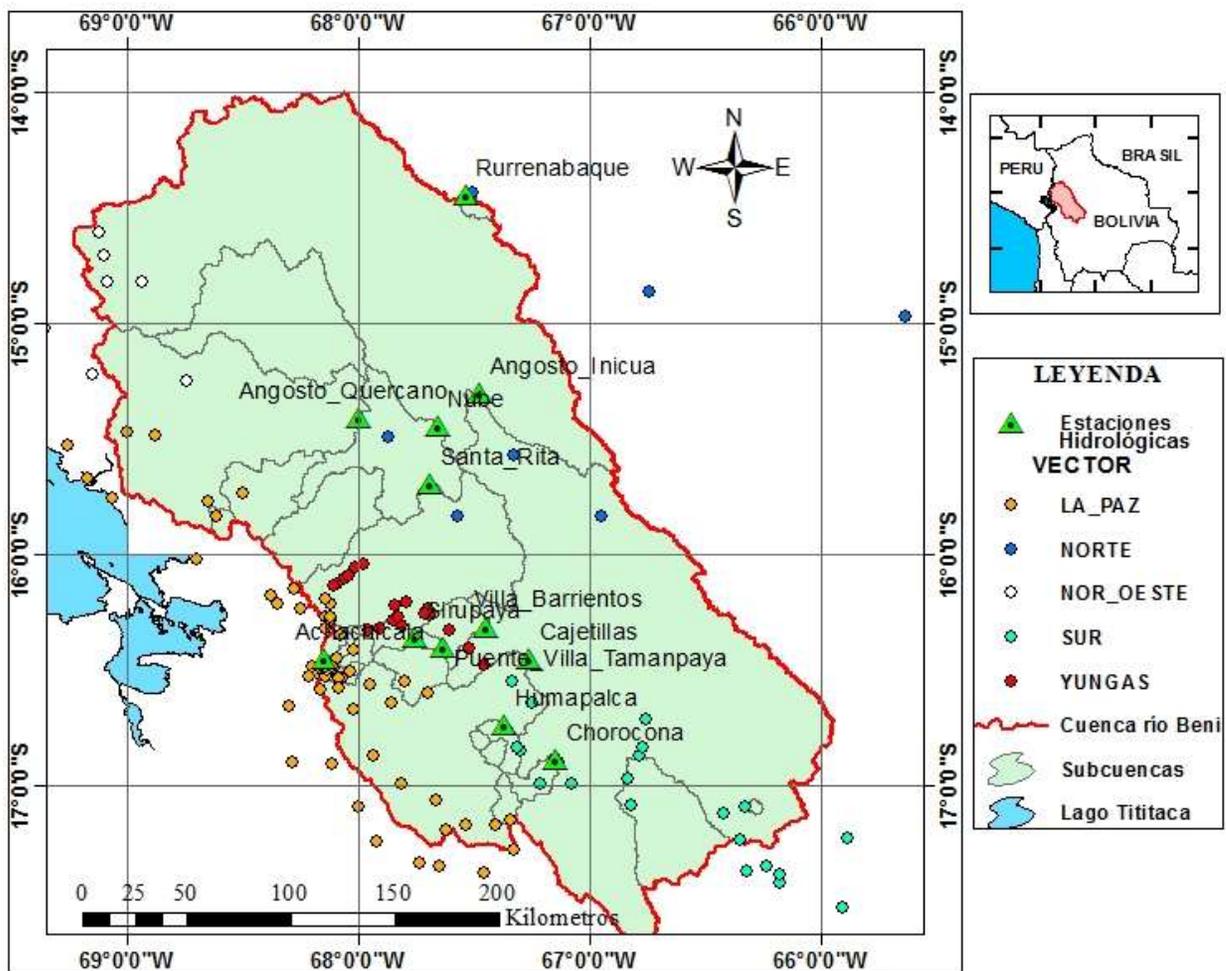


**Fig. 22.** Correlaciones entre las señales climáticas con potencias significativas (bajas frecuencias) de los vectores regionales identificadas por la CWT y la SST, la letra f indica la frecuencia en años de la serie estandarizada filtrada (adimensional), solo se trazan valores de  $p < 0,05$ . El valor de la correlación se muestra a la derecha en una paleta de colores entre rojo (+1) y azul (-1).

## 4.2.VARIABILIDAD HIDROLÓGICA.

La relación entre la SST y escurrimiento (Q) también fue evaluada para 16 estaciones hidrológicas de la cuenca andina del río Beni, en principio a nivel año hidrológico (AH). Para realizar una análisis estacional se siguió el procedimiento descrito en Molina *et al.* (2017a), considerando los promedios mensuales de los dos caudales máximos ( $Q_{max}$ ) y dos caudales mínimos ( $Q_{min}$ ) para cada año, que representan a la temporada alta y baja respectivamente. Se utilizó el promedio de la SST (DEF) y SST (JJA) para correlacionar la temporada alta ( $Q_{max}$ ) y baja ( $Q_{min}$ ) respectivamente.

Las subcuencas o microcuencas controladas por estas 16 estaciones hidrológicas se encuentran ubicadas en diferentes grupos regionales de precipitación y en algunos casos agrupan estaciones pluviométricas de más de un grupo regional (Fig. 23). Las microcuencas de Aranjuez, Holguin, Obrajes, Chicani, Achachicala pertenecen al grupo regional La Paz, lo mismo que Cajetillas. Esta última incluye algunas estaciones del grupo Sur en las microcuencas de Humapalca y Chorocona. Las estaciones Sirupaya, Villa Barrientos y Puente Villa Tamanpaya corresponden al grupo regional Yungas. La subcuenca controlada por la estación Angosto Inicua agrupa estaciones pluviométricas de los grupos regionales Sur y Norte y la de Santa Rita agrupa estaciones de los grupos regionales La Paz, Yungas y Norte. La subcuenca Angosto Quercano agrupa estaciones pluviométricas de los grupos regionales La Paz y Noroeste. Nube controla estaciones pluviométricas de los grupos regionales Norte, Yungas, La Paz y Noroeste. Finalmente la estación Rurrenabaque se encuentra a la salida de la cuenca (Angosto del Bala) donde todos los afluentes convergen o confluyen, por lo que es influenciada por todos los grupos regionales de precipitación.

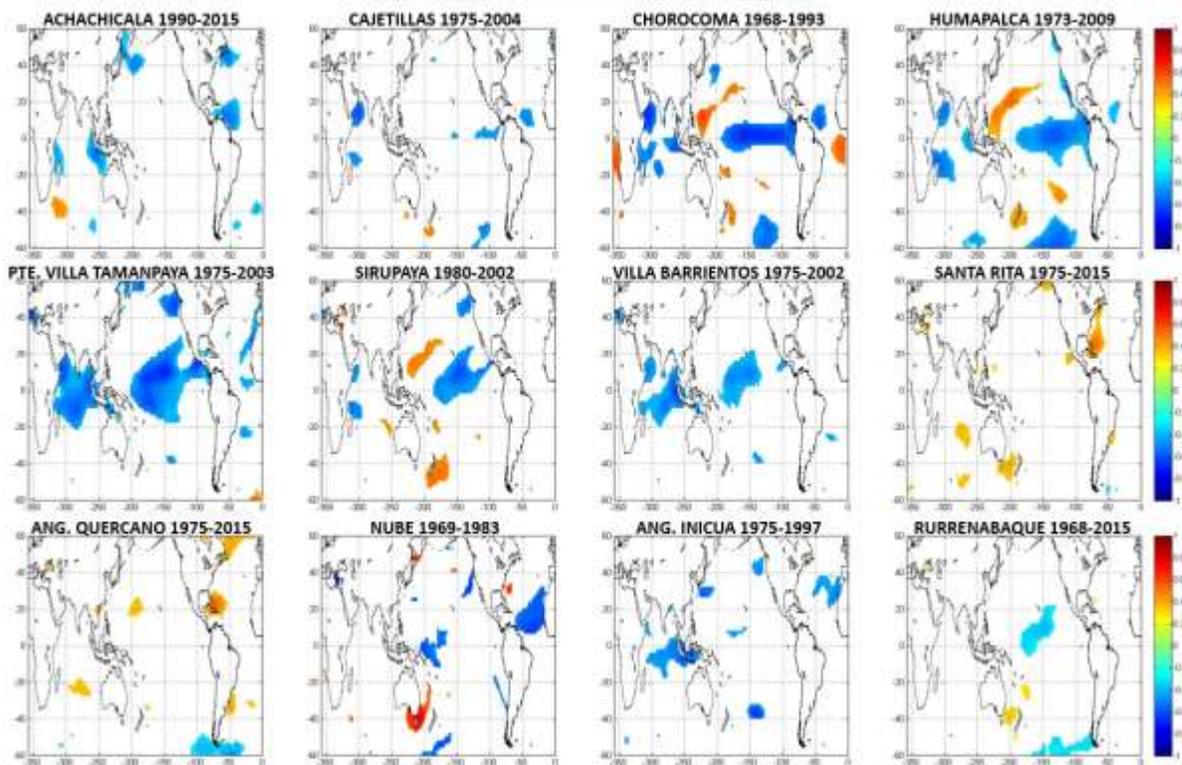


**Fig. 23.** Mapa de subcuencas y microcuencas en la cuenca andina del río Beni. Ubicación de 12 estaciones hidrológicas. Estaciones pluviométricas por grupo regional.

Las correlaciones no se realizaron sobre un periodo común, debido a que existen estaciones con series hidrológicas cortas y otras estaciones con series hidrológicas de larga data (por ejemplo: Nube 15 años y Rurrenabaque 48 años de registro). Además existen estaciones con registros interrumpidos o discontinuos (Cajetillas, Chorocona y Humapalca), por lo que se decidió correlacionar cada estación para su propio periodo disponible.

#### 4.2.1. Variabilidad anual (año hidrológico)

Las relaciones entre las series hidrológicas de caudal y la SST a nivel AH se muestran en la Fig. 24. La estación Achachicala se correlaciona negativamente con el Modo Atlántico Meridional (AMM) y la TNA, que es consistente con el grupo regional La Paz para el periodo después del quiebre donde existe un debilitamiento de El Niño y toma más protagonismo el Atlántico Norte Tropical (ver Fig. 21). Cajetillas muestra una correlación significativa débil con el Pacífico ecuatorial y el TNA, pero que es consistente con el grupo regional La Paz a nivel AH (ver Fig. 19). Una correlación negativa con el Pacífico ecuatorial oriental y central se presenta en las estaciones Chorocona y Humapalca, que es consistente con el grupo regional Sur a nivel AH (ver Fig. 19). Las series hidrológicas de las estaciones Puente Villa Tamanpaya, Sirupaya y Villa Barrientos se correlacionan negativamente con el Pacífico ecuatorial central, que es consistente con el patrón característico del grupo regional anual Yungas (ver Fig. 19).



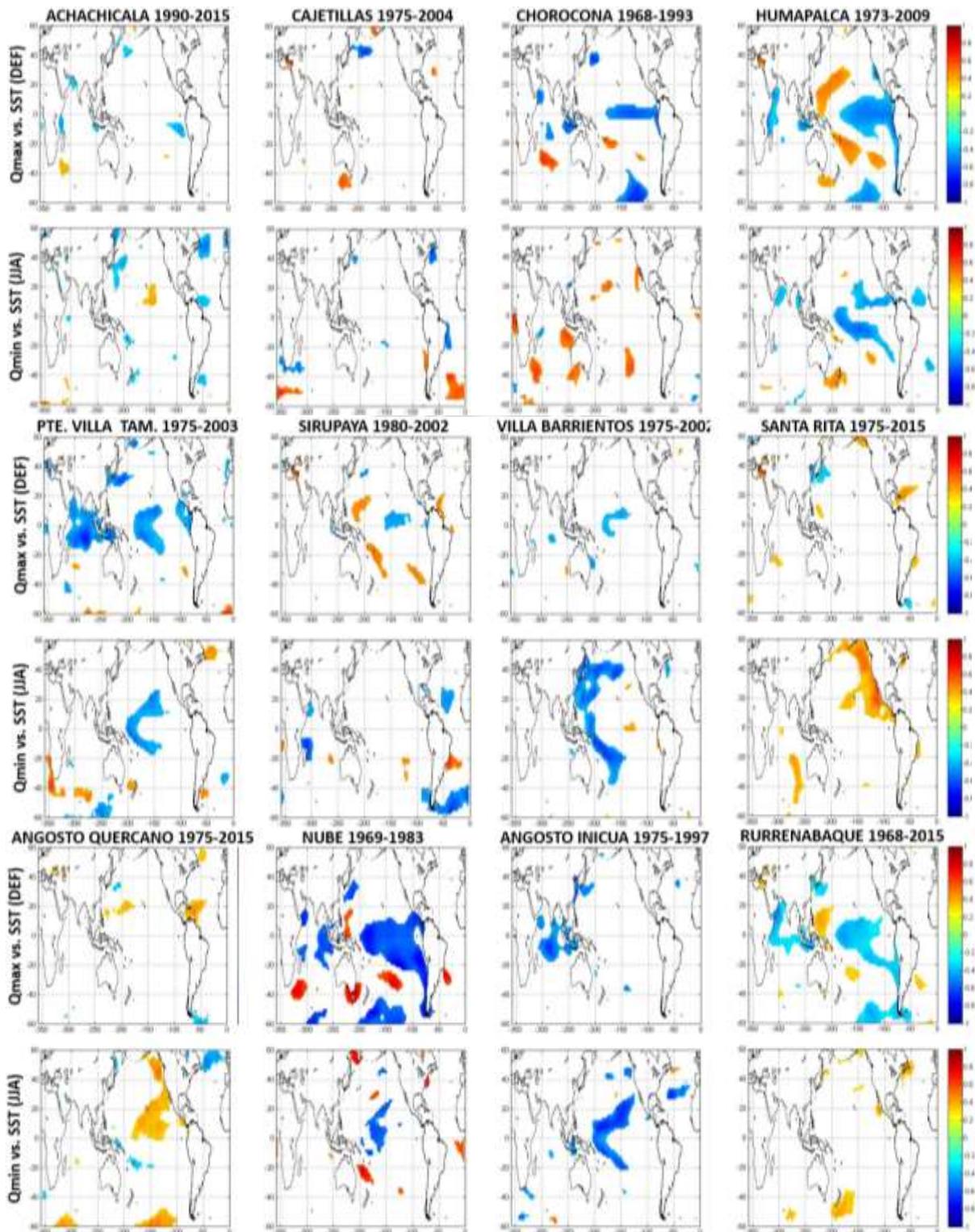
**Fig. 24.** Correlaciones entre series de caudal (Q) de estaciones hidrológicas y la SST a nivel año hidrológico, solo se trazan valores de  $p < 0,05$ . El valor de la correlación se muestra a la derecha en una paleta de colores entre rojo (+1) y azul (-1).

La estación Nube muestra una correlación negativa con el Atlántico Norte Tropical y la AMM. Rurrenabaque presenta una correlación negativa significativa con el Pacífico ecuatorial central. Las estaciones Santa Rita, Angosto Quercano y Angosto Inicua no muestran correlaciones significativas con la SST del Pacífico ecuatorial ni del Atlántico, probablemente debido a que estas subcuencas agrupan estaciones pluviométricas de diferentes grupos regionales, mezclando patrones de variabilidad. Las estaciones Aranjuez, Holguin, Obrajes y Chicani no muestran un patrón claro de variabilidad, probablemente debido a la influencia urbana y la antropización (ver Fig. A5 del Anexo).

#### 4.2.2. Variabilidad estacional (Qmax y Qmin)

Las relaciones entre las aguas altas (Qmax), aguas bajas (Qmin) y la SST de DEF y JJA respectivamente se muestran en la Fig. 25. La estación Achachicala presenta una correlación negativa débil con el Pacífico ecuatorial oriental con Qmax y una correlación negativa con el AMM con Qmin. Estos resultados son consistentes con el comportamiento que presenta el vector de precipitación La Paz en el periodo después del quiebre (Fig. 21). Cajetillas no presenta ningún patrón característico en temporada de aguas altas y bajas. Chorocona y Humapalca se correlacionan negativamente con el Pacífico ecuatorial central y oriental con Qmax, que concuerda con la relación que presenta el vector Sur en la estación húmeda: Para Qmin solo Humapalca presenta una correlación negativa con el AMM, que es consistente también con la relación que se presenta en el vector Sur durante la estación seca (ver Fig. 19). Chorocona no presenta ningún patrón característico en Qmin probablemente debido a que su periodo de registro corresponde al periodo antes del quiebre del vector Sur (1972-1986), para el que no se encontró influencia del Pacífico ecuatorial ni del Atlántico (ver Fig. 21).

Durante la época de aguas altas las estaciones Puente Villa Tamanpaya, Sirupaya y Villa Barrientos se correlacionan negativamente con el Pacífico ecuatorial central. Para Qmin no se identifica ningún patrón característico, lo que es consistente con el patrón de variabilidad del grupo regional Yungas, para el que solo se encontró una correlación inversa con el Pacífico ecuatorial central durante la estación húmeda (ver Fig. 19). Para la temporada de aguas altas las estaciones Rurrenabaque y Nube presentan una correlación negativa con el Pacífico ecuatorial central, que es consistente con la variabilidad del caudal de la estación de aguas altas en los afluentes andinos del río Madeira durante el verano austral (Molina-Carpio *et al.* 2017a). Se observa también una correlación positiva con el Atlántico Sur Subtropical, asociada al calentamiento de esta región del océano, lo que provocó la inundación del 2014 durante el verano austral (Espinoza *et al.* 2014) por exceso de lluvia en las llanuras del Beni y el pie de monte andino. No se identificó una relación de Qmin en Rurrenabaque con la SST de alguna región oceánica. Las estaciones hidrológicas Angosto Inicua, Angosto Quercano y Santa Rita no identifican ningún patrón de variabilidad con la SST para Qmax y Qmin. Esto se debe a la presencia de más de un grupo regional dentro de la misma subcuenca, provocando una mezcla de patrones de variabilidad. Al igual que el análisis a nivel año hidrológico las estaciones Aranjuez, Holguin, Obrajes y Chicani no muestran un patrón de variabilidad claro en temporada de aguas altas y bajas (ver Fig. A6 del Anexo).



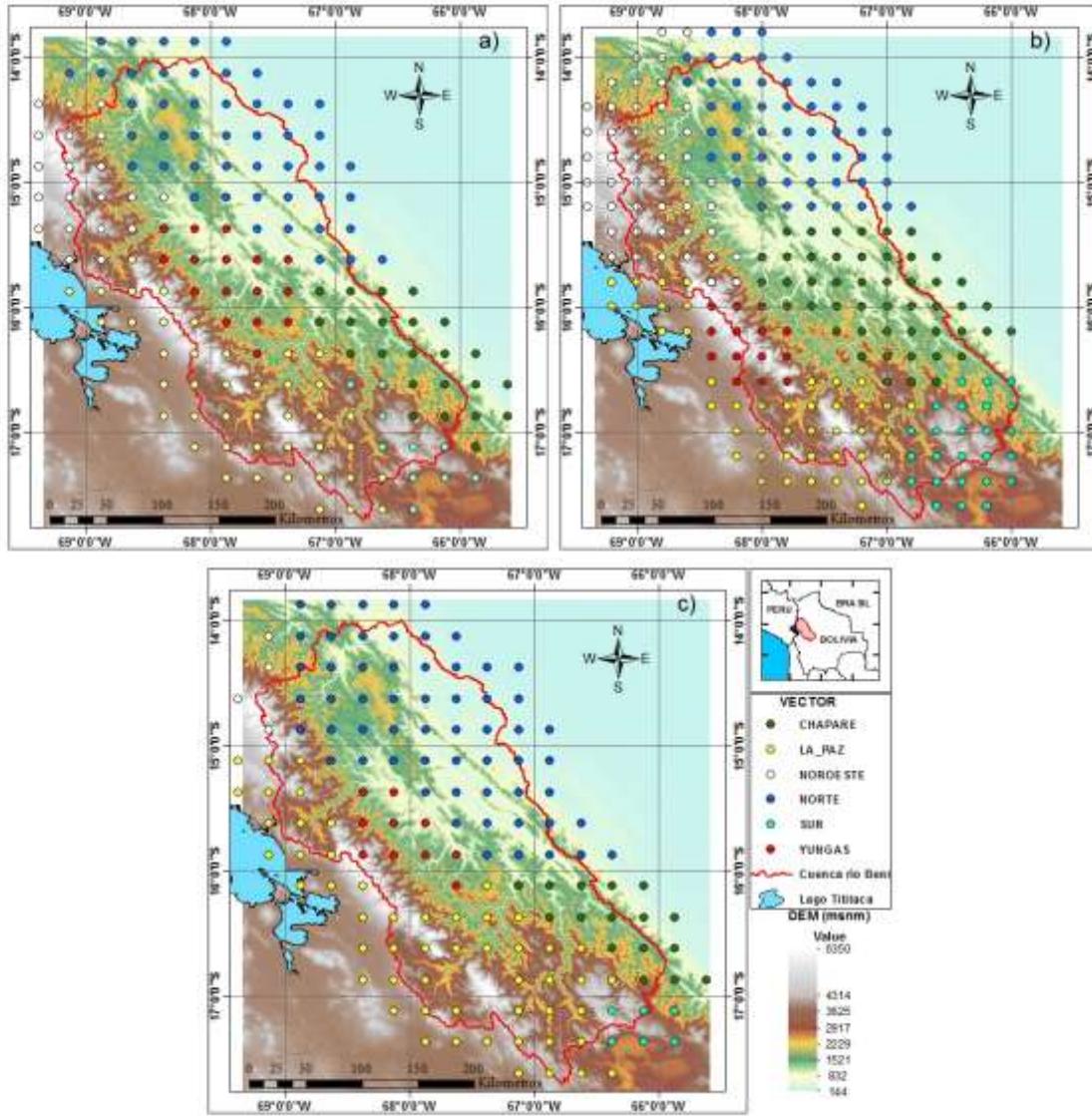
**Fig. 25.** Correlación entre: descarga en 12 estaciones hidrológicas con descarga media para los dos meses con descarga máxima (Qmax) y SST (DEF); descarga en las estaciones hidrológicas con descarga media para los dos meses con descarga mínima (Qmin) y SST (JJA). Solo se trazan valores de  $p < 0.05$ . El valor de la correlación se muestra a la derecha en una paleta de colores entre rojo (+1) y azul (-1).

En resumen la variabilidad hidrológica en la cuenca está asociada a escalas de tiempo interanual y decadal, además está directamente relacionada con la precipitación regional. En general las estaciones hidrológicas presentan una correlación negativa con la SST del Pacífico ecuatorial durante aguas altas ( $Q_{max}$ ), que es consistente con la variabilidad principal que caracterizan a los grupos regionales de precipitación durante el verano austral. También se identificó una correlación positiva entre la SST del Atlántico Sur Subtropical en las estaciones Nube y Rurrenabaque, lo que indica que anomalías positivas en el Atlántico Sur Tropical provocan exceso de lluvias durante la estación húmeda, como durante la inundación en el año 2014. Para la temporada de aguas bajas ( $Q_{min}$ ) no se identifica un patrón característico dominante. Solamente 4 estaciones: Achachicala, Cajetillas, Humnapalca y Puente Villa Tamanpaya están relacionadas inversamente con el TNA lo que implica una disminución del escurrimiento con anomalías positivas en la SST del TNA, que es consistente con el patrón dominante en todos los grupos regionales de precipitación.

#### **4.3.EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA DE DATOS SATELITALES.**

La comparación se realizó desde el punto de vista de la variabilidad climática de las estaciones terrestres (CP y VR) utilizando la correlación de Pearson. Una vez definidas las estaciones terrestres de cada grupo regional y las estaciones terrestres para el ACP (EST), se tomó el valor del dato puntual satelital (pixel), que corresponde a cada estación terrestre que conforma cada grupo regional y las estaciones que fueron sometidas al ACP. Así se obtuvieron las series temporales de los índices de los vectores y las series de los CP para los productos satelitales (TRMM, CHIRPS y MSWEP) tanto a nivel año hidrológico como estacional. Se utilizaron 120 estaciones terrestres para el periodo 1982-2016 y 80 estaciones terrestres para el periodo 1999-2016. Esto debido a que el VR requiere como mínimo tres datos pluviométricos por cada estación y tres datos pluviométricos por cada año (ver Tabla A2 y A3 del Anexo).

Adicionalmente se aplicó el MVR y el ACP independientemente a todas las bases de datos satelitales (todos los píxeles sobre la cuenca). Los resultados son similares a cuando se aplican a los píxeles correspondientes a las estaciones terrestres, con la diferencia de que los tres productos satelitales (TRMM\_G, CHIRPS\_G y MSWEP\_G) incorporan un nuevo vector denominado Vector Chapare\_G (Fig. 26). Se intentó formar este vector utilizando estaciones terrestres pero no se logró formar un vector continuo dentro del periodo de estudio debido a que estas estaciones no tenían series completas de precipitación.



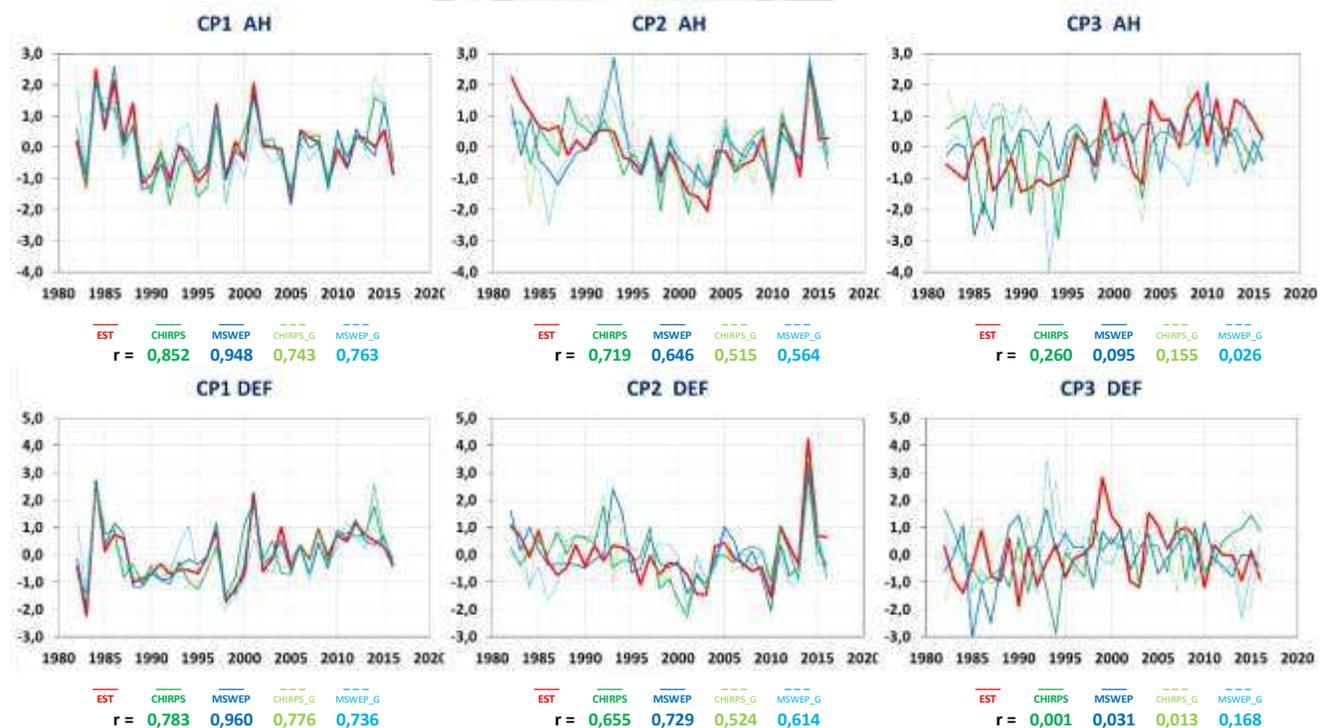
**Fig. 26.** Conformación de grupos regionales con datos pluviométricos de productos satelitales. a) datos CHIRPS\_G periodo 1982-2016 con 160 pixeles, b) datos MSWEP\_G periodo 1982-2016 con 231 pixeles y c) datos TRMM\_G periodo 1999-2016 con 150 pixeles.

#### 4.3.1. Analisis de componentes principales.

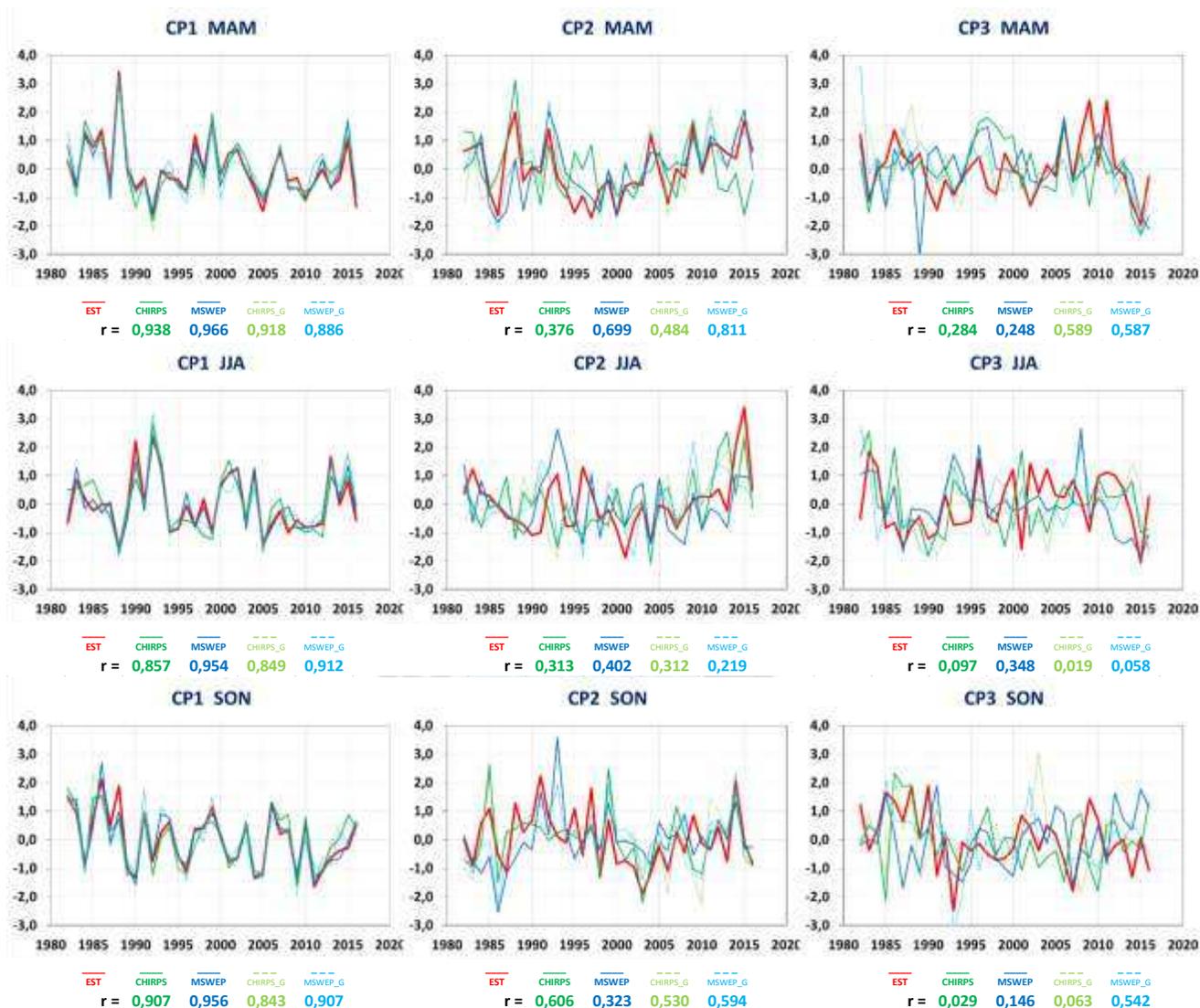
La comparación entre las series de los CP de estaciones terrestres (EST) y los productos satelitales (CHIRPS y MSWEP) se muestra en la Fig. 27 a nivel AH y estacional. Existe una alta correlación positiva entre la CP1 de estaciones terrestres y satelitales. El producto MSWEP muestra un coeficiente de correlación estadísticamente significativo ( $r > 0,95$ ;  $p < 0,01$ ), al igual que CHIRPS ( $r > 0,78$ ;  $p < 0,05$ ). La CP1, que presenta una correlación directa con las estaciones al occidente de la cuenca (La Paz, Sur y Noroeste), indica un déficit de lluvias durante los eventos extremos de El Niño 1982-83, 1997-98 durante la estación húmeda y 2004-05 durante la estación seca. El valor de la correlación disminuye para la CP2, que se correlaciona positivamente con las estaciones terrestres al Norte de la cuenca. El producto MSWEP es

moderadamente significativo a nivel AH y estacional ( $r > 0,40$ ;  $p < 0,05$ ) excepto durante SON, mientras que CHIRPS presenta un coeficiente de correlación significativo a nivel AH y estacional ( $r > 0,31$ ;  $p < 0,05$ ) excepto en la estación seca (JJA). Ambos productos satelitales identifican el exceso de la precipitación durante el verano austral del año 2014 al igual que las estaciones terrestres. La CP3, que está asociada al grupo regional Yungas, solo presenta una correlación significativa con el producto MSWEP ( $r = 0,35$ ;  $p < 0,05$ ) para la estación JJA (ver Tabla A9 del Anexo).

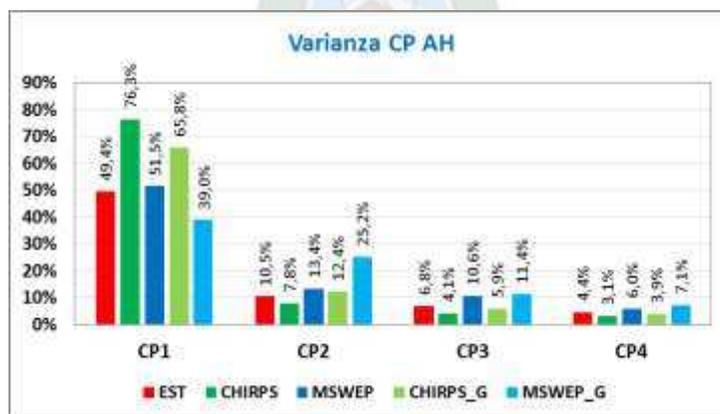
Por otro lado la CP1 (AH) de los datos CHIRPS explica el 76,3 % de la varianza total, un porcentaje mayor en comparación a las estaciones terrestres y MSWEP (Fig. 28). Como la CP1 se correlaciona negativamente con la SST del Pacífico ecuatorial oriental presentando una variabilidad interanual (ENSO), esto sugiere que los PPS CHIRPS tiene un sesgo a establecer relación con la región del océano Pacífico (Niño 1+2, Niño 3, Niño 4), mientras que la varianza explicada por la CP1 de MSWEP (51,5 %) parece ser más consistente con los datos terrestres (49,4 %). El mismo comportamiento se puede observar a nivel estacional (ver Fig. A7 del Anexo).



**Fig. 27.** Series estandarizadas de las tres primeras CP de las estaciones terrestres (EST) y los productos satelitales (CHIRPS y MSWEP) a nivel año hidrológico y estacional para el periodo 1982-2016 y sus correlaciones respecto a las series de EST.



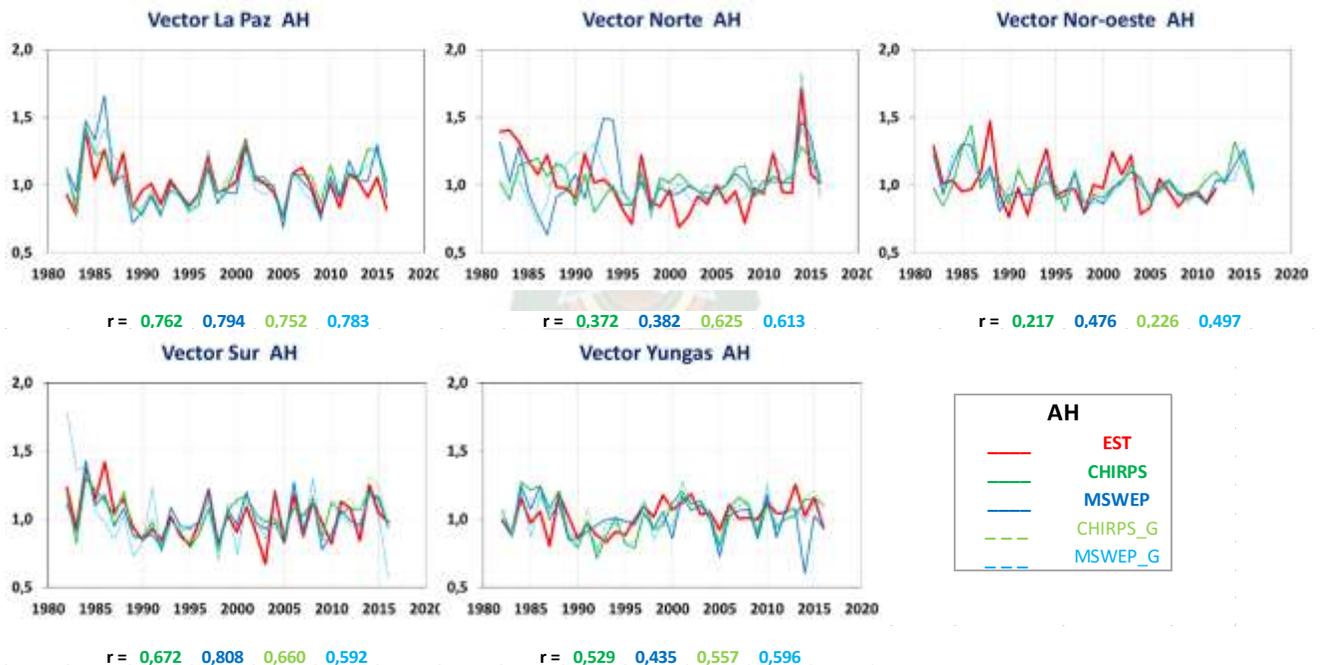
**Fig. 27 (cont).** Series estandarizadas de las tres primeras CP de las estaciones terrestres (EST) y los productos satelitales (CHIRPS y MSWEP) a nivel año hidrológico y estacional para el periodo 1982-2016 y sus correlaciones respecto a las series de EST.



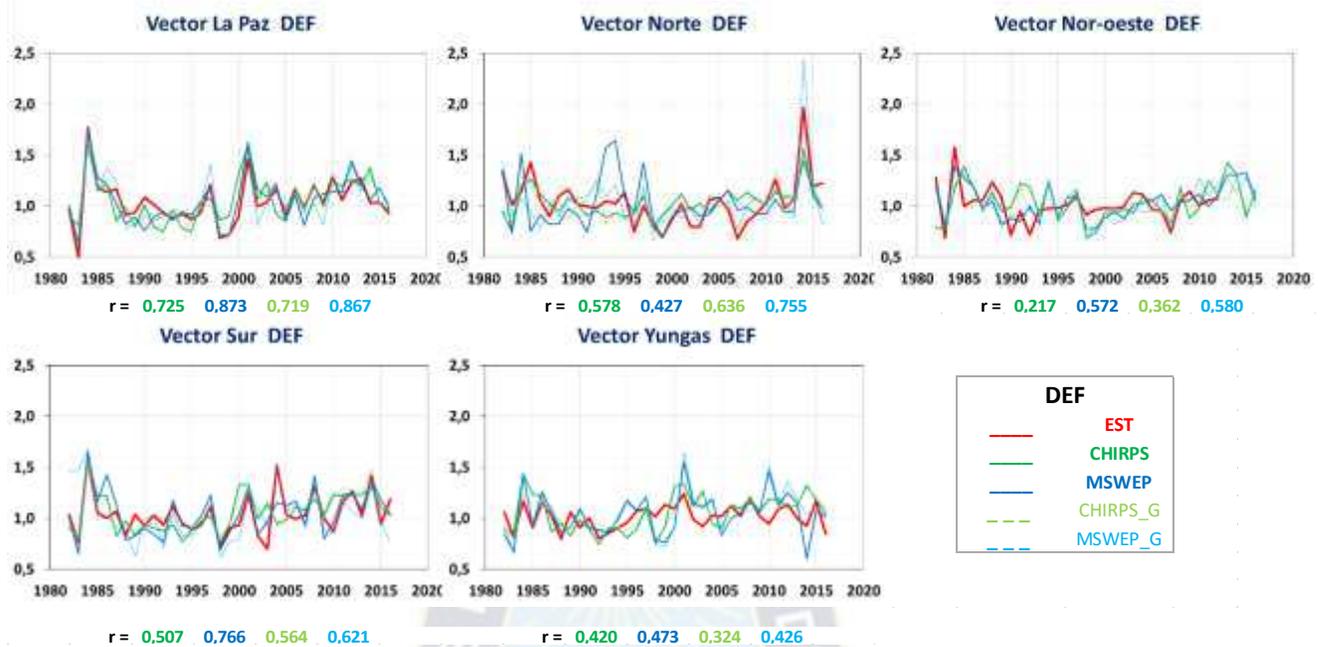
**Fig. 28.** Varianza parcial de las cuatro primeras CP (AH) de estaciones terrestres (EST) y productos satelitales (CHIRPS y MSWEP), periodo 1982-2016.

### 4.3.2. Vector regional.

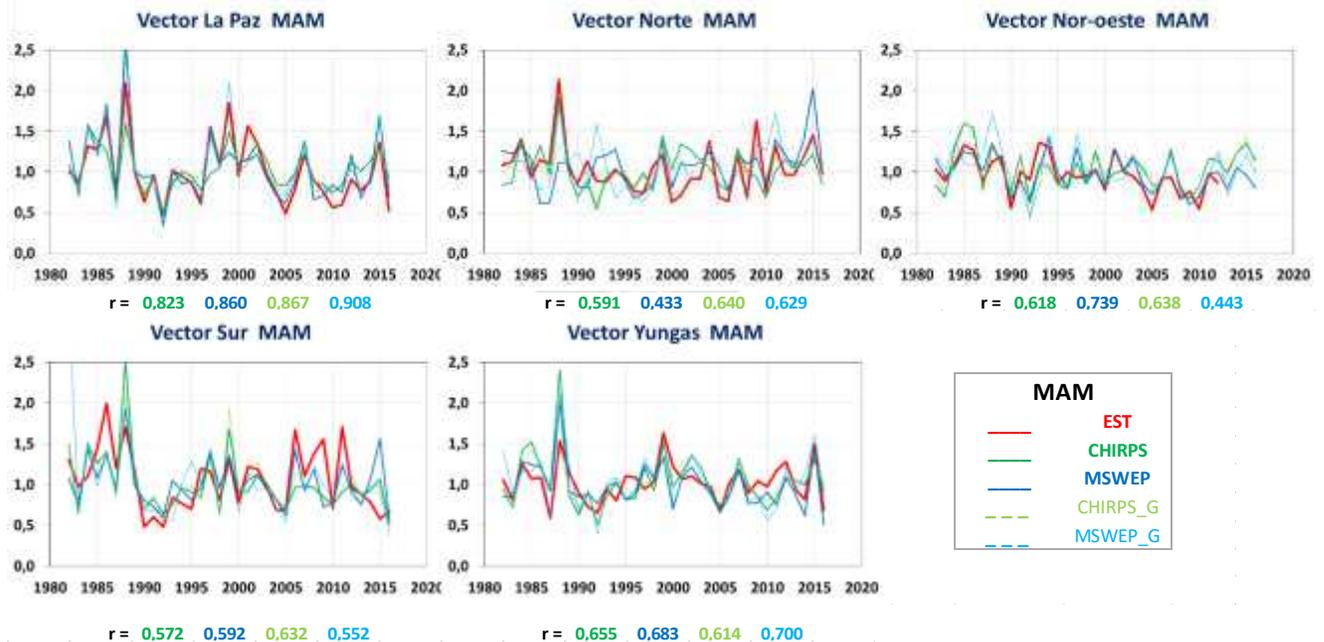
La comparación entre los índices de los vectores regionales de estaciones terrestres (EST) y los productos satelitales (CHIRPS y MSWEP) a nivel AH y estacional se muestran en las Figuras 29 al 33. El grupo regional La Paz MSWEP presenta la mejor correlación significativa ( $r > 0,79$ ;  $p < 0,01$ ) seguida de CHIRPS ( $r > 0,73$ ;  $p < 0,05$ ) tanto a nivel AH y estacional. Este vector indica déficit de lluvias ( $VR < 1$ ) durante fuertes eventos El Niño 1982-83, 2004-05 y 2015-16. Las series del grupo regional Norte también son estadísticamente significativas: el producto que mejor representa la variabilidad climática es el MSWEP ( $r > 0,38$ ;  $p < 0,05$ ) seguido de CHIRPS ( $r > 0,37$ ;  $p < 0,05$ ). Ambos productos identifican el exceso de lluvias que se produjo durante el verano austral del año 2014. Para el grupo regional Noroeste solo el producto MSWEP presenta correlaciones significativas a nivel AH y estacional ( $r > 0,48$ ;  $p < 0,05$ ) mientras que CHIRPS solo presenta altas correlaciones significativas para las estaciones MAM, JJA y SON ( $r > 0,63$ ;  $p < 0,05$ ), las series de este grupo regional indican déficit de lluvias durante los eventos El Niño 1991-92, 1997-98 en las EST y el MSWEP. CHIRPS identifica un exceso de lluvia ( $VR > 1$ ) durante El Niño 1991-92 lo que no es consistente con las EST y MSWEP. Las series del grupo regional Sur presentan correlaciones significativas para MSWEP ( $r > 0,59$ ;  $p < 0,05$ ) y algo inferiores para CHIRPS ( $r > 0,43$ ;  $p < 0,05$ ), tanto a nivel AH y estacional. En las series de EST y MSWEP están bien marcados los eventos El Niño 1982-83, 1997-98, 2002-03 y 2009-10 donde se registraron déficit de lluvias. Nuevamente CHIRPS presenta un aumento de la precipitación durante El Niño 2009-10 en la estación húmeda. Las series del vector Yungas identifican déficit de precipitaciones durante JJA para los eventos moderados de El Niño 1987-88, 1991-92 y 2004-05, MSWEP muestra una correlación significativa a nivel AH y estacional ( $r > 0,44$ ;  $p < 0,05$ ) al igual que CHIRPS pero de menor magnitud ( $r > 0,42$ ;  $p < 0,05$ ) (ver Tabla A10 del Anexo).



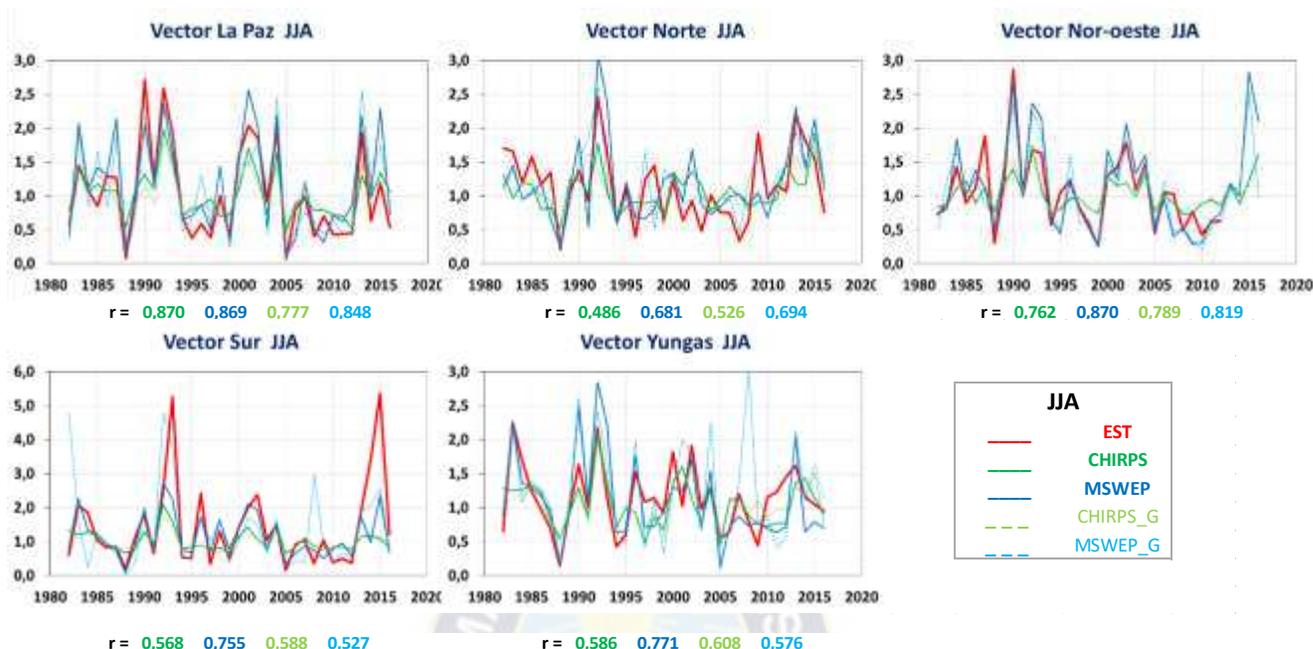
**Fig. 29.** Índices de los vectores regionales (AH) de estaciones terrestres (EST) y productos satelitales (MSWEP y CHIRPS), periodo 1982-2016 y sus correlaciones respecto a los índices de EST.



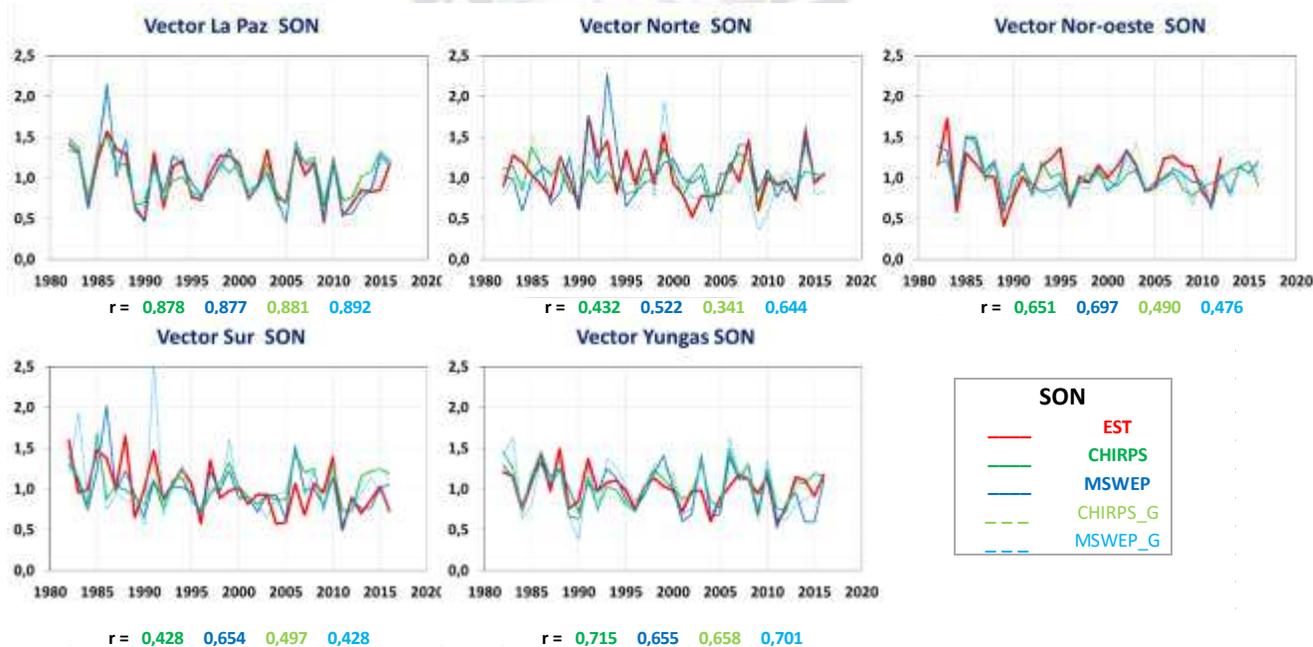
**Fig. 30.** Índices de los vectores regionales (DEF) de estaciones terrestres (EST) y productos satelitales (MSWEP y CHIRPS), periodo 1982-2016 y sus correlaciones respecto a los índices de EST.



**Fig. 31.** Índices de los vectores regionales (MAM) de estaciones terrestres (EST) y productos satelitales (MSWEP y CHIRPS), periodo 1982-2016 y sus correlaciones respecto a los índices de EST.



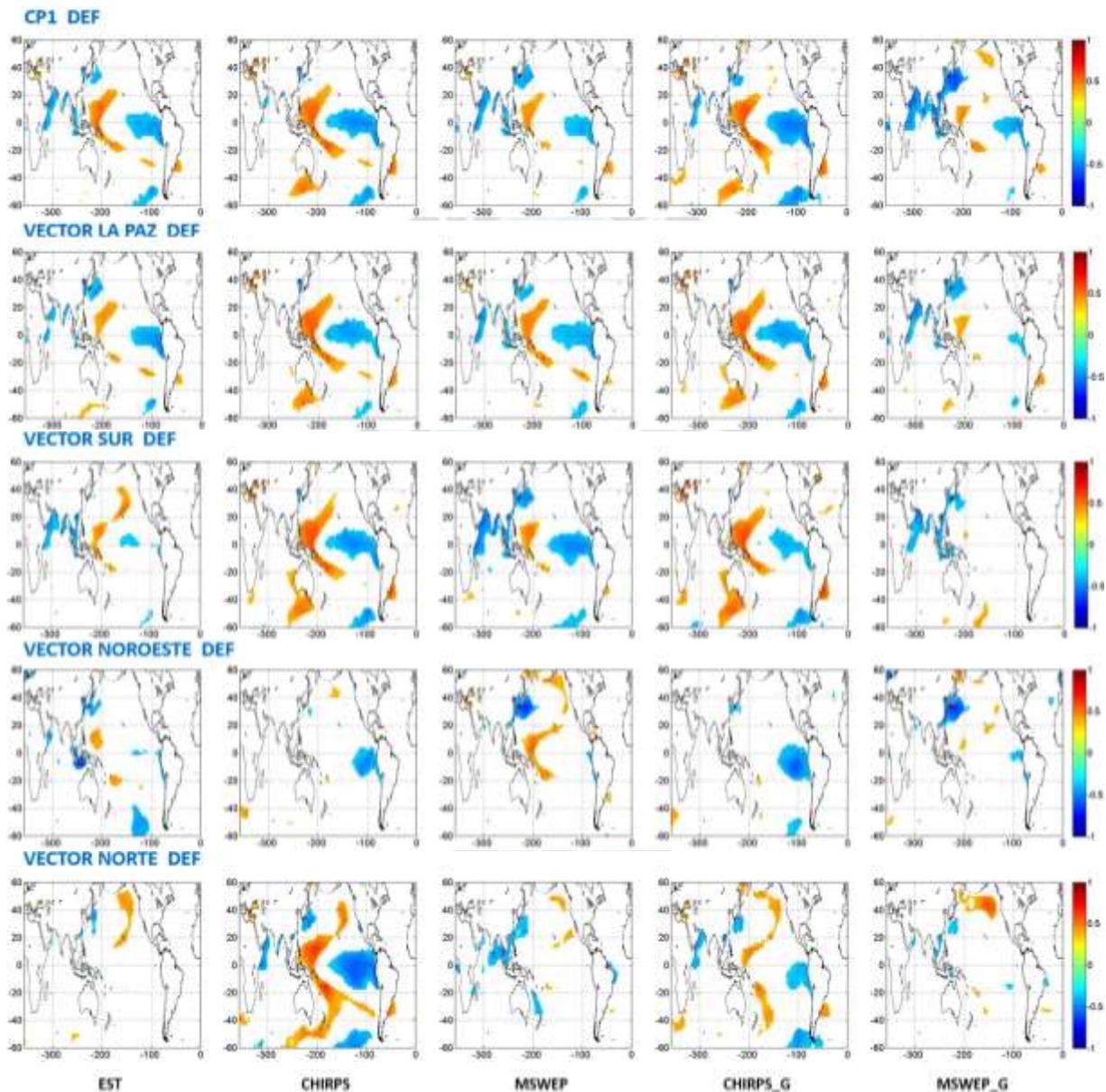
**Fig. 32.** Índices de los vectores regionales (JJA) de estaciones terrestres (EST) y productos satelitales (MSWEP y CHIRPS), periodo 1982-2016 y sus correlaciones respecto a los índices de EST.



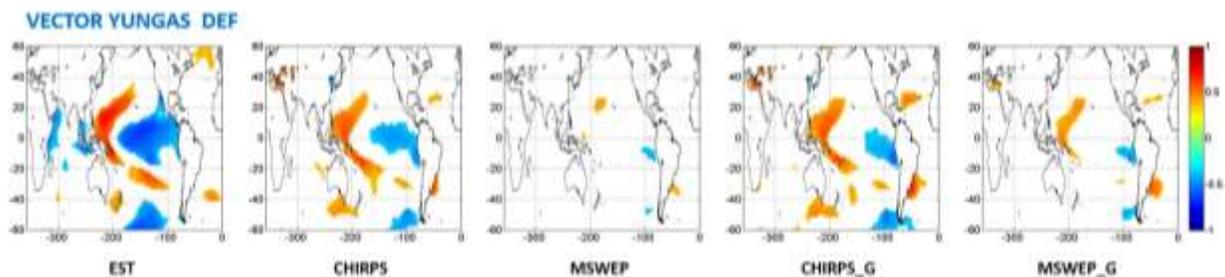
**Fig. 33.** Índices de los vectores regionales (SON) de estaciones terrestres (EST) y productos satelitales (MSWEP y CHIRPS), periodo 1982-2016 y sus correlaciones respecto a los índices de EST.

La variabilidad climática de los grupos regionales La Paz, Sur y Noroeste parece ser mejor representadas por MSWEP mostrando correlaciones mayores a 0,8, 0,6 y 0,5 respectivamente. La variabilidad de estos grupos regionales está asociada al calentamiento del Pacífico ecuatorial (El

Niño), variabilidad que es explicada también por la CP1. En la Fig. 34 se presenta el patrón de variabilidad de El Niño en la CP1 y el vector La Paz, donde se puede observar claramente que las EST y MSWEP se correlacionan negativamente con El Niño oriental mientras que la señal de CHIRPS se relaciona más con el Pacífico ecuatorial central o El Niño central. El vector Norte también es mejor representado por MSWEP donde muestra una correlación positiva débil con la PDO al igual que las EST, mientras que CHIRPS otra vez exagera la correlación positiva con la PDO e incluso aparece una señal fuerte de El Niño en el Pacífico ecuatorial.



**Fig. 34.** Correlación entre la SST (DEF) y las series (DEF) de: la CP1 y los vectores regionales La Paz, Sur, Noroeste, Norte y Yungas de estaciones terrestres (EST) y productos satelitales (CHIRPS y TRMM), periodo 1982-2016.



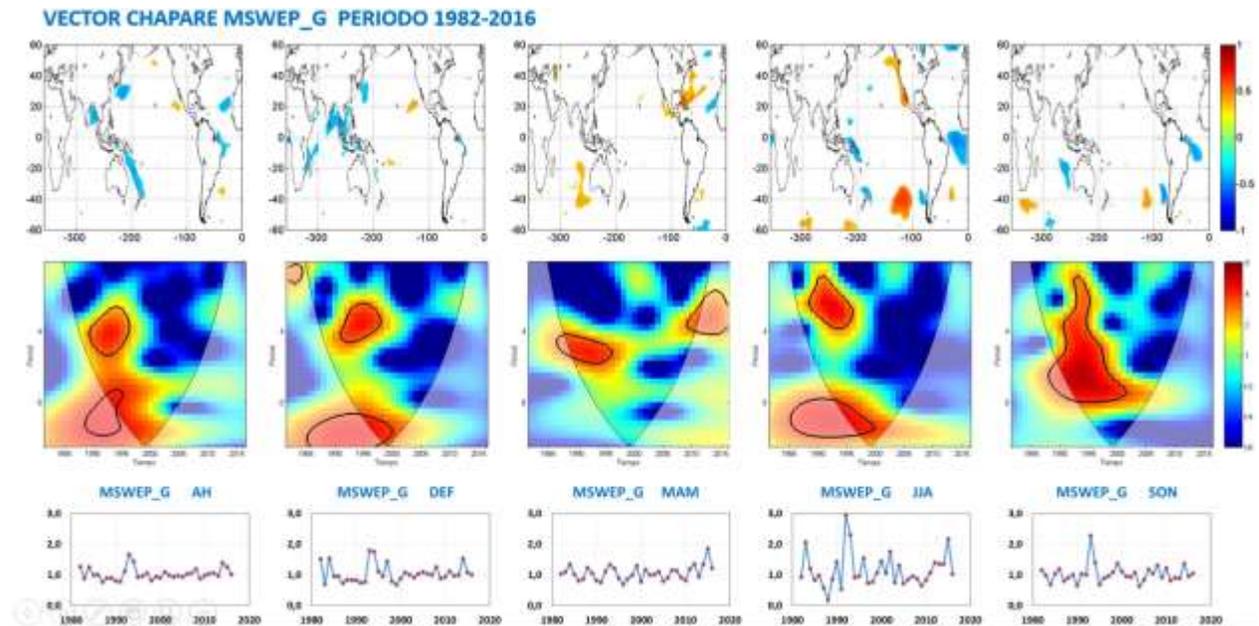
**Fig. 35.** Correlación entre la SST (DEF) y las series (DEF) de: la CP1 y los vectores regionales La Paz, Sur, Noroeste, Norte y Yungas de estaciones terrestres (EST) y productos satelitales (CHIRPS y TRMM), periodo 1982-2016.

Por otro lado CHIRPS parece representar mejor la variabilidad del grupo regional Yungas, que se correlaciona negativamente con el Pacífico ecuatorial central, variabilidad que es representado mejor por CHIRPS, mientras que MSWEP no presenta ninguna relación con la SST (Fig. 35).

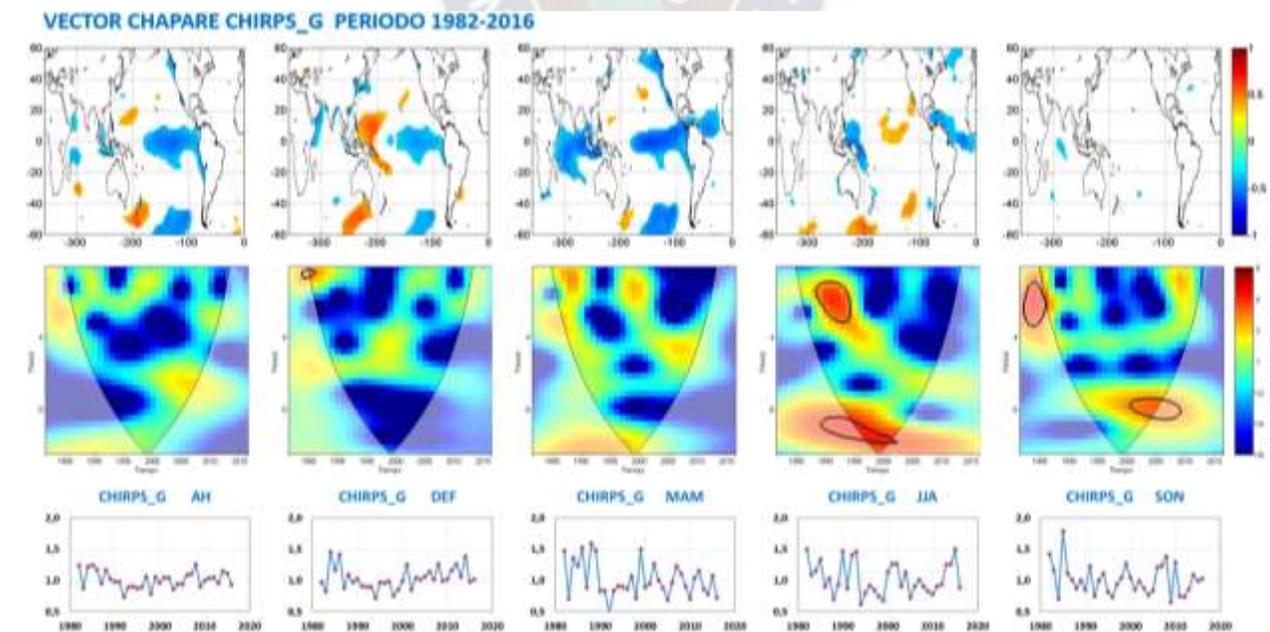
Adicionalmente con ayuda de los PPS CHIRPS y MSWEP, sobre toda la cuenca, se logró formar el grupo regional Chapare\_G, región donde las series de precipitación de las estaciones terrestres no lograban formar un vector continuo para el periodo 1972-2016. Este grupo regional presenta diferentes patrones de variabilidad para cada producto satelital. El MSWEP presenta una correlación significativa negativa con el Atlántico Sur Tropical (TSA) durante la estación seca (JJA) y en las demás estaciones del año no se identifica ningún patrón característico al igual que el grupo regional Yungas MSWEP (Fig. 36). Sin embargo CHIRPS identifica un patrón de variabilidad decadal asociado al Niño central, correlacionándose negativamente con la SST del Pacífico ecuatorial central durante la estación húmeda. Durante la estación MAM la relación con la SST del Pacífico ecuatorial central se intensifica y aparece una correlación negativa con el TNA y este último se mantiene hasta la estación seca junto a la señal del TSA (Fig. 37). Este comportamiento es consistente con el grupo regional Yungas (1972-2016) donde se encontró que existe una teleconexión en una escala de tiempo decadal entre anomalías positivas del Pacífico ecuatorial central y el Atlántico Norte Tropical. Además, la región del Chapare se caracteriza por tener una fuerte precipitación orográfica asociada a un flujo muy húmedo de bajo nivel (SALLJ) en condiciones de relieve que favorecen un rápido ascenso y convergencia (Espinoza *et al.* 2015). El vector Chapare CHIRPS\_G indica déficit de lluvias durante fuertes y moderados eventos El Niño 1982-83, 1991-92 y 1997-98 en la estación húmeda y extremas sequías durante 2005 en las estaciones MAM y JJA, que es consistente con estudios previos donde señalaron al calentamiento del TNA como una influencia importante en la sequía de 2005 (Espinoza *et al.* 2011, Builes *et al.* 2018).

El producto satelital TRMM es el que presenta las más bajas correlaciones contra las EST. Solamente la CP1 y el vector La Paz TRMM describen aceptablemente la variabilidad climática temporal en esa región mostrando los mismos patrones de las EST y concuerdan con las correlaciones encontradas durante el periodo después del quiebre. También se puede rescatar la alta similitud que presenta el grupo regional Norte durante las estaciones DEF y MAM, incluso presentan correlaciones más altas que MSWEP. Sin embargo en las otras estaciones del año los patrones de variabilidad son muy diferentes al igual que en los grupos regionales Sur, Yungas y

Noroeste TRMM donde no se refleja el patrón de variabilidad de las EST. Esta es la razón por lo que no se recomienda el uso de los PPS de TRMM para analizar la variabilidad climática de la cuenca andina del río Beni (ver Figuras A8 y A9 del Anexo).



**Fig. 36.** Grupo regional Chapare formado con el PPS MSWEP sobre la cuenca andina del río Beni. Correlación entre el VR Chapare y la SST (arriba), Transformada wavelet continua (CWT) (medio) e índices del vector regional (abajo) a nivel AH y estacional, periodo 1982-2016.



**Fig. 37.** Grupo regional Chapare formado con el PPS CHIRPS sobre la cuenca andina del río Beni. Correlación entre el VR Chapare y la SST (arriba), Transformada wavelet continua (CWT) (medio) e índices del vector regional (abajo) a nivel AH y estacional, periodo 1982-2016.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El Método del Vector Regional (MVR) a nivel AH permitió identificar 5 regiones pluviométricas con un comportamiento homogéneo, exhibiendo una variabilidad pluviométrica multianual similar entre las estaciones constituyentes de cada región. El cálculo de los 5 índices (vectores La Paz, Norte, Noroeste, Sur y Yungas) resume la variabilidad pluviométrica de la cuenca andina del río Beni. Se realizó también un análisis a nivel estacional, que permitió identificar los principales patrones de variabilidad pluviométrica y sus posibles causas.

La fuerte variabilidad espacial entre grupos regionales está asociada a los grandes cambios fisiográficos que son característicos de la cuenca. Las precipitaciones más altas se registran en el bosque altimontano pluvial o también denominado ceja de monte (Mueller *et al.* 2002), situado en su mayor parte en el grupo regional Yungas, con un máximo registrado de 3.909 mm/año en la estación Chuspipata. La precipitación disminuye al suroeste y por encima de los 4000 msnm, donde se registra un mínimo de 259 mm/año en la estación Caracato, que corresponde al grupo regional La Paz considerándose la región más árida de la cuenca. En el valle del río Beni se identifica la segunda región más húmeda donde se registra un máximo de 2.440 mm/año en la estación Rurrenabaque.

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es una herramienta de gran potencia que permitió reducir y sintetizar la información de las series de precipitación, identificando al mismo tiempo los principales modos de variabilidad y sus causas. En el caso de la precipitación, se identificó la estructura de los datos con 3 CP explicando en promedio el 70 % de la varianza total, reduciendo el volumen de la información de 55 estaciones a 3 series, lo que permite efectuar un análisis más eficiente, robusto y confiable. Así mismo los resultados del agrupamiento se comprueban con el MVR. La CP1 está relacionada directamente con la variabilidad de los grupos regionales La Paz ( $r=0,96$ ), Sur ( $r=0,73$ ) y Noroeste ( $r=0,4$ ), la CP2 relacionada con la variabilidad del grupo regional Norte ( $r=0,78$ ) y la CP3 con el grupo regional Yungas ( $r=0,6$ ).

Se identificaron dos escalas de variabilidad temporal: interanual y decadal. Se identifica El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) como la principal causa asociada a la variabilidad interanual de la lluvia, en las series de los vectores regionales La Paz, Sur y Noroeste (CP1) durante DEF y MAM. Se destaca el hallazgo de la relación negativa entre estas series temporales y la SST del Pacífico ecuatorial oriental (Niño E o canónico) en temporada húmeda, que no había sido identificada anteriormente. Esta relación implica una disminución (exceso) de la precipitación con SST más cálida (fría) de la habitual en el Pacífico ecuatorial oriental. Así estos grupos regionales indican déficit de lluvias durante los fuertes eventos El Niño 1982-83, 1997-98 y 2015-16.

Una variabilidad interanual-decadal asociada al Pacífico ecuatorial central (PC ENSO) se presenta para el grupo regional Yungas (CP3) durante DEF y MAM. Esta variabilidad está relacionada con eventos moderados de El Niño que tuvieron su máximo de anomalías positivas en el Pacífico ecuatorial central provocando lluvias deficitarias en 1982-83, 1991-92, 2002-03 y 2015-16. Nuestros resultados están de acuerdo con estudios previos que ya habían identificado esa relación para la mayor parte del Altiplano y valles interandinos. La variabilidad decadal asociada al Atlántico Norte y Sur tropical ocurre a lo largo de toda la cuenca andina del río Beni

durante JJA. Este patrón se pudo identificar gracias a la aplicación de la transformada wavelet continua (CWT) sobre las series temporales, donde se encontraron potencias significativas en una frecuencia entre 8 a 10 años principalmente en la estación seca. La relación negativa entre las series temporales y la SST del TNA y TSA en temporada seca implican una disminución (exceso) de la precipitación con SST más cálida (fría) de la habitual. Nuestros resultados sugieren que existe una teleconexión entre la SST del Pacífico Tropical central y el Atlántico a escalas de tiempo decadales. Este fenómeno tuvo su mayor influencia en los años 1988 durante JJA y 2005 durante MAM y JJA provocando sequías severas en los grupos regionales La Paz, Sur, Yungas y Noroeste. La influencia del TNA sobre el vector La Paz se produjo después del quiebre (1988), acompañado de un debilitamiento de El Niño oriental (E).

No se logró identificar un patrón característico asociado a la variabilidad del vector Norte y la CP2 durante DEF y MAM. Se recomienda utilizar datos de reanálisis para otras variables (atmosféricas), como los vientos zonales, meridionales y la convergencia de humedad para estudiar y analizar el comportamiento de estas dos series temporales, que además incluyen eventos poco frecuentes como la crecida del año 2014 en la cuenca del Madera, que fue atribuida al calentamiento del Atlántico Sur Subtropical durante el verano austral (Espinoza *et al.* 2014).

La variabilidad hidrológica en la cuenca está asociada a escalas de tiempo interanual y decadal y está directamente relacionada con la precipitación regional. La mayor parte de las estaciones hidrológicas presentan una correlación negativa con la SST del Pacífico ecuatorial durante la temporada de crecidas o descarga de flujo alto (Qmax). También se identificó una correlación positiva entre la SST del Atlántico Sur Subtropical en las estaciones Nube y Rurrenabaque, lo que indica que anomalías positivas en el Atlántico Sur Tropical provocan exceso de lluvias durante la estación húmeda, tal como ocurrió durante la crecida del año 2014. Para la temporada de estiaje o de aguas bajas (Qmin) no se identifica un patrón característico dominante.

Ningún producto satelital de precipitación (PPS: CHIRPS, MSWEP y TRMM) representa bien los modos de variabilidad climática presentes sobre la cuenca, lo que probablemente se debe a la orografía y topografía muy complejas de la cuenca andina del río Beni y la enorme variabilidad climática. Sin embargo existen regiones particulares que son mejor representadas por un producto PPS. La variabilidad interanual y decadal que presentan los grupos regionales La Paz, Sur y Noroeste está mejor representada por MSWEP, con correlaciones significativas a nivel AH y estacional ( $r= 0,53$  a  $0,97$ ;  $p < 0,05$ ). La variabilidad del Grupo regional Norte también es mejor representada por MSWEP ( $0,43$  a  $0,68$ ;  $p < 0,05$ ). CHIRPS representa mejor la variabilidad decadal asociada al grupo regional Yungas, correlacionándose significativamente a nivel AH y estacional ( $r= 0,42$  a  $0,72$ ;  $p < 0,05$ ). Por otro lado los PPS permitieron identificar el grupo regional Chapare, que según el PPS CHIRPS presenta una variabilidad decadal asociada al Pacífico ecuatorial central durante DEF y MAM y al Atlántico Norte tropical durante JJA, para el periodo 1982-2016, mientras que el PPS MSWEP solo logra identificar la variabilidad decadal asociada al Atlántico Sur Tropical durante JJA. Éste grupo regional no pudo formarse con las estaciones terrestres debido a la falta de datos en las series de precipitación.

## 6. REFERENCIAS

- Alejo, C. 2018. Análisis de la información hidrométrica y régimen hidrológico en la cuenca andina del río Beni. Tesis de licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz. 248 p.
- Ayes, I., C. Callau, J. Molina, J. Ayala, E. Armijos, R. Espinoza-Villar, J. Espinoza, O. Gutierrez & N. Filizola. 2019. On the relationship between suspended sediment concentration, rainfall variability and groundwater: an empirical and probabilistic analysis for the Andean Beni River, Bolivia (2003-2016). *Water* 11, 514.
- Alzate, D., E. Rojas, J. Mosquera & Ramón Jacipt. 2015. Cambio climático y variabilidad climática para el periodo 1981-2010 en las cuencas de los ríos Zulia y Pamplonita, norte de Santander – Colombia. *Luna Azul* ISSN: 127-153.
- Bidegain, M., C. Crisci, L. del Puerto, H. Inda, N. Mazzeo, J. Taks & R. Terra. 2012. Clima de cambios: Nuevos desafíos de adaptación en Uruguay. *Variabilidad climática de importancia para el sector productivo*, vol. 1. FAO-MGAP. TCP URU/3302. 126 p.
- Brunet-Moret, Y. 1979. Homogénéisation des précipitations. *Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie* 16: 3–4.
- Builes-Jaramillo, L.A., N. Marwan, G. Poveda & J. Kurths. 2017. Nonlinear interactions between the Amazon River basin and the Tropical North Atlantic at interannual timescales. *Clim Dyn*, Springer-Verlag GmbH Germany. 19 p.
- Builes-Jaramillo, L.A. & G. Poveda. 2018. Conjoint analysis of surface and atmospheric water balances in the Andes-Amazon system. *Water Resources Research*, 54(5): 3472-3489.
- Buishand, TA. 1982. Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. *Journal of Hydrology* 58: 51–69.
- CAN. 2008. Delimitación y codificación de las cuencas hidrográficas en la CAN. Novena reunión de expertos gubernamentales en estadísticas ambientales de la Comunidad Andina, Abril 2008. 20 p.
- Campos, J., Peña J. 1992. Programa hidrológico y climatológico de la cuenca amazónica de Bolivia. Estudio climatológico de la cuenca andina del río Beni, IHH-UMSA. pp. 33-40.
- Carrasco, L. & J. Bourges. 1992. Programa hidrológico y climatológico de la cuenca amazónica de Bolivia. Estudio del régimen de escurrimiento superficial de la cuenca andina del río Beni, ORSTOM. pp. 41-49.
- CNDC. 2018. Memoria 2018. Ministerio de Energías, Comité Nacional de Despacho de Carga, Bolivia. 57 p.
- CONAMA. 2006. Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI. Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 63 p.

- Coritza, E. 2017. Estudio climatológico de la cuenca del río Beni. Tesis de licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz. 215 p.
- Espinoza, J.C., J. Rochail, J. Loup, G. Cochonneau, F. Naziano, W. Lavado, E. Olivera, R. Pombosa & P. Vauchel. 2009. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia and Ecuador). *International Journal of Climatology* 29: 1574-1594.
- Espinoza, J.C., J. Ronchail, J. Guyot, C. Junquas, P. Vauchel, W. Lavado, G. Drapeau & R. Pombosa. 2011. Climate variability and extreme drought in the upper Solimões River (western Amazon Basin): Understanding the exceptional 2010 drought. *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, L13406. 6 p.
- Espinoza, J.C., J. Marengo, J. Ronchail, J. Molina, L. Noriega & J. Guyot. 2014. The extreme 2014 flood in south-western Amazon basin: the role of tropicalsubtropical South Atlantic SST gradient. *Environmental Research Letters*, 124007. 9 p.
- Espinoza, J.C., S. Chavez, J. Ronchail, C. Junquas, K. Takahashi & W. Lavado. 2015. Rainfall hotspots over the southern tropical Andes: spatial distribution, rainfall intensity and relations with largescale atmospheric circulation. *Water Resources Research* 51:3459-3475.
- Farfán, C. 2019. Control de calidad y homogeneización de datos de temperatura y precipitación en la cuenca andina del río Beni. Tesis de licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz. (En desarrollo).
- ENDE. 2016. Estudio de Identificación del proyecto hidroeléctrico El Bala. Producto N° 4 Estudios de evaluación socioeconómica y financiera. Empresa Nacional de Electricidad, Bolivia. 52 p.
- Gloor, M., R. Breinen, D. Galbraith, T. Feldpausch, J. Schöngart, J. Guyot, J. C. Espinoza, J. Lloyd & O. L. Phillips. 2013. Intensification of the Amazon hydrological cycle over the last two decades. *Geophysical Research Letters*, Vol. 40: 1729–1733.
- Grinsted, A., J. Moore & S. Jevrejeva. 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics, European Geosciences Union (EGU)* 11 (5/6): 561-563.
- Guyot, J. L. 1993. Hydrogéochimie des fleuves de l' Amazonie bolivienne. Thesis (PhD). Collection etudes & theses. ORSTOM. 258 p.
- Guyot, J., J. Jouanneau & J. Wasson. 1999. Characterization of river bed and suspended sediments in the Rio Madeira drainage basin (Bolivian Amazonia). *J. S. Am. Earth Sci.*, 12: 401–410.
- Hiez, G. 1977. L'homogénéité des données pluviométriques. *Cahier ORSTOM, Série Hydrologie* 14: 129-172.

- Hubert, P., J. Carbonnel & A. Chaouche. 1989. Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l’Afrique de l’Ouest. *Journal of Hydrology* 110: 349-367.
- Ibisch, P.L. & G. Merida. 2003. Biodiversidad: La riqueza de Bolivia. Estado de conocimiento y conservación. Ministerio de Desarrollo Sostenible. Editorial FAN, Santa Cruz de la Sierra - Bolivia. 570 p.
- IDEAM-UNAL. 2018. Variabilidad Climática y Cambio Climático en Colombia, Bogotá, D.C. 53 p.
- Lavado, W., J. Ronchail, D. Labat, J. Espinoza & J. Guyot. 2012. Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969–2004): Pacific, Titicaca and Amazonas drainages. *Hydrological Sciences Journal*, 57. 4: 625-642.
- Lee, AFS. & Heghinian SM. 1977. A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables-A bayesian approach. *Technometrics* 19: 503–506.
- Lopes, A.V., J. C. H. Chiang, S.A. Thompson & J. A. Dracup. 2016. Trend and uncertainty in spatial-temporal patterns of hydrological droughts in the Amazon basin. *Geophys. Res. Lett.*, 43: 3307–3316.
- López, S. 2017. Evaluación de la precipitación en base a datos satelitales GSMAP para su aplicación en la cuenca andina del río Beni. Tesis de licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz. 154 p.
- Mallat, S. 1999. A wavelet tour of signal processing. 2da. Edic. Academic Press, France. 109 p.
- Marengo, J. 1992. Interannual variability of surface climate in the Amazon basin. *International Journal of Climatology*. 12: 853–863.
- Marengo, J., J. Tomasella, M. Alves, R. Soares & A. Rodriguez. 2011. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon región. *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, L12703. 5 p.
- Mattos, R. & A. Crespo. 2000. Informe nacional sobre la gestión del agua en Bolivia. Agua para el Siglo XXI para América del Sur, De la Visión a la Acción. 66 p.
- McClain, M. & R. Naiman. 2008. Andean influences on the biogeochemistry and ecology of the Amazon River. *BioScience* 58 (4): 325–338.
- McQuarrie, N. 2002. The kinematic history of the central Andean fold-thrust belt, Bolivia: Implications for building a high plateau. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 114: 950-963.
- Molina-Carpio, J. 2000. Análisis técnico ambiental del proyecto “El Bala”. Foro boliviano sobre el medio ambiente y desarrollo FOBOMADE. 41 p.
- Molina-Carpio, J., J. Espinoza, P. Vauchel, J. Ronchail, B. Gutierrez-Caloir, J. Guyot & L. Noriega. 2017a. Hydroclimatology of the Upper Madeira River basin: spatio-temporal variability and trends. *Hydrological Sciences Journal* 62(6): 911-927.

- Molina-Carpio, J., D. Espinoza, F. Timouk, E. Coritza, S. López, C. Alejo, E. Noriega, C. Farfán. 2017b. Procesos hidrológicos de cuencas andino amazónicas – PHYBAAM: Cuenca andina del río Beni. 7ta Reunión científica del Observatorio HYBAM, Niteroi RJ, Nov 2017. <https://doi.org/10.13140/rg.2.2.26008.49926>
- Molina-Carpio, J., D. Espinoza, E. Coritza, F. Salcedo, C. Farfán, L. Mamani & J. Mendoza. 2019. Clima y variabilidad espacial de la ceja de monte y andino húmedo. *Ecología en Bolivia* 54(1): 40-56.
- Molinier, M. 1996. Les régimes hydrologiques de l'Amazone et de ses affluents. L'hydrologie tropicale: géoscience et outil pour le développement. Wallingford: International Association of Hydrological Sciences, IAHS Publication 238: 209–222.
- Montealegre, J. 2009. Estudio de la variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada a procesos oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala. Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales, IDEAM, Bogotá D. C. 54 p.
- Morales, L. & J. Parra. 2002. Estimating thermal infrared radiance emitted by the atmosphere using reanalysis data. *Rev. Mex. Fis.*, 48: 119-121.
- Mueller, R., S. Beck & R. Lara. 2002. Vegetación potencial de los bosques de Yungas en Bolivia, basado en datos climáticos. *Ecología en Bolivia* 37(2): 5-14.
- Navarro, G. & W. Ferreira. 2007. Mapa de vegetación de Bolivia, escala 1:250.000. RUMBOL SR.; Cochabamba.
- Noriega, E. 2018. Evaluación y tratamiento estadístico de datos de precipitación de los productos TRMM y CHIRPS para la cuenca andina del río Beni. Tesis de licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz.
- North, G., T. Bell, F. Cahalan & J. Moeng. 1982. Sampling Errors in the Estimation of Empirical Orthogonal Functions. Goddard Laboratory for Atmospheric Sciences, NASA. MD 20771. pp. 699-706.
- OEA. 1974. Cuenca del Río de la Plata - Estudio para su Planificación y Desarrollo – República Argentina - República de Bolivia - Cuenca del Río Bermejo I - Alta Cuenca. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos Washington, D. C.
- Pabón, D. 1997. Variabilidad Climática. Organización Meteorológica Mundial. Técnicas Agrometeorológicas en la Agricultura Operativa de América Latina: 99-103. Ed. OMM, Ginebra, Suiza.
- Pauquet, S. 2005. Diagnóstico del Parque Nacional y Área Natural de Manejo Integrado Madidi. Serie de Perfiles de Parques ParksWatch. 83 p.
- Peña, D. 2014. Análisis de componentes principales en la estimación de índices de empoderamiento en mujeres de Colombia. Máster en estadística aplicada Departamento de estadística e investigación operativa, Universidad de Granada. 49 p.

- Pereira, A. 2012. Analyse de la Vulnérabilité des populations et proposition d'une méthodologie pour l'élaboration d'un PMACC: cas de la municipalité de São Domingos- Cap Vert. Mastère en changements climatiques et développement durable. 71 p.
- Pettitt, A. N. 1979. A non parametric approach to change-point problem. *App. Statist.* 28 (2): 126-135.
- Pinilla, C. & J. Fenoy. 2008. Temperatura de superficie del mar (SST) del Mar de Alborán. pp. 695-706.
- Pouilly, M., X. Lazzaro, D. Point & M. Aguirre. 2014. Línea de base de conocimientos sobre los recursos hidrológicos en el sistema TDPS con enfoque en la cuenca del lago Titicaca. IRD–UICN, Ecuador. 320 p.
- Quiroz, M. C. 2011. Anexo del Informe Técnico: Elaboración de un boletín con información hidroclimática de los mares de México. *Indicadores Climáticos. Una manera para identificar la variabilidad climática a escala global, México.* 27 p.
- Rasmusson, E. & T. Carpentier. 1982. Variations in tropical sea surface temperatura and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Mon. Wea. Rev.* 110: 354-384.
- Restrepo, L. & J. Gonzales. 2007. De Pearson a Spearman. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, vol. 20. 2: 183-192
- Roche, M., J. Bourges, J. Cortez & R. Mattos. 1992. *Climatology and Hidrology of the Lake Titicaca basin. Monographiae Biologicae, Kluver Academic Publisher, Dordrecht.* Vol. 68: 63-104.
- Ronchail, J. & R. Gallaire 2006. ENSO and rainfall along the Zongo valley (Bolivia) from the Altiplano to the Amazon basin. *International Journal of Climatology* 26: 1223–1236.
- Rodríguez, D. 2012. El desarrollo sustentable de la Cuenca Amazónica en la Agenda Ambiental de la Comunidad Andina\*. *Comentario Internacional* año 2012. 12: 73-112.
- Salcedo, F. 2008. Efectos locales sobre el balance hídrico de cuencas andinas húmedas. Tesis de licenciatura en ingeniería civil. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz. 188 p.
- Serna, N. J. 2013. Efecto de los fenómenos El Niño y La Niña sobre la frecuencia de los eventos de precipitación extrema en la Sabana de Bogotá. Tesis en Magíster en Ciencias – Meteorología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C. 152 p.
- Stuecker, Malte F. 2018. Revisiting the Pacific Meridional Mode. *Scientific Reports.* 8:3216.
- Takahashi, K., A. Montecinos, K. Goubanova & B. Dewitte. 2011. ENSO regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño. *Geophysical Research Letters*, vol. 38.
- Torrence, C. & G. Compo. 1998. *Apractical Guide to Wavelet Analysis.* Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, University of Colorado, Boulder, Colorado. pp. 61-78.

Vauchel, P. 2005. Hydraccess: Software for Management and processing of Hydro – meteorological data software, Version 2.1.4. Free download [www.mpl.ird.fr/hybam/utills/hydracces.htm](http://www.mpl.ird.fr/hybam/utills/hydracces.htm).

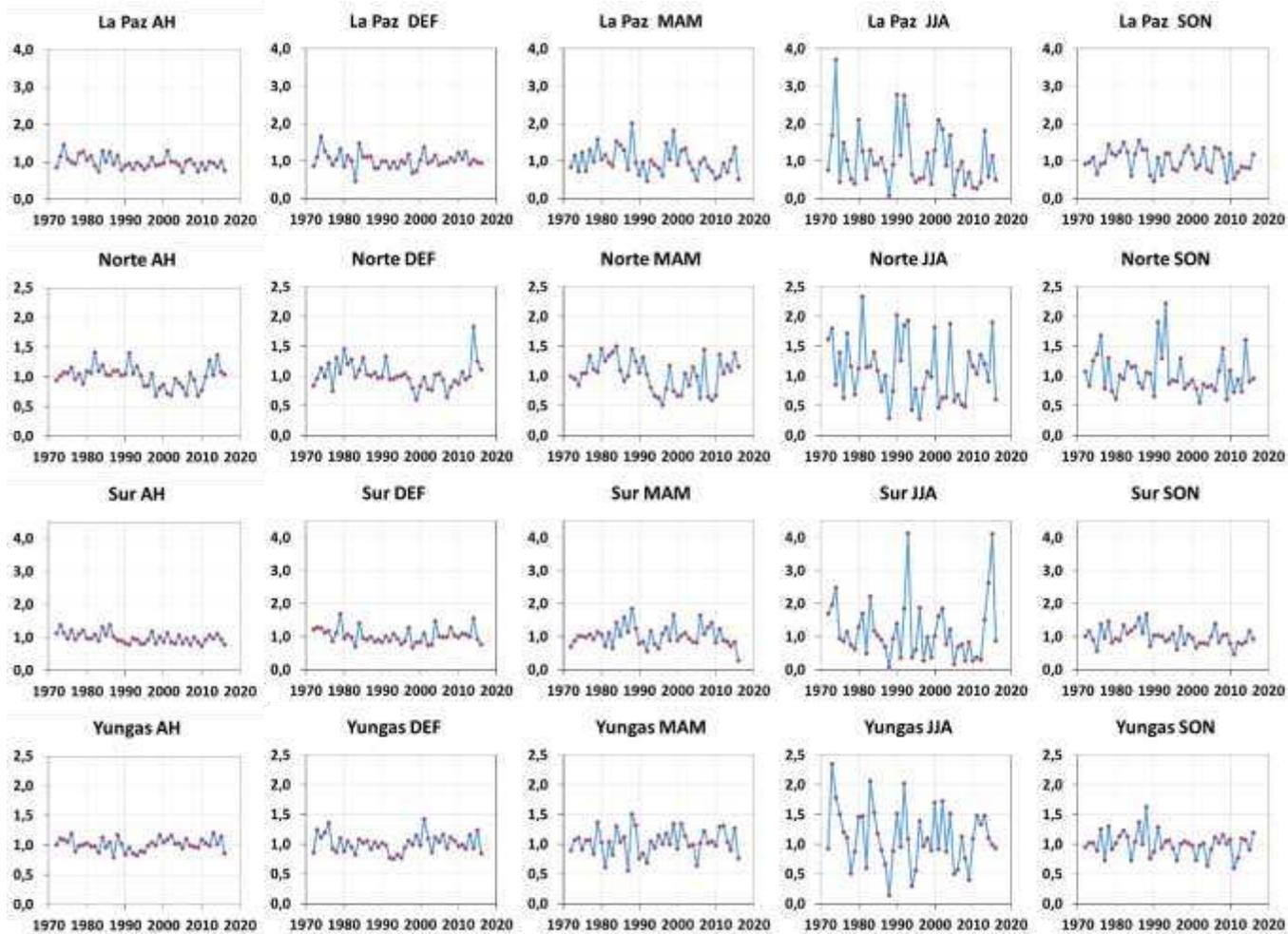
Vauchel, P. 2014. Estudio de la crecida 2014 en la cuenca del río Beni. Institut de recherché por le développement IRD, HYBAM. 25 p.

Vimont, D. J. & J. Kossin. 2007. The Atlantic Meridional Mode and hurricane activity. *Geophysical Research Letters*, Vol. 34.

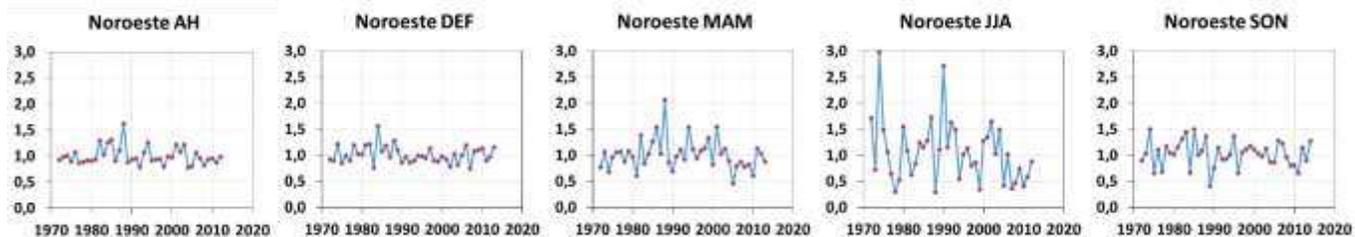
Zbigniew, WK. 2004. Change detection in hydrological records – a review of the methodology. *Hydrological Sciences Journal* 49: 7–119.

## 7. ANEXOS.

### PERIODO 1972-2016



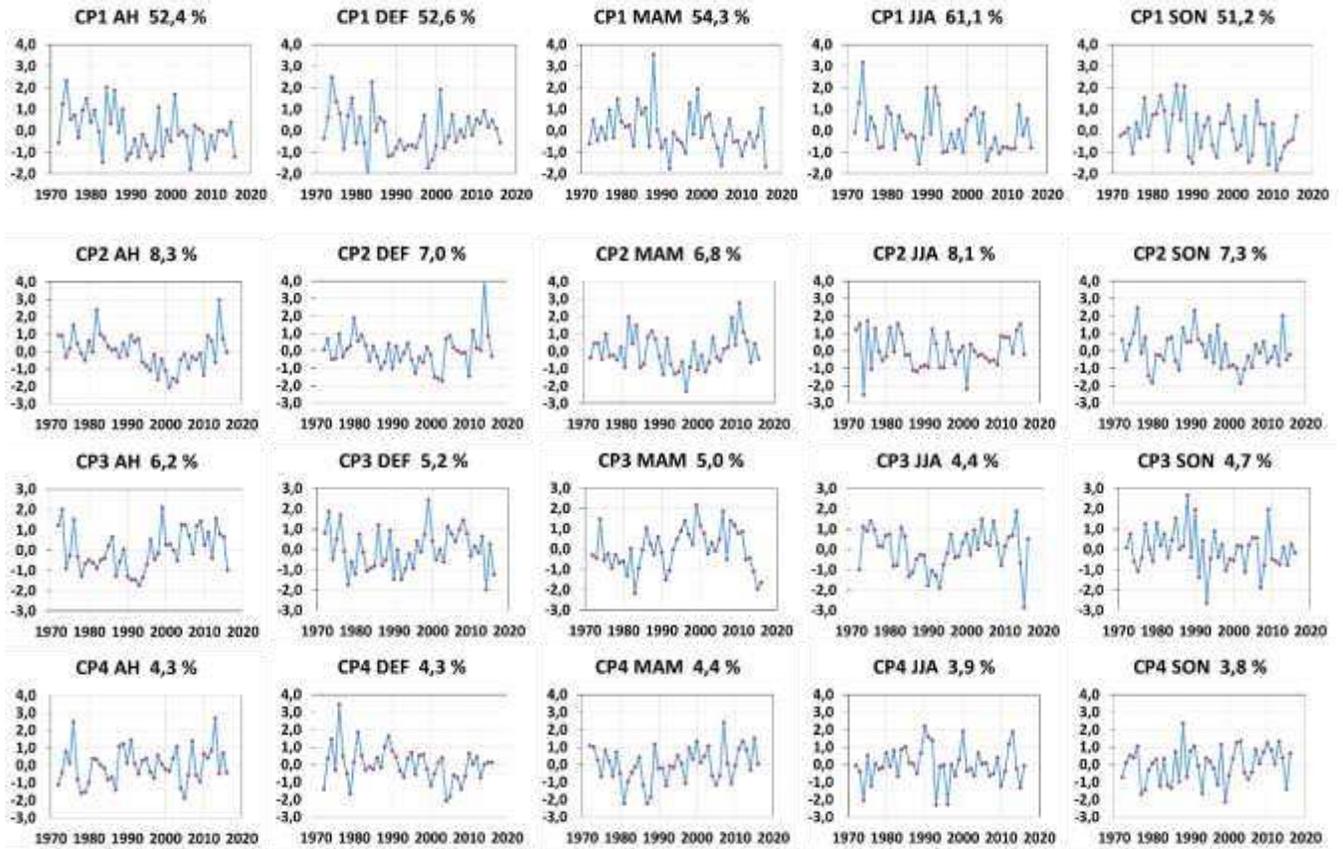
### PERIODO



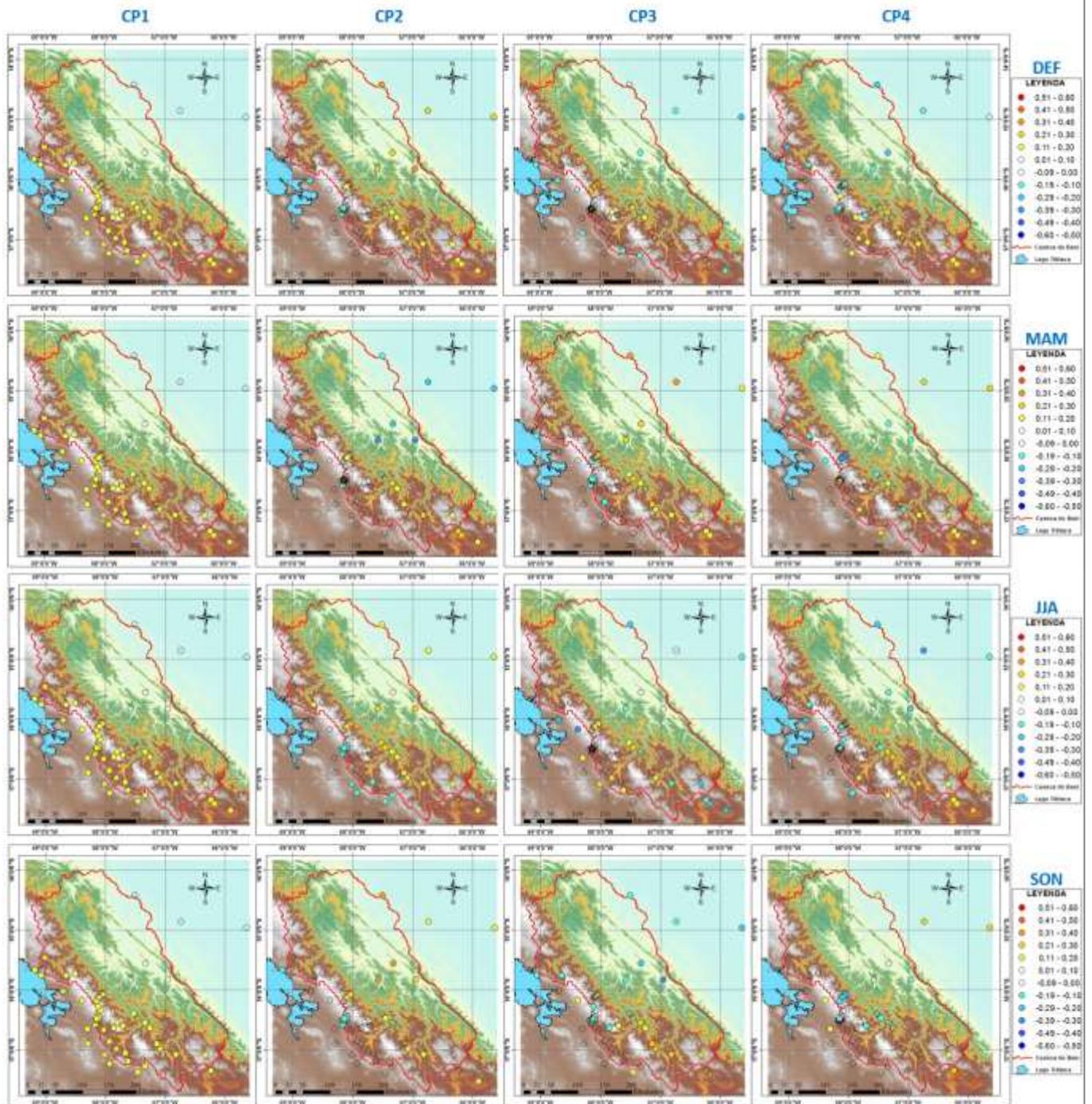
### 1972-2012

**Fig. A1.** Series temporales de los índices de los vectores regionales a nivel AH y estacional (DEF, MAM, JJA y SON).

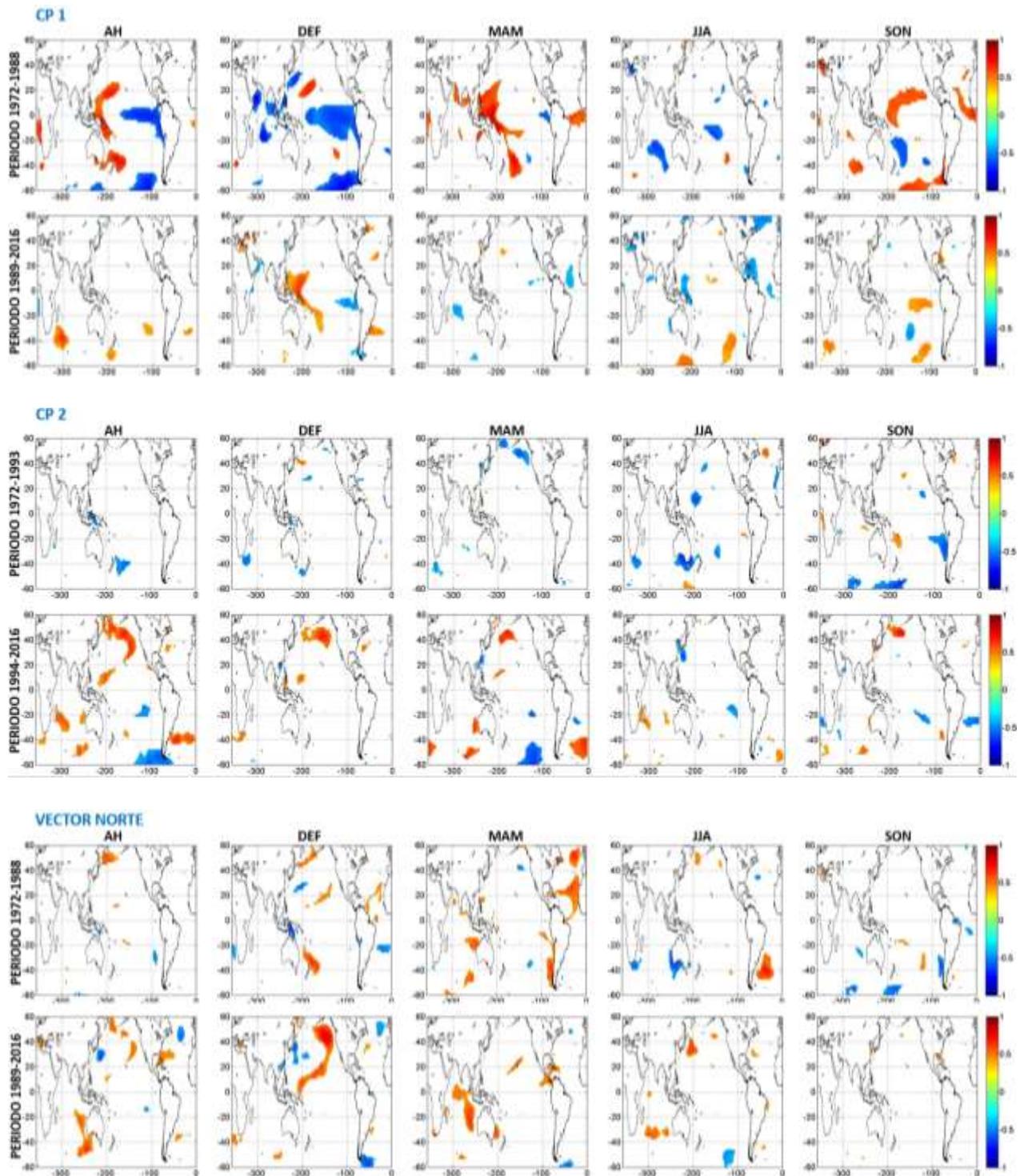
PERIODO 1972-2016



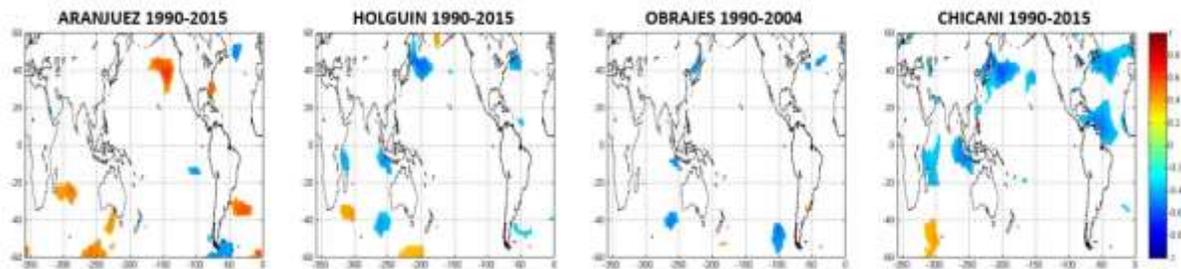
**Fig. A2.** Series estandarizadas y varianza que explican las cuatro primeras componentes principales a nivel AH y estacional, periodo 1972-2016.



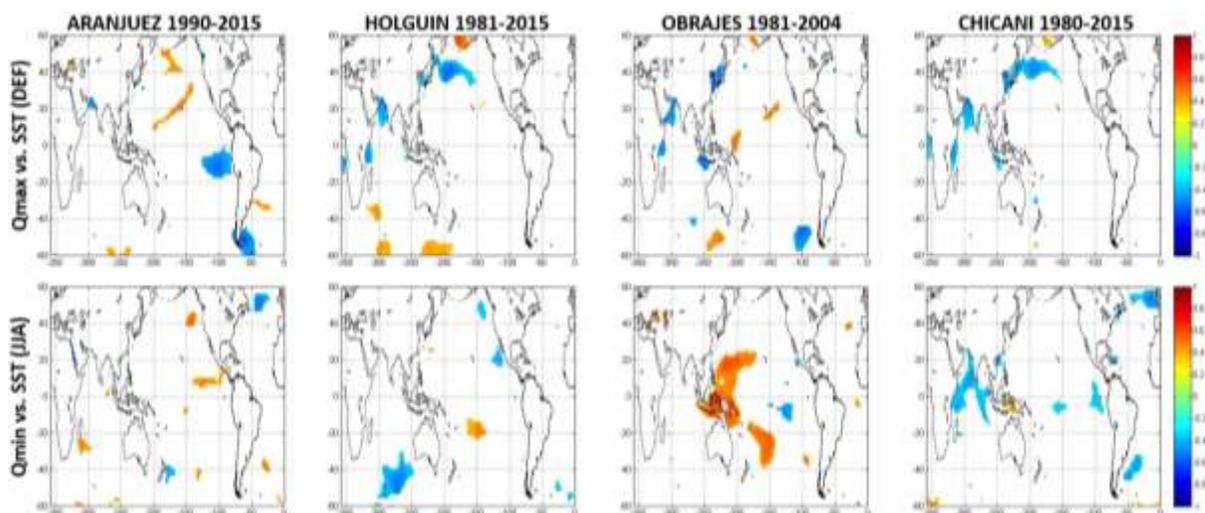
**Fig. A3.** Correlaciones entre estaciones terrestres pluviométricas y las componentes principales a nivel año hidrológico y estacional, periodo 1972-2016.



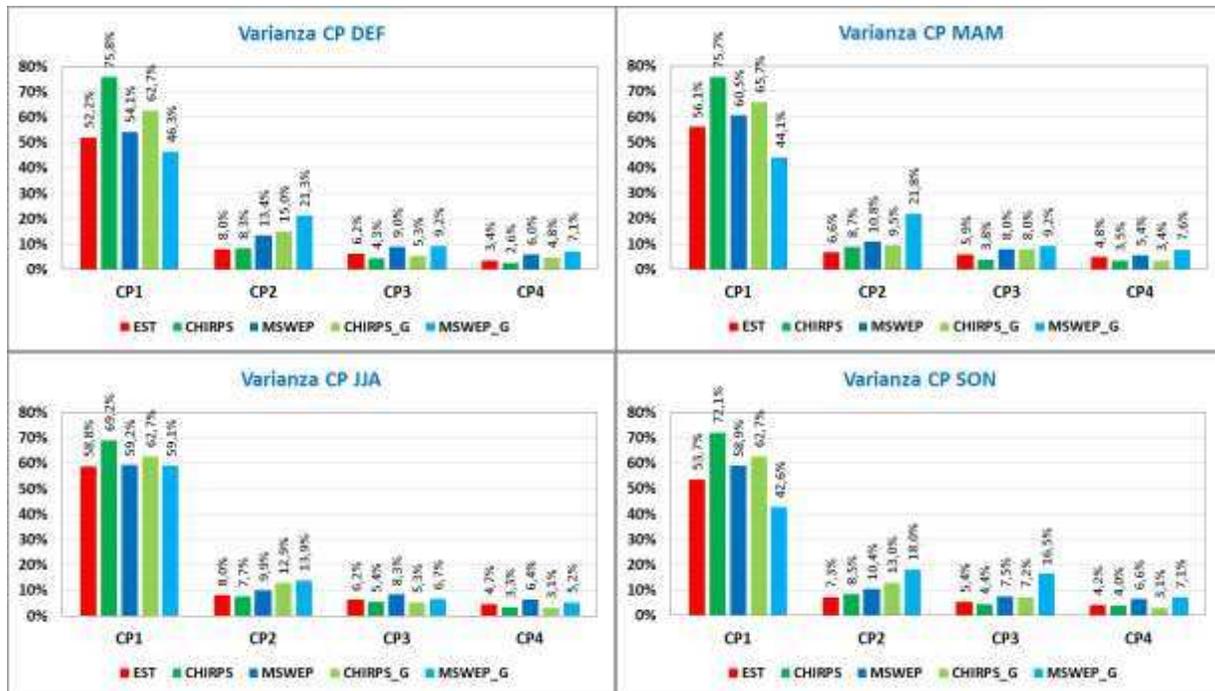
**Fig. A4.** Correlación de la CP1, CP2 y el grupo regional Norte contra la SST a nivel AH y estacional (DEF, MAM, JJA y SON) tomando en cuenta los quiebres, solo se trazan valores de  $p < 0,05$ . El valor de la correlacion se muestra a la derecha en una paleta de colores entre rojo (+1) y azul (-1).



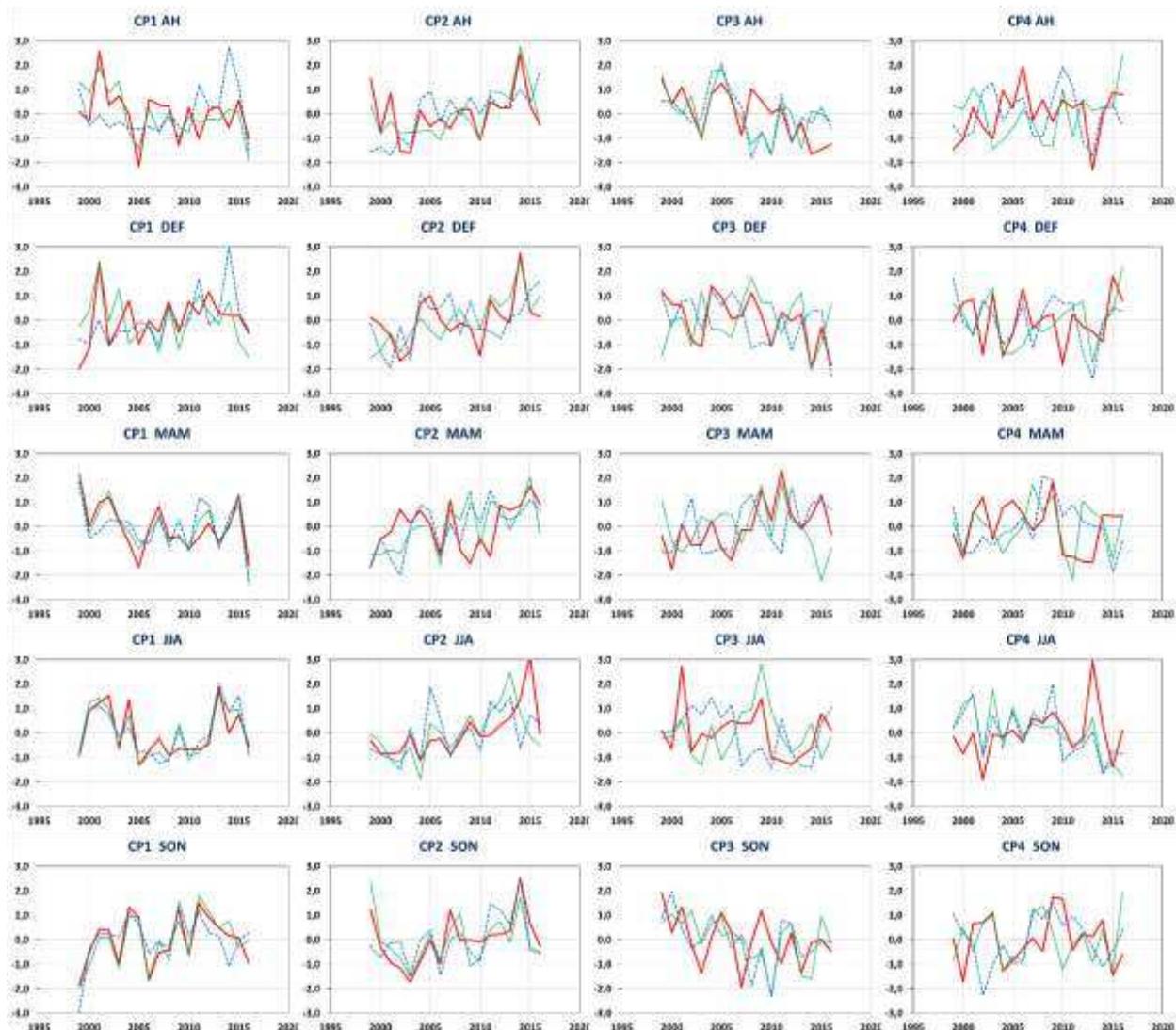
**Fig. A5.** Correlaciones entre series de caudal (Q) y la SST a nivel año hidrológico, solo se trazan valores de  $p < 0,05$ . El valor de la correlacion se muestra a la derecha en una paleta de colores entre rojo (+1) y azul (-1).



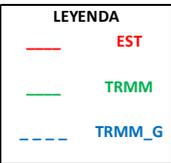
**Fig. A6.** Correlación entre: descarga de estaciones hidrológicas con descarga media para los dos meses con descarga máxima (Qmax) y SST (DEF); descarga en las estaciones hidrológicas con descarga media para los dos meses con descarga mínima (Qmin) y SST (JJA). El periodo de analisis se muestra para estación hidrológica. Solo se trazan valores de  $p < 0,05$ . El valor de la correlacion se muestra a la derecha en una paleta de colores entre rojo (+1) y azul (-1).



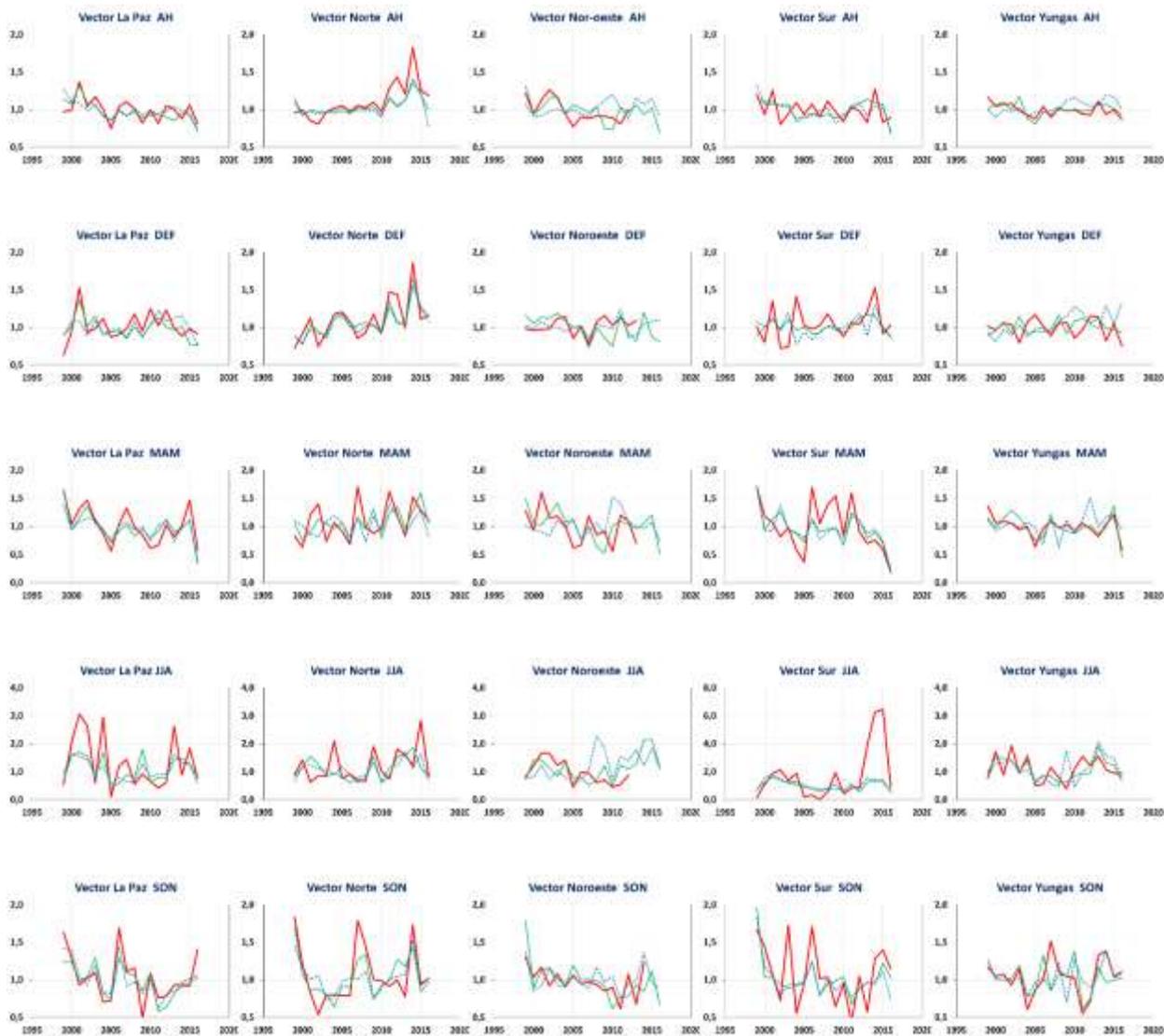
**Fig. A7.** Varianza parcial de las cuatro primeras CP de estaciones terrestres (EST) y productos satelitales (CHIRPS y MSWEP) a nivel estacional, periodo 1982-2016.



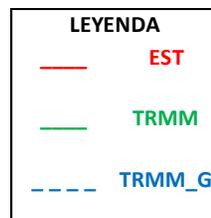
		CP1		CP2		CP3		CP4	
		TRMM	TRMM_G	TRMM	TRMM_G	TRMM	TRMM_G	TRMM	TRMM_G
AH	r	0,729	0,040	0,776	0,157	0,366	0,319	0,128	0,286
	$\alpha$	0,001	0,875	0,000	0,533	0,135	0,197	0,612	0,249
DEF	r	0,493	0,337	0,668	0,344	0,092	0,416	0,246	0,208
	$\alpha$	0,038	0,171	0,002	0,162	0,716	0,086	0,326	0,407
MAM	r	0,916	0,714	0,323	0,274	0,191	0,217	0,231	0,079
	$\alpha$	0,000	0,001	0,191	0,271	0,448	0,386	0,356	0,755
JJA	r	0,895	0,820	0,441	0,414	0,352	0,222	0,255	0,261
	$\alpha$	0,000	0,000	0,067	0,087	0,153	0,375	0,307	0,295
SON	r	0,922	0,745	0,775	0,653	0,298	0,225	0,129	0,048
	$\alpha$	0,000	0,000	0,000	0,003	0,229	0,370	0,611	0,849



**Fig. A8.** Comparación entre las series estandarizadas de las cuatro primeras CP de las estaciones terrestres (EST) y el producto satelital TRMM para el periodo 1999-2016. La tabla muestra las correlaciones y sus significancias a nivel AH y estacional.

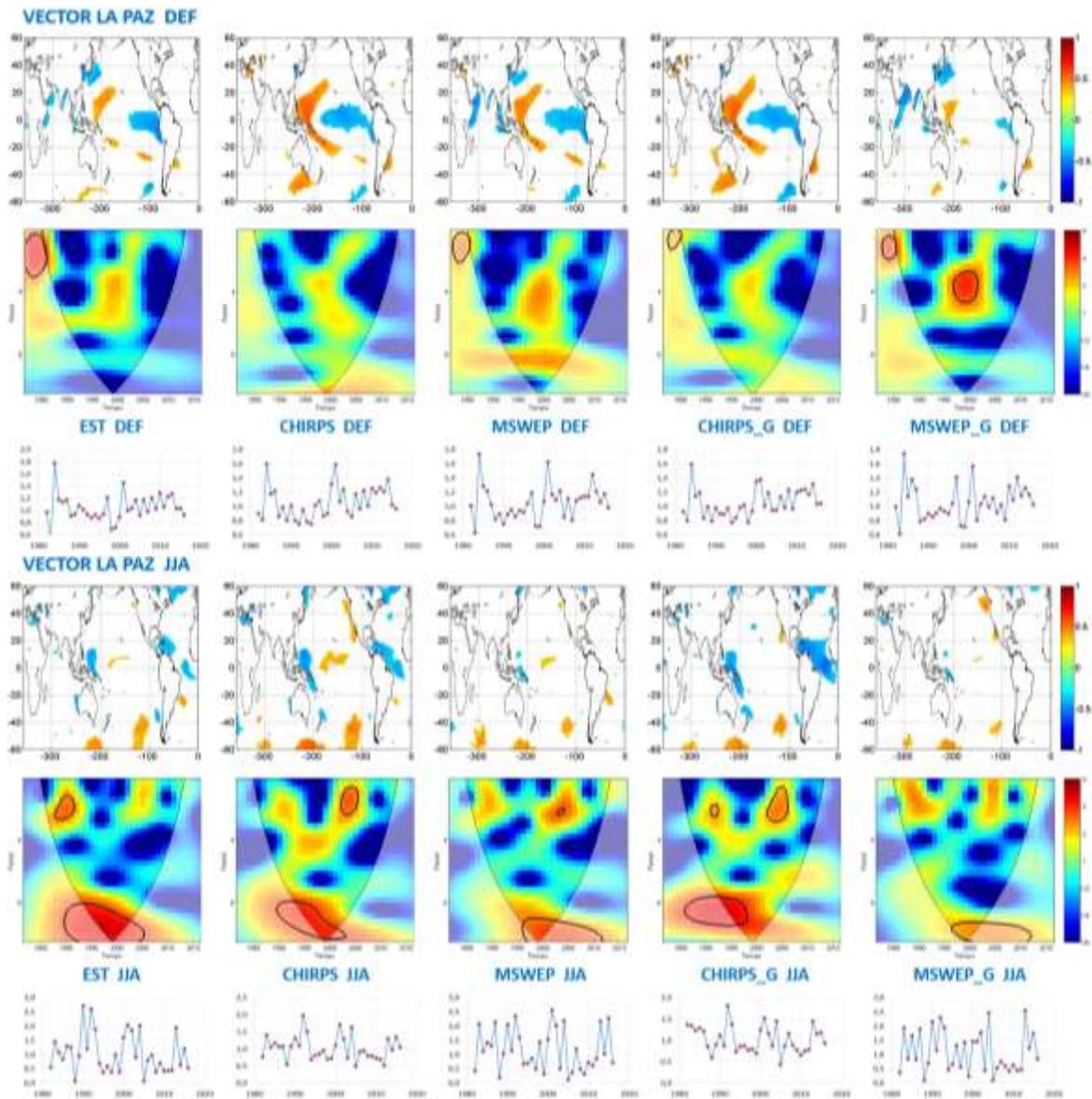


		VECTOR LA PAZ		VECTOR NORTE		VECTOR NOROESTE		VECTOR SUR		VECTOR YUNGAS	
		TRMM	TRMM_G	TRMM	TRMM_G	TRMM	TRMM_G	TRMM	TRMM_G	TRMM	TRMM_G
AH	r	0,703	0,458	0,829	0,685	0,591	-0,076	0,206	0,376	0,506	-0,052
	$\alpha$	0,001	0,056	0,000	0,002	0,026	0,797	0,412	0,124	0,032	0,838
DEF	r	0,607	0,341	0,818	0,874	0,257	0,349	0,401	0,050	-0,059	-0,526
	$\alpha$	0,008	0,167	0,000	0,000	0,354	0,202	0,099	0,843	0,815	0,025
MAM	r	0,858	0,803	0,545	0,392	0,408	-0,222	0,740	0,670	0,796	0,292
	$\alpha$	0,000	0,000	0,019	0,107	0,131	0,427	0,000	0,002	0,000	0,240
JJA	r	0,763	0,734	0,361	0,573	0,549	-0,270	0,502	0,504	0,672	0,265
	$\alpha$	0,000	0,001	0,141	0,013	0,042	0,351	0,034	0,033	0,002	0,288
SON	r	0,781	0,851	0,805	0,650	0,527	0,565	0,563	0,609	0,473	0,394
	$\alpha$	0,000	0,000	0,000	0,004	0,036	0,023	0,015	0,007	0,048	0,105

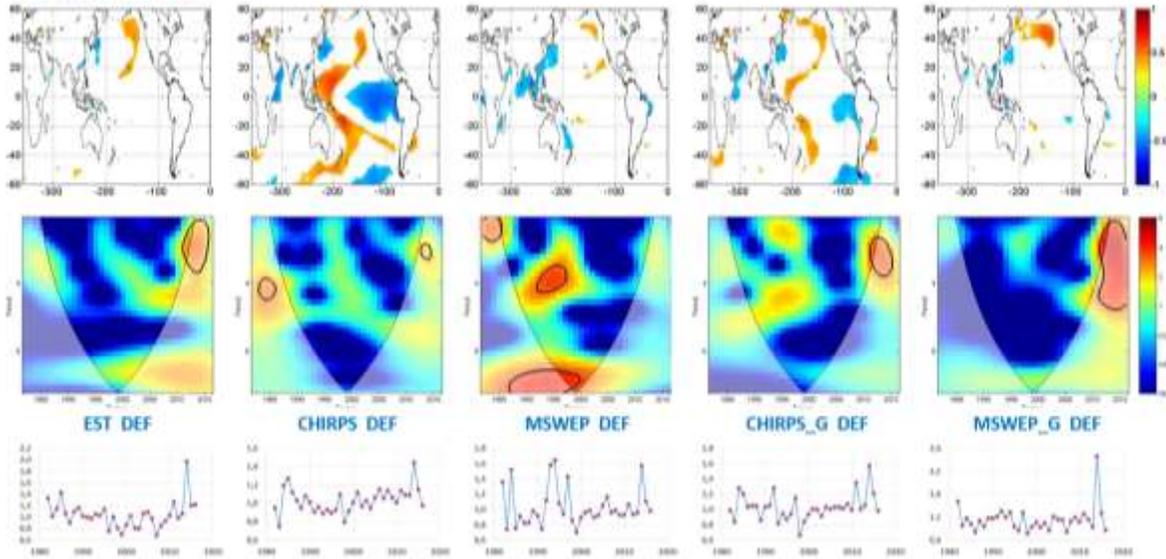


**Fig. A9.** Comparación entre los índices de los grupos regionales de las estaciones terrestres (EST) y el producto satelital TRMM, para el periodo 1999-2016. La tabla muestra las correlaciones y sus significancias a nivel AH y estacional.

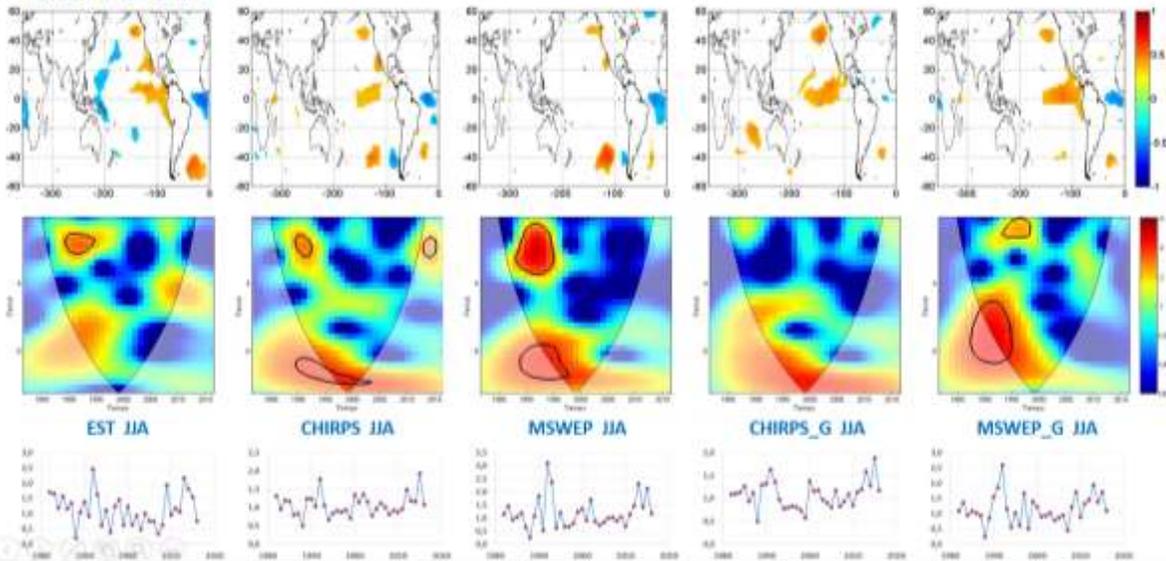
**Fig. A10.** Comparacion de SST, transformada wavelet continua (CWT), y series temprales (VR y CP) entre estaciones terrestres (EST) y PPS (CHIRPS y MSWEP) durante DEF y JJA, periodo 1982-2016.



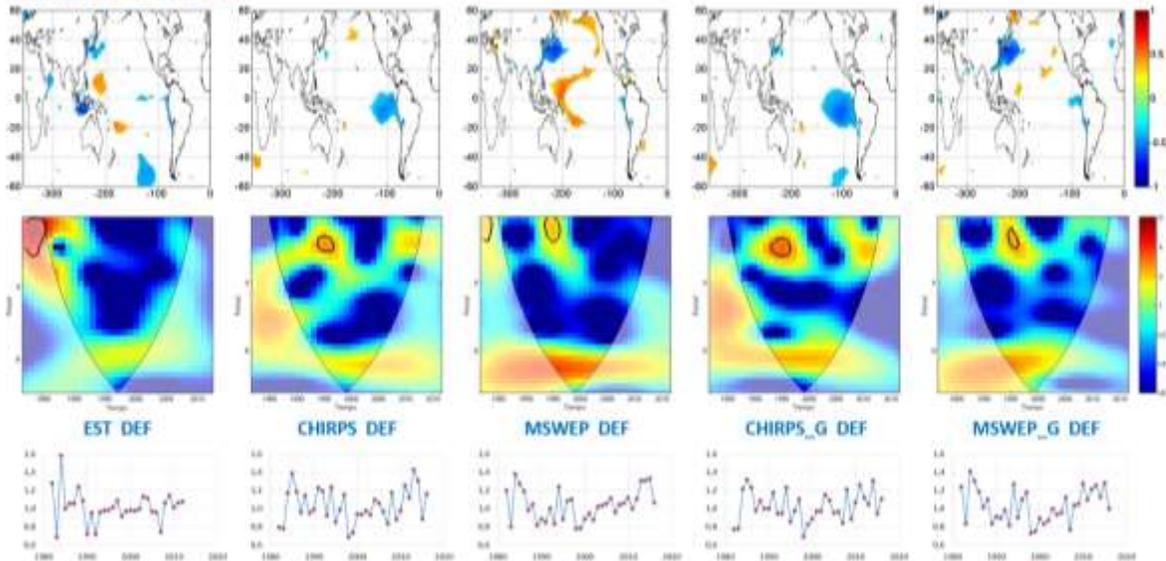
**VECTOR NORTE DEF**



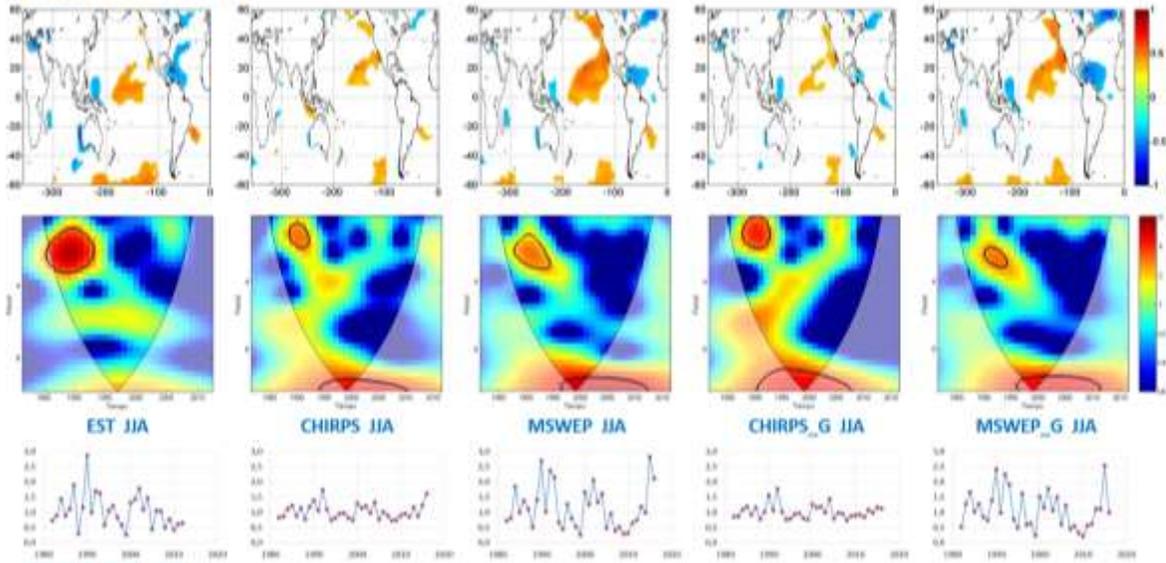
**VECTOR NORTE JJA**



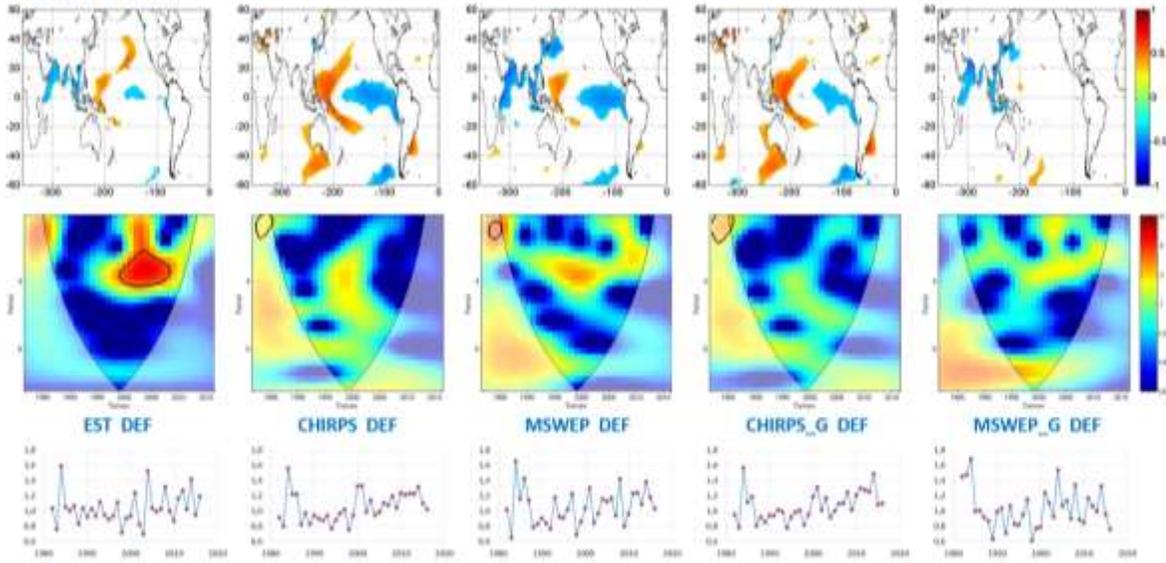
**VECTOR NOROESTE DEF**



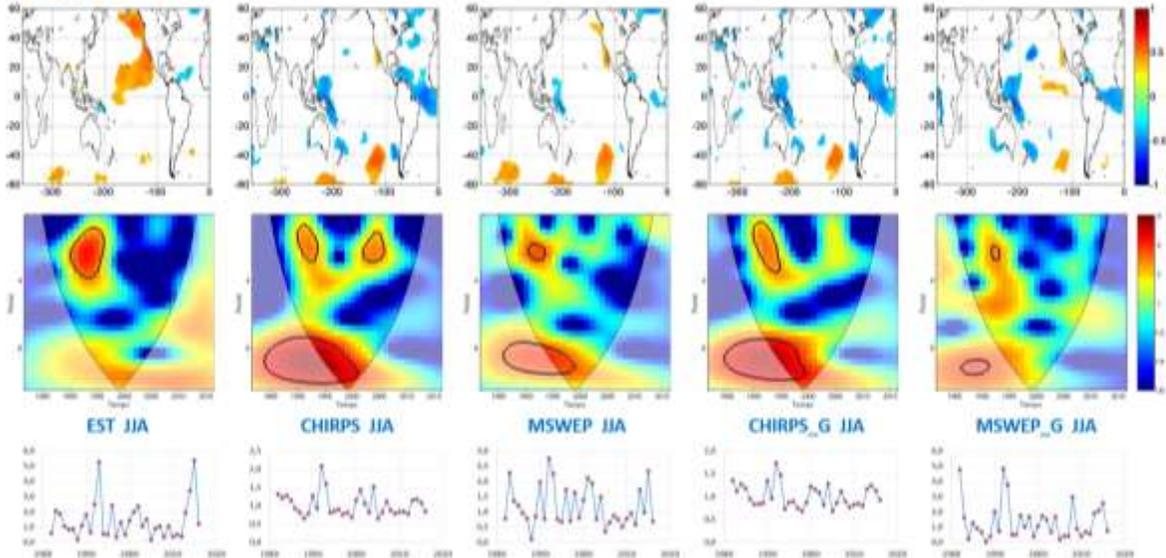
**VECTOR NOROESTE JJA**



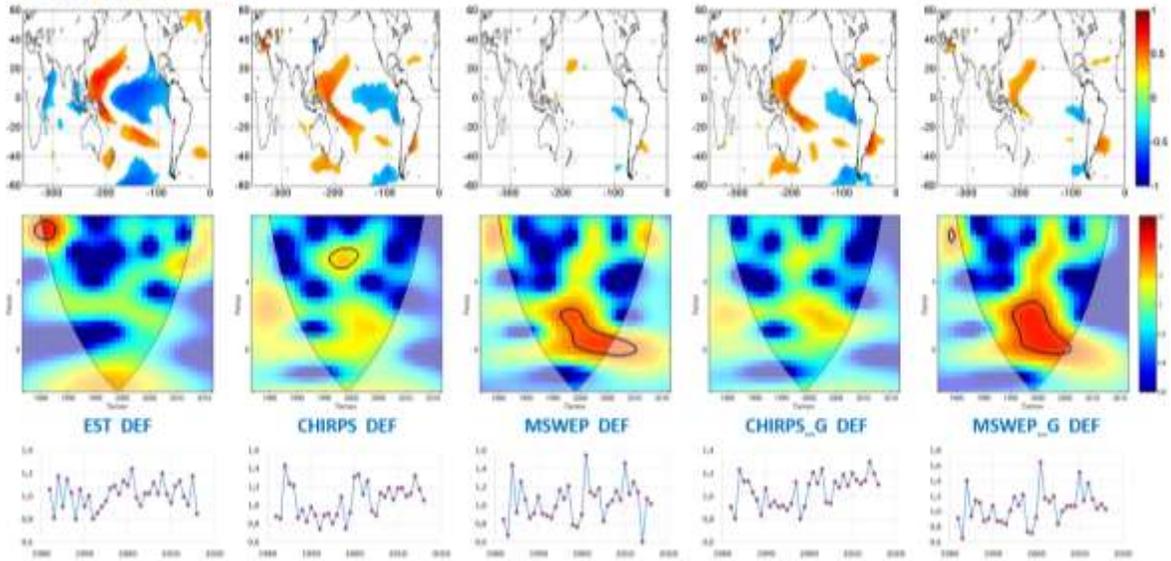
**VECTOR SUR DEF**



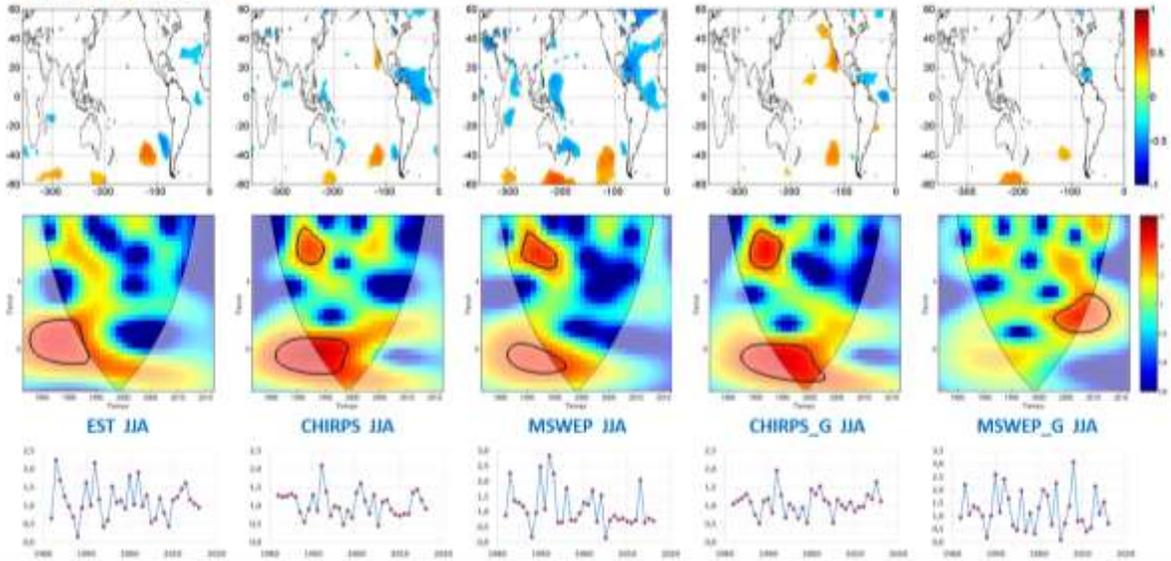
**VECTOR SUR JJA**



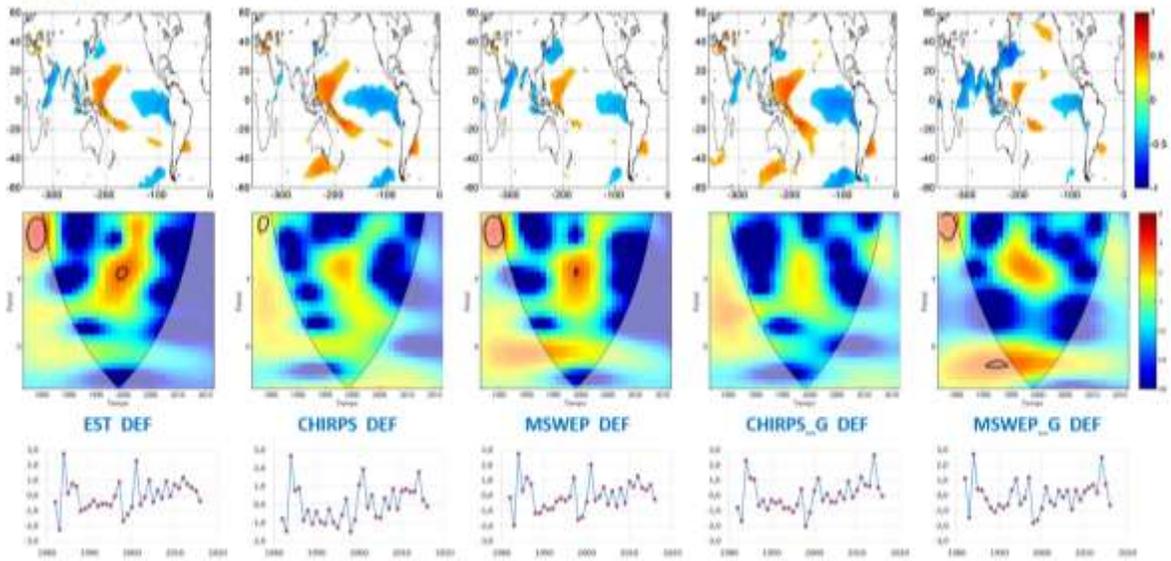
**VECTOR YUNGAS DEF**

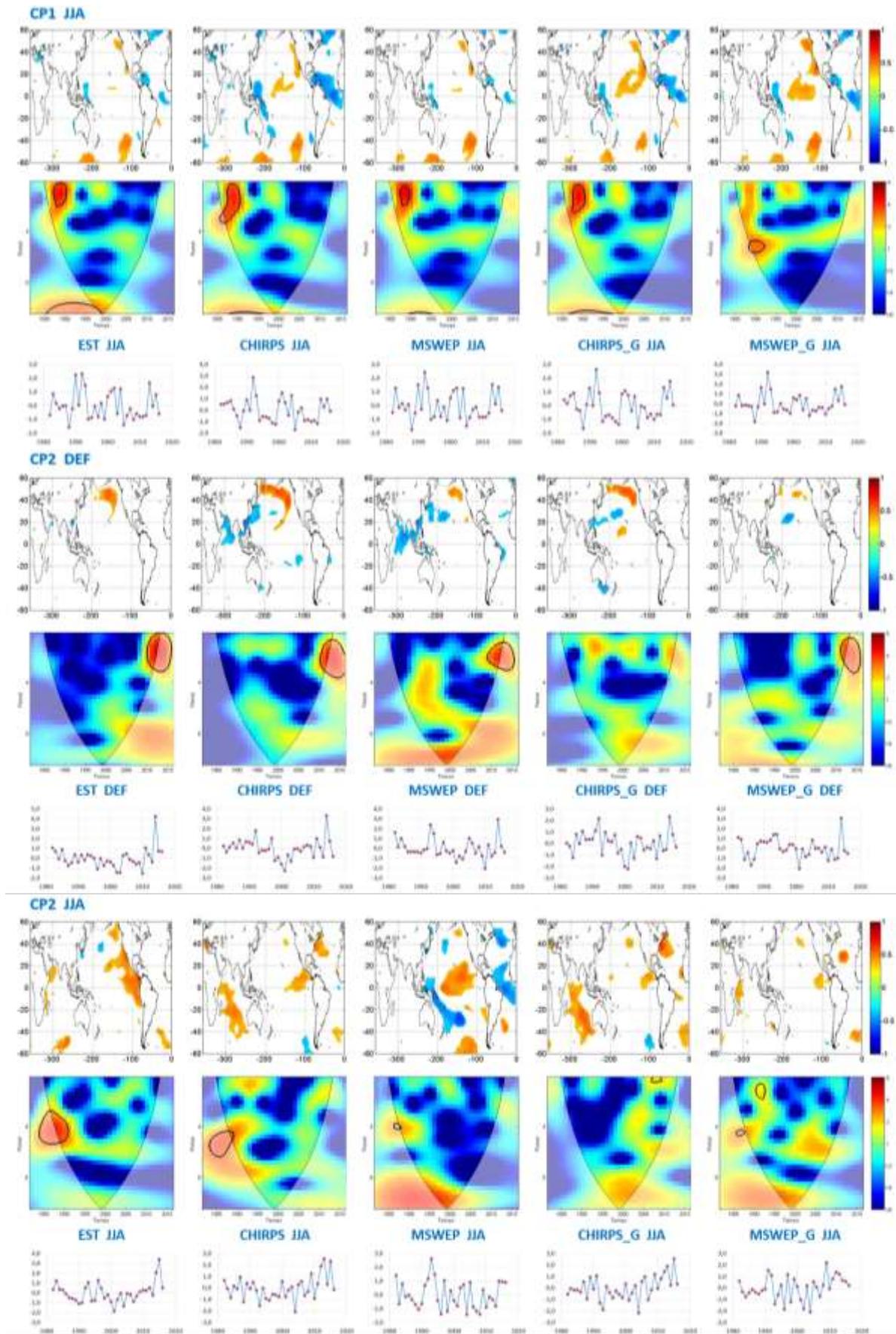


**VECTOR YUNGAS JJA**

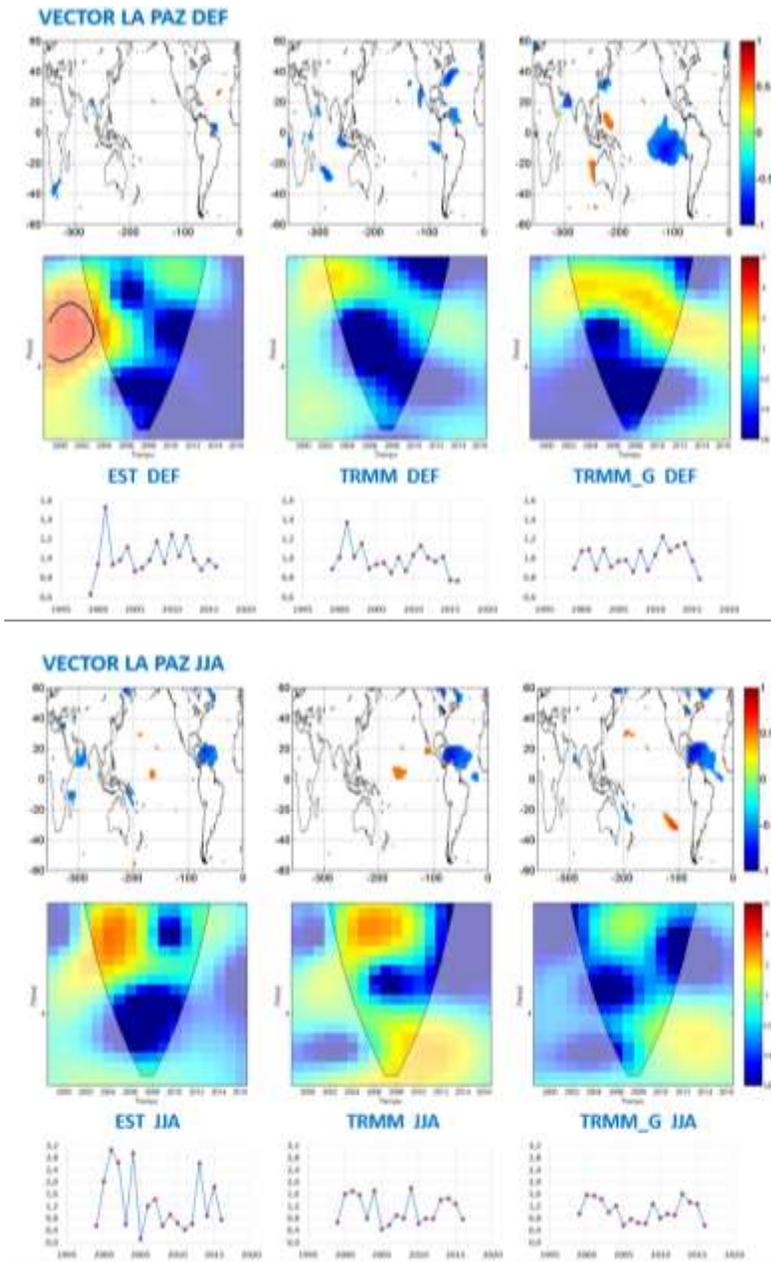


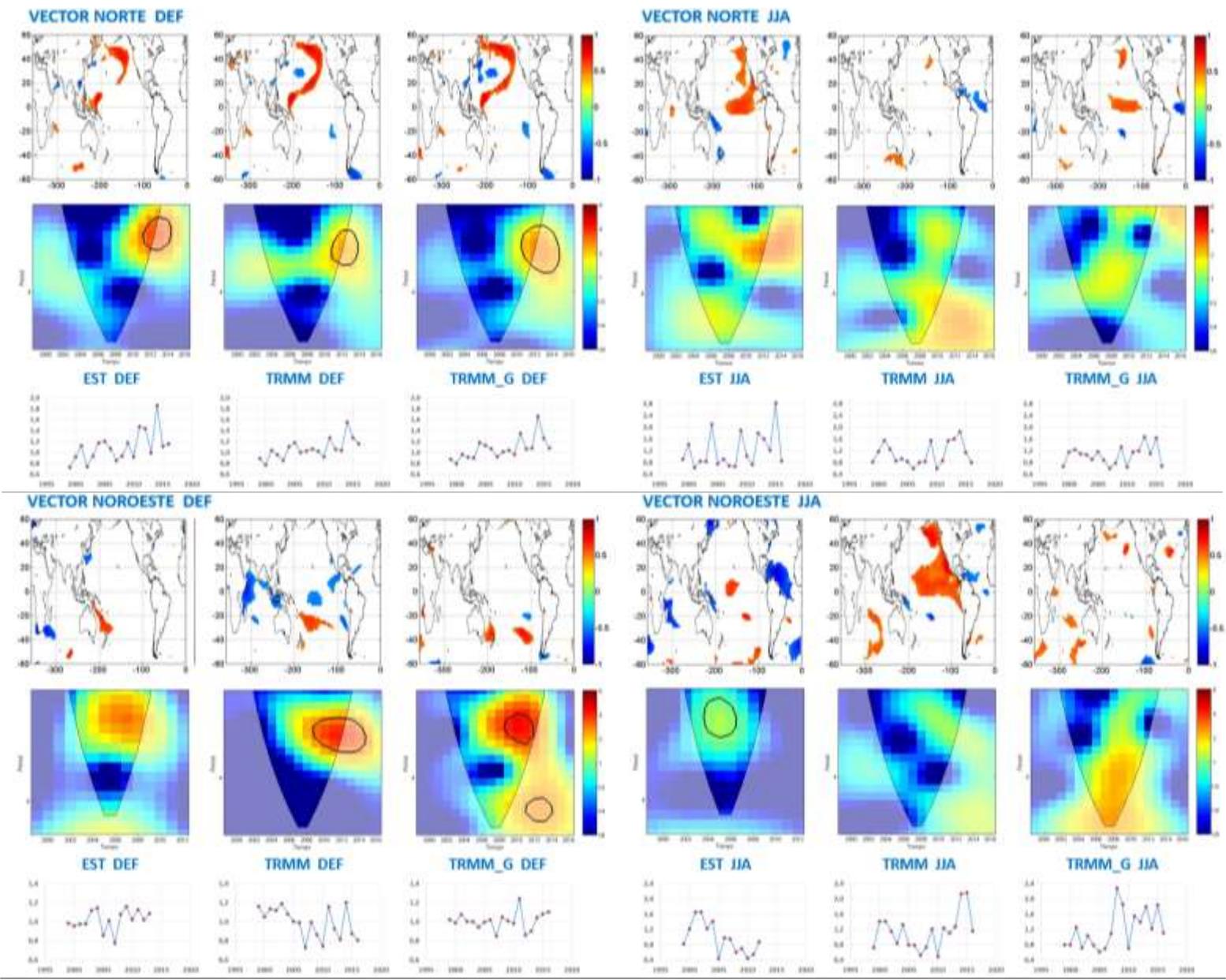
**CP1 DEF**

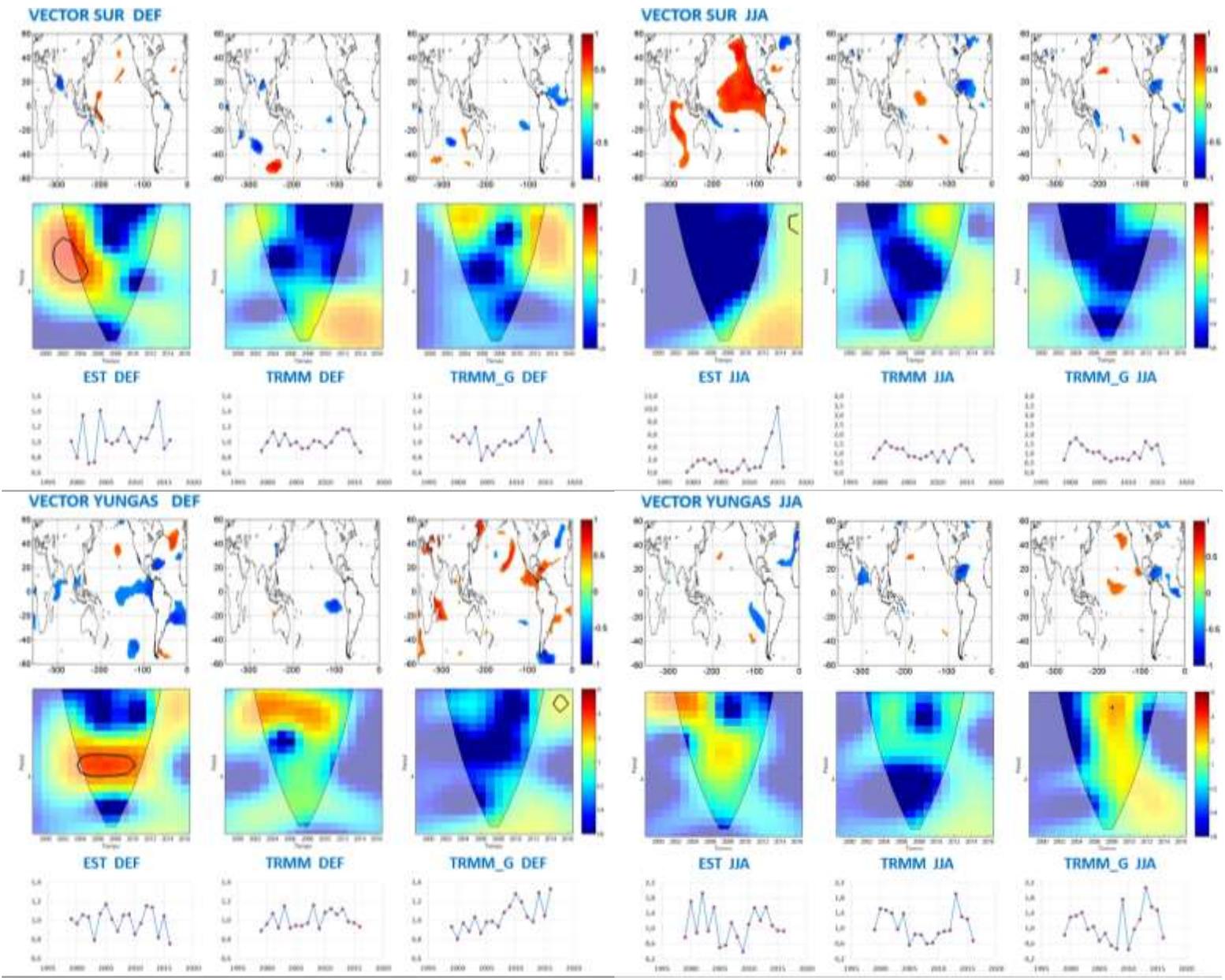


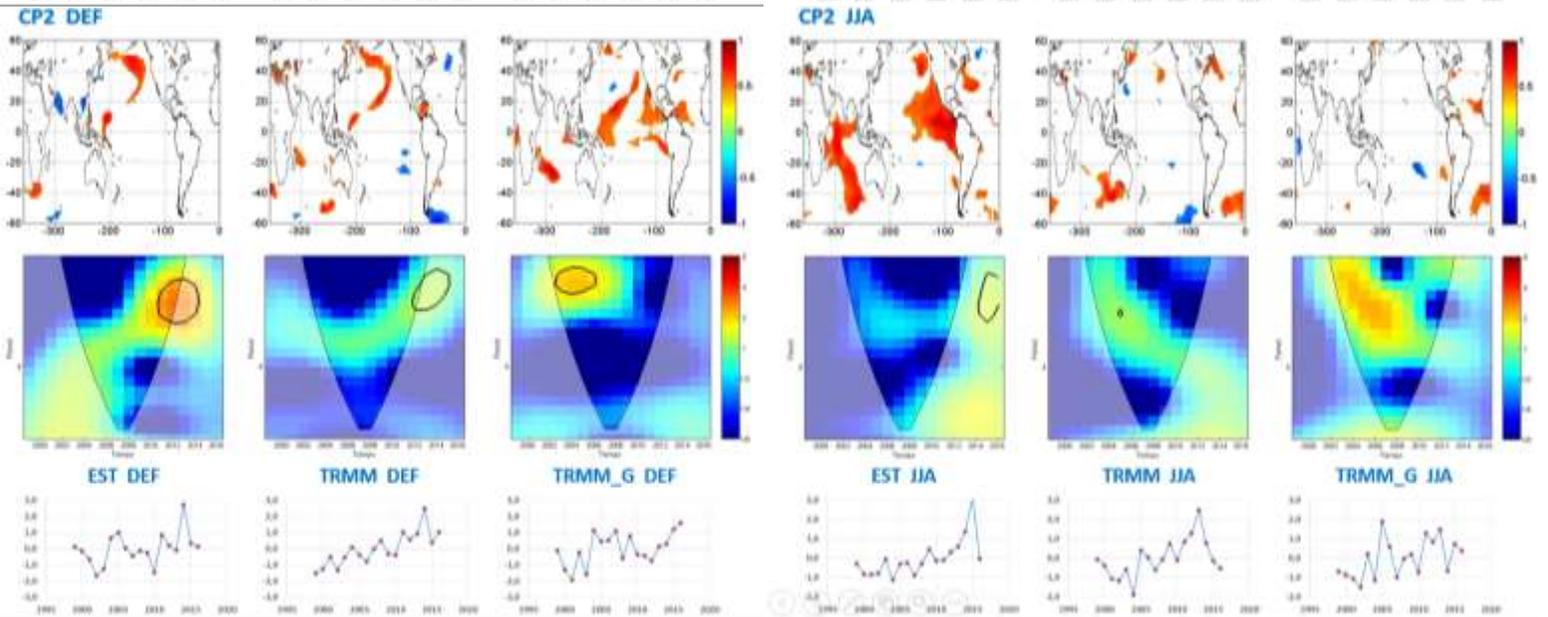
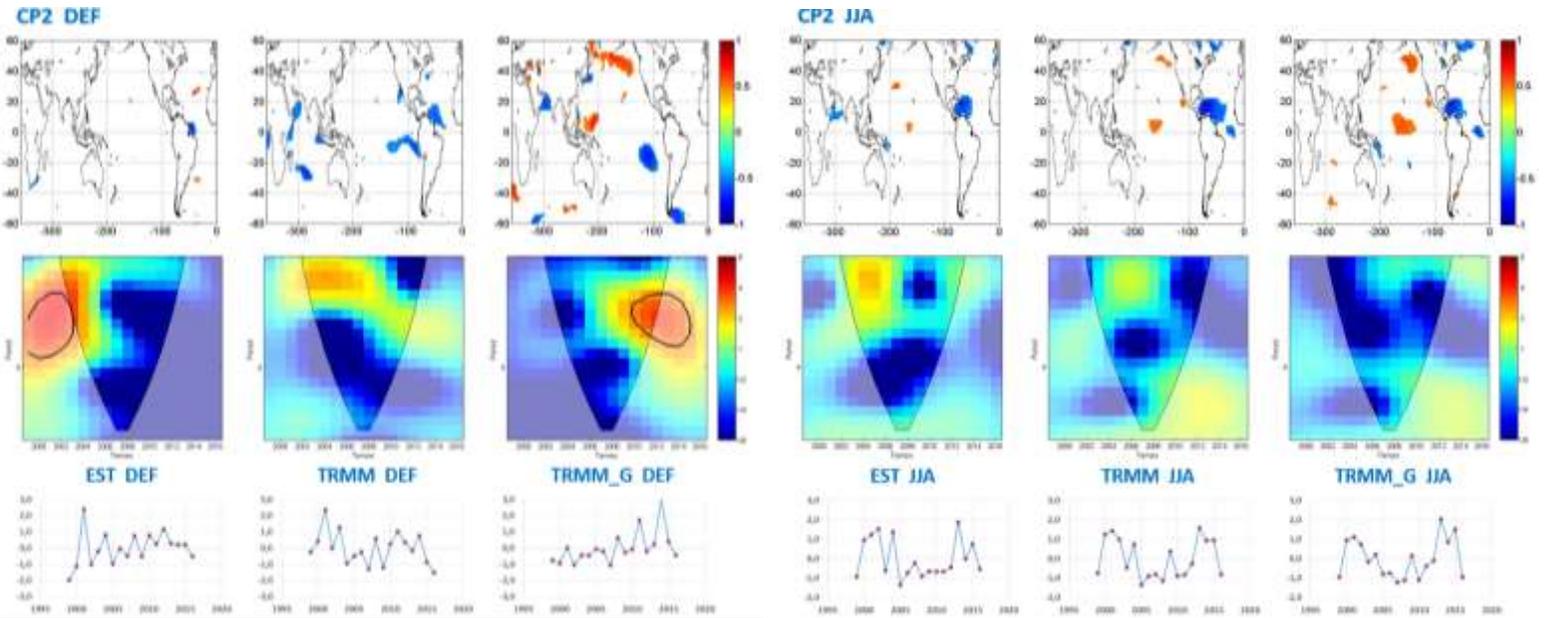


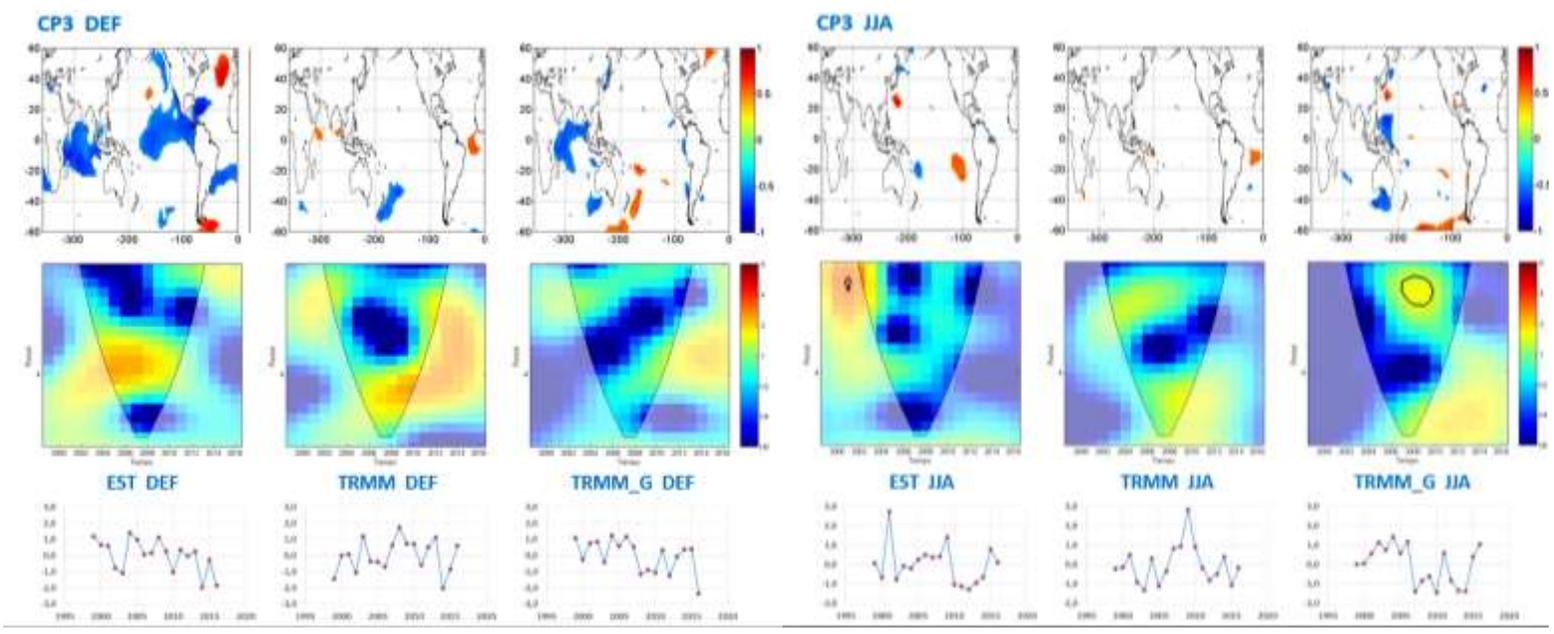
**Fig. A11.** Comparacion de SST, transformada wavelet continua (CWT), y series temprales (VR y CP) entre estaciones terrestres (EST) y PPS TRMM durante DEF y JJA, periodo 1999-2016.











**Tabla A1.** Lista de estaciones pluviométricas por grupos regionales periodo 1972-2016.

Nº	NOMBRE	LATITUD (°)	LONGITUD (°)
<b>Vector La Paz</b>			
1	Achachicala	-16,47	-68,15
2	Achocalla *	-16,58	-68,16
3	Achumani	-16,53	-68,07
4	Alto_Achachicala *	-16,35	-68,08
5	Alto_Lima	-16,48	-68,17
6	Ancochoma *	-15,73	-68,50
7	Ayo_Ayo *	-17,09	-68,00
8	Belén *	-16,02	-68,70
9	Carabuco *	-15,76	-69,06
10	Caracato *	-16,99	-67,81
11	Caxata	-17,15	-67,34
12	Chuma	-15,48	-68,88
13	Chuquiaguillo *	-16,45	-68,09
14	Collana *	-16,90	-68,28
15	Conchamarca *	-17,38	-67,46
16	Curupampa	-15,83	-68,62
17	El_Alto_Aeropuerto	-16,51	-68,18
18	El_Tejar *	-16,50	-68,16
19	Hampaturi	-16,41	-68,02
20	Hichucota *	-16,18	-68,38
21	Huaraco	-17,35	-67,65
22	Huayna_Potosí	-16,27	-68,14
23	Italaque *	-15,47	-69,00
24	Alto_Seguencoma	-16,53	-68,08
25	Puente_Negro *	-16,50	-68,14
26	Lambate *	-16,60	-67,70
27	Laykacota *	-16,50	-68,12
28	Luribay *	-17,06	-67,66
29	Mallasá	-16,57	-68,08
30	Mecapaca *	-16,67	-68,02
31	Plataforma *	-16,28	-68,12
32	Millipunku	-16,50	-68,04
33	Milluni_EPSA	-16,32	-68,14
34	Mina_Bolsa *	-16,55	-67,80
35	Mina_Palcoco	-16,14	-68,28
36	Palca	-16,56	-67,95
37	Pampahasi	-16,49	-68,11
38	Pasankeri *	-16,52	-68,14
39	Patacamaya *	-17,24	-67,92
40	Plaza_Villaruel	-16,48	-68,12
41	Poroma	-17,17	-67,53
42	Puchuni *	-17,28	-67,33
43	Salla *	-17,19	-67,62
44	San_Calixto *	-16,50	-68,13
45	Sapahaqui *	-16,87	-67,93
46	Sica_Sica	-17,33	-67,73
47	Sorata *	-15,77	-68,65
48	Taypichaca	-16,21	-68,35
49	Tiquimani	-16,21	-68,12
50	Tuni_EPSAS	-16,23	-68,25
51	Viacha *	-16,65	-68,30
52	Villa_Adela	-16,52	-68,21
53	Villa_Copacabana	-16,48	-68,11
54	Villa_Puni *	-15,66	-69,17
55	Vino_Tinto *	-16,48	-68,14
56	Yaco	-17,17	-67,41
57	Pinaya *	-16,64	-67,86
58	Puerto_Acosta	-15,53	-69,25
59	Rio_Seco	-16,48	-68,20
60	Calamarca	-16,91	-68,11
61	Zongo	-16,27	-68,12
62	Planta_Botijlaca *	-16,19	-68,14

Nº	NOMBRE	LATITUD (°)	LONGITUD (°)
<b>Vector Norte</b>			
63	Covendo *	-15,83	-66,95
64	Sapecho *	-15,57	-67,32
65	Caranavi *	-15,83	-67,57
66	Rurrenabaque *	-14,43	-67,50
67	San_Borja *	-14,86	-66,74
68	San_Ignacio_Moxos	-14,97	-65,63
69	Guanay	-15,49	-67,87
<b>Vector Sur</b>			
70	CBBA_Aeropuerto *	-17,42	-66,17
71	Corani_Represa	-17,23	-65,88
72	Cotacajes	-16,87	-66,78
73	Independencia *	-17,08	-66,82
74	Inquisivi *	-16,90	-67,14
75	La_Violeta *	-17,35	-66,23
76	Mayca_Mayu	-17,23	-66,35
77	Misicuni *	-17,09	-66,33
78	Pairumani	-17,37	-66,32
79	San_Cristobal	-16,83	-66,77
80	Sarco	-17,38	-66,18
81	Sivingani_Ayo	-16,97	-66,83
82	Capiñata *	-16,99	-67,08
83	Chorocona	-16,88	-67,15
84	San_Jacinto	-16,71	-66,75
85	Circuata *	-16,64	-67,25
86	Escalerani	-17,12	-66,42
87	Quime	-16,99	-67,22
88	San_Benito *	-17,53	-65,90
89	Planta_Choquetang	-16,85	-67,30
90	Choquetanga	-16,83	-67,31
91	Miguillas *	-16,55	-67,33
<b>Vector Yungas</b>			
92	Carmen_Pampa	-16,26	-67,69
93	Chulumani *	-16,40	-67,52
94	Coroico	-16,23	-67,70
95	Irupana *	-16,47	-67,45
96	Chururaqui *	-16,10	-68,07
97	Cuticucho *	-16,13	-68,11
98	Harca *	-16,09	-68,04
99	Huaji	-16,04	-67,98
100	Sainani	-16,12	-68,09
101	Santa_Rosa	-16,13	-68,11
102	Minachi	-16,25	-67,71
103	Chuspipata	-16,30	-67,82
104	Area_Industrial	-16,28	-67,85
105	Huarinilla	-16,20	-67,80
106	Tunel_San_Rafael	-16,27	-67,83
107	Pongo	-16,33	-67,96
108	Sinari	-16,22	-67,84
109	Planta_Cahua	-16,05	-68,01
110	Unduavi	-16,32	-67,91
111	Coripata	-16,32	-67,60
<b>Vector Nor-oeste</b>			
112	Ananea	-14,68	-69,53
113	Cojata	-15,02	-69,36
114	Cuyo_Cuyo	-14,47	-69,54
115	Tambopata	-14,22	-69,15
116	Camata	-15,25	-68,75
117	Hilo_Hilo	-14,82	-68,93
118	Pelechuco	-14,82	-69,08
119	Puina	-14,60	-69,12
120	Queara	-14,70	-69,10

\*. Estaciones utilizadas para el ACP.

**Tabla A2.** Lista de estaciones pluviometricas por grupos regionales periodo 1982-2016.

Nº	NOMBRE	LATITUD (°)	LONGITUD (°)
<b>Vector La Paz</b>			
1	Achachicala	-16,47	-68,15
2	Achocalla *	-16,58	-68,16
3	Achumani	-16,53	-68,07
4	Alto_Achachicala *	-16,35	-68,08
5	Alto_Lima	-16,48	-68,17
6	Ancohoma *	-15,73	-68,50
7	Ayo_Ayo *	-17,09	-68,00
8	Belén *	-16,02	-68,70
9	Carabuco *	-15,76	-69,06
10	Caracato *	-16,99	-67,81
11	Caxata *	-17,15	-67,34
12	Chuma	-15,48	-68,88
13	Chuquiaguillo *	-16,45	-68,09
14	Collana *	-16,90	-68,28
15	Conchamarca *	-17,38	-67,46
16	Curupampa	-15,83	-68,62
17	El_Alto_Aeropuerto	-16,51	-68,18
18	El_Tejar *	-16,50	-68,16
19	Hampaturi	-16,41	-68,02
20	Hichucota *	-16,18	-68,38
21	Huaraco	-17,35	-67,65
22	Huayna_Potosí	-16,27	-68,14
23	Italaque *	-15,47	-69,00
24	Alto_Seguencoma	-16,53	-68,08
25	Puente_Negro *	-16,50	-68,14
26	Lambate *	-16,60	-67,70
27	Laykacota *	-16,50	-68,12
28	Luribay *	-17,06	-67,66
29	Mallasa	-16,57	-68,08
30	Mecapaca *	-16,67	-68,02
31	Plataforma *	-16,28	-68,12
32	Millipunku	-16,50	-68,04
33	Milluni_EPSA	-16,32	-68,14
34	Mina_Bolsa *	-16,55	-67,80
35	Mina_Palcoco	-16,14	-68,28
36	Palca	-16,56	-67,95
37	Pampahasi	-16,49	-68,11
38	Pasankeri *	-16,52	-68,14
39	Patacamaya *	-17,24	-67,92
40	Plaza_Villarroel	-16,48	-68,12
41	Poroma	-17,17	-67,53
42	Puchuni *	-17,28	-67,33
43	Salla *	-17,19	-67,62
44	San_Calixto *	-16,50	-68,13
45	Sapahaqui	-16,87	-67,93
46	Sica_Sica	-17,33	-67,73
47	Sorata	-15,77	-68,65
48	Taypichaca	-16,21	-68,35
49	Tiquimani	-16,21	-68,12
50	Tuni_EPSAS	-16,23	-68,25
51	Viacha *	-16,65	-68,30
52	Villa_Adela *	-16,52	-68,21
53	Villa_Copacabana	-16,48	-68,11
54	Villa_Puni *	-15,66	-69,17
55	Vino_Tinto *	-16,48	-68,14
56	Yaco	-17,17	-67,41
57	Pinaya *	-16,64	-67,86
58	Puerto_Acosta	-15,53	-69,25
59	Rio_Seco	-16,48	-68,20
60	Calamarca	-16,91	-68,11
61	Zongo	-16,27	-68,12
62	Planta_Botijlaca *	-16,19	-68,14

Nº	NOMBRE	LATITUD (°)	LONGITUD (°)
<b>Vector Norte</b>			
63	Covendo *	-15,83	-66,95
64	Sapecho *	-15,57	-67,32
65	Caranavi *	-15,83	-67,57
66	Rurrenabaque *	-14,43	-67,50
67	San_Borja *	-14,86	-66,74
68	San_Ignacio_Moxos	-14,97	-65,63
69	Guanay	-15,49	-67,87
<b>Vector Sur</b>			
70	CBBA_Aeropuerto *	-17,42	-66,17
71	Corani_Represa	-17,23	-65,88
72	Cotacajes	-16,87	-66,78
73	Independencia	-17,08	-66,82
74	Inquisivi *	-16,90	-67,14
75	La_Violeta *	-17,35	-66,23
76	Mayca_Mayu	-17,23	-66,35
77	Misicuni	-17,09	-66,33
78	Pairumani *	-17,37	-66,32
79	San_Cristobal	-16,83	-66,77
80	Sarco *	-17,38	-66,18
81	Sivingani_Ayo	-16,97	-66,83
82	Capiñata *	-16,99	-67,08
83	Chorocona	-16,88	-67,15
84	San_Jacinto	-16,71	-66,75
85	Circuata *	-16,64	-67,25
86	Escalerani	-17,12	-66,42
87	Quime	-16,99	-67,22
88	San_Benito *	-17,53	-65,90
89	Planta_Choquetang	-16,85	-67,30
90	Choquetanga	-16,83	-67,31
91	Miguillas *	-16,55	-67,33
<b>Vector Yungas</b>			
92	Carmen_Pampa	-16,26	-67,69
93	Chulumani *	-16,40	-67,52
94	Coroico	-16,23	-67,70
95	Irupana *	-16,47	-67,45
96	Chururaqui *	-16,10	-68,07
97	Cuticucho *	-16,13	-68,11
98	Harca *	-16,09	-68,04
99	Huaji	-16,04	-67,98
100	Sainani	-16,12	-68,09
101	Santa_Rosa	-16,13	-68,11
102	Minachi	-16,25	-67,71
103	Chuspipata	-16,30	-67,82
104	Area_Industrial	-16,28	-67,85
105	Huarinilla	-16,20	-67,80
106	Tunel_San_Rafael	-16,27	-67,83
107	Pongo	-16,33	-67,96
108	Sinari	-16,22	-67,84
109	Planta_Cahua	-16,05	-68,01
110	Unduavi	-16,32	-67,91
111	Coripata	-16,32	-67,60
<b>Vector Nor-oeste</b>			
112	Ananea	-14,68	-69,53
113	Cojata	-15,02	-69,36
114	Cuyo_Cuyo	-14,47	-69,54
115	Tambopata	-14,22	-69,15
116	Camata	-15,25	-68,75
117	Hilo_Hilo	-14,82	-68,93
118	Pelechuco	-14,82	-69,08
119	Puina	-14,60	-69,12
120	Queara	-14,70	-69,10

\*. Estaciones utilizadas para el ACP.

**Tabla A3.** Lista de estaciones pluviométricas por grupos regionales periodo 1999-2016.

Nº	NOMBRE	LATITUD (°)	LONGITUD (°)
<b>Vector La Paz</b>			
1	Achocalla *	-16,58	-68,16
2	Achumani *	-16,53	-68,07
3	Alto_Achachicala *	-16,35	-68,08
4	Alto_Lima	-16,48	-68,17
5	Ayo_Ayo *	-17,09	-68,00
6	Belen *	-16,02	-68,70
7	Carabuco *	-15,76	-69,06
8	Caracato	-16,99	-67,81
9	Caxata	-17,15	-67,34
10	Chuquiaguillo *	-16,45	-68,09
11	Collana *	-16,90	-68,28
12	Conchamarca *	-17,38	-67,46
13	El_Alto_Aeropuerto	-16,51	-68,18
14	El_Tejar *	-16,50	-68,16
15	Hampaturi	-16,41	-68,02
16	Hichucota *	-16,18	-68,38
17	Huaraco	-17,35	-67,65
18	Italaque	-15,47	-69,00
19	Lambate	-16,60	-67,70
20	Laykacota *	-16,50	-68,12
21	Luribay *	-17,06	-67,66
22	Mecapaca *	-16,67	-68,02
23	Plataforma *	-16,28	-68,12
24	Millipunku	-16,50	-68,04
25	Milluni_EPSA	-16,32	-68,14
26	Mina_Bolsa	-16,55	-67,80
27	Palca *	-16,56	-67,95
28	Pampahasi	-16,49	-68,11
29	Pasankeri *	-16,52	-68,14
30	Patacamaya *	-17,24	-67,92
31	Poroma	-17,17	-67,53
32	Puchuni	-17,28	-67,33
33	Salla *	-17,19	-67,62
34	San_Calixto *	-16,50	-68,13
35	Sapahaqui	-16,87	-67,93
36	Sorata	-15,77	-68,65
37	Tiquimani *	-16,21	-68,12
38	Tuni_EPSAS	-16,23	-68,25
39	Viacha *	-16,65	-68,30
40	Villa_Adela	-16,52	-68,21
41	Villa_Copacabana	-16,48	-68,11
42	Villa_Puni *	-15,66	-69,17
43	Vino_Tinto *	-16,48	-68,14
44	Pinaya *	-16,64	-67,86
45	Puerto_Acosta *	-15,53	-69,25
46	Rio_Seco	-16,48	-68,20
47	Calamarca	-16,91	-68,11
48	Zongo *	-16,27	-68,12
<b>Vector Norte</b>			
49	Covendo *	-15,83	-66,95
50	Sapecho *	-15,57	-67,32
51	Caranavi *	-15,83	-67,57
52	Rurrenabaque *	-14,43	-67,50
53	San_Borja *	-14,86	-66,74
54	San_Ignacio_Moxos	-14,97	-65,63
<b>Vector Sur</b>			
55	CBBA_Aeropuerto *	-17,42	-66,17
56	Independencia	-17,08	-66,82
57	La_Violeta *	-17,35	-66,23
58	Misicuni *	-17,09	-66,33
59	Sarco *	-17,38	-66,18
60	Circuata *	-16,64	-67,25
61	San_Benito *	-17,53	-65,90
62	Miguillas	-16,55	-67,33
<b>Vector Yungas</b>			
63	Carmen_Pampa	-16,26	-67,69
64	Irupana *	-16,47	-67,45
65	Cuticucho *	-16,13	-68,11
66	Harca *	-16,09	-68,04
67	Huaji *	-16,04	-67,98
68	Sainani *	-16,12	-68,09
69	Santa_Rosa	-16,13	-68,11
70	Chuspipata *	-16,30	-67,82
71	Tunel_San_Rafael	-16,27	-67,83
72	Pongo	-16,33	-67,96
73	Sinari	-16,22	-67,84
74	Planta_Cahua	-16,05	-68,01
75	Coripata *	-16,32	-67,60
<b>Vector Nor-oeste</b>			
76	Ananea	-14,68	-69,53
77	Cojata	-15,02	-69,36
78	Cuyo_Cuyo	-14,47	-69,54
79	Tambopata	-14,22	-69,15
80	Camata	-15,25	-68,75

\*. Estaciones utilizadas para el ACP.

**Tabla A4.** Matriz de correlaciones Pearson, entre los índices de los vectores regionales, series de los componentes principales e índices climáticos a nivel año hidrológico, periodo 1972-2016.

AH		VECTOR LA PAZ	VECTOR NORTE	VECTOR SUR	VECTOR YUNGAS	VECTOR NOROESTE	CP1	CP2	CP3	CP4	NIÑO 12	NIÑO 34	NIÑO 3	NIÑO 4	C	E	SOI	AMM	PDO	MEI	AMO NS	AMO S	TNA	TSA
VECTOR LA PAZ	r	1,000	0,097	,585**	,443**	0,294	,957**	-0,172	-0,143	-0,002	-,342*	-,324*	-,365*	-0,260	-0,199	-0,252	0,211	-0,204	-0,003	-0,284	-,345*	-,307*	-0,285	-0,016
	α	0,000	0,527	0,000	0,002	0,062	0,000	0,258	0,348	0,988	0,021	0,030	0,014	0,085	0,194	0,099	0,165	0,178	0,984	0,059	0,020	0,048	0,058	0,917
	r^2	1,000	0,009	0,342	0,196	0,086	0,916	0,030	0,020	0,000	0,117	0,105	0,133	0,068	0,040	0,064	0,045	0,042	0,000	0,081	0,119	0,094	0,081	0,000
VECTOR NORTE	r	0,097	1,000	0,247	-0,159	0,262	0,192	,782**	-,380**	0,252	-0,059	-0,008	-0,011	0,023	0,032	-0,096	-0,108	-,295*	0,121	0,089	-,380*	-,491**	-,374*	-,366*
	α	0,527	0,000	0,102	0,298	0,098	0,207	0,000	0,010	0,096	0,702	0,956	0,941	0,880	0,835	0,535	0,480	0,049	0,430	0,561	0,010	0,001	0,011	0,013
	r^2	0,009	1,000	0,061	0,025	0,069	0,037	0,612	0,144	0,064	0,003	0,000	0,000	0,001	0,001	0,009	0,012	0,087	0,015	0,008	0,144	0,241	0,140	0,134
VECTOR SUR	r	,585**	0,247	1,000	,345*	0,102	,725**	,362*	0,266	-0,241	-0,184	-,339*	-,305*	-,383**	-,323*	-0,057	0,214	-,343*	-0,091	-0,227	-,510**	-,439**	-,475**	-0,204
	α	0,000	0,102	0,000	0,020	0,525	0,000	0,014	0,077	0,110	0,227	0,023	0,042	0,009	0,033	0,713	0,158	0,021	0,551	0,133	0,000	0,004	0,001	0,179
	r^2	0,342	0,061	1,000	0,119	0,010	0,526	0,131	0,071	0,058	0,034	0,115	0,093	0,147	0,104	0,003	0,046	0,118	0,008	0,052	0,260	0,193	0,226	0,042
VECTOR YUNGAS	r	,443**	-0,159	,345*	1,000	0,256	,520**	-0,134	,582**	,394**	-,328*	-,442**	-,424**	-,350*	-,363*	-0,163	,490**	0,147	-,336*	-,509**	0,135	0,160	0,101	0,247
	α	0,002	0,298	0,020	0,000	0,107	0,000	0,380	0,000	0,007	0,028	0,002	0,004	0,018	0,015	0,292	0,001	0,335	0,024	0,000	0,375	0,312	0,509	0,102
	r^2	0,196	0,025	0,119	1,000	0,066	0,270	0,018	0,339	0,155	0,108	0,195	0,180	0,123	0,132	0,027	0,240	0,022	0,113	0,259	0,018	0,026	0,010	0,061
VECTOR NOROESTE	r	0,294	0,262	0,102	0,256	1,000	,347*	0,019	-0,208	0,257	-0,133	-0,056	-0,110	0,000	0,004	-0,130	-0,025	-0,295	0,247	-0,031	-0,160	-0,104	-0,220	0,168
	α	0,062	0,098	0,525	0,107	0,000	0,026	0,905	0,191	0,105	0,408	0,729	0,492	0,999	0,980	0,419	0,875	0,061	0,120	0,849	0,316	0,517	0,167	0,294
	r^2	0,086	0,069	0,010	0,066	1,000	0,120	0,000	0,043	0,066	0,018	0,003	0,012	0,000	0,000	0,017	0,001	0,087	0,061	0,001	0,026	0,011	0,048	0,028
CP1	r	,957**	0,192	,725**	,520**	,347*	1,000	0,000	0,000	0,000	-,352*	-,367*	-,393**	-,305*	-0,254	-0,251	0,266	-0,239	-0,018	-,316*	-,374*	-,325*	-,330*	-0,049
	α	0,000	0,207	0,000	0,000	0,026	0,000	1,000	1,000	1,000	0,018	0,013	0,008	0,042	0,096	0,100	0,078	0,115	0,906	0,034	0,011	0,036	0,027	0,751
	r^2	0,916	0,037	0,526	0,270	0,120	1,000	0,000	0,000	0,000	0,124	0,135	0,154	0,093	0,065	0,063	0,071	0,057	0,000	0,100	0,140	0,106	0,109	0,002
CP2	r	-0,172	,782**	,362*	-0,134	0,019	0,000	1,000	0,000	0,000	0,045	-0,044	0,021	-0,069	-0,068	0,058	-0,036	-0,284	0,004	0,063	-,399**	-,562**	-,366*	-,386**
	α	0,258	0,000	0,014	0,380	0,905	1,000	0,000	1,000	1,000	0,771	0,772	0,892	0,654	0,663	0,707	0,813	0,058	0,981	0,681	0,007	0,000	0,013	0,009
	r^2	0,030	0,612	0,131	0,018	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,002	0,002	0,000	0,005	0,005	0,003	0,001	0,081	0,000	0,004	0,159	0,316	0,134	0,149
CP3	r	-0,143	-,380**	0,266	,582**	-0,208	0,000	0,000	1,000	0,000	-0,156	-,338*	-0,274	-,334*	-,360*	0,025	,445**	0,196	-,417**	-,422**	0,262	,345*	0,204	,318*
	α	0,348	0,010	0,077	0,000	0,191	1,000	1,000	0,000	1,000	0,307	0,023	0,068	0,025	0,016	0,872	0,002	0,197	0,004	0,004	0,083	0,025	0,178	0,033
	r^2	0,020	0,144	0,071	0,339	0,043	0,000	0,000	1,000	0,000	0,024	0,114	0,075	0,112	0,130	0,001	0,198	0,038	0,174	0,178	0,069	0,119	0,042	0,101
CP4	r	-0,002	0,252	-0,241	,394**	0,257	0,000	0,000	0,000	1,000	-0,082	-0,134	-0,104	-0,116	-0,127	-0,006	0,196	-0,004	-0,225	-0,199	0,079	0,104	0,003	0,082
	α	0,988	0,096	0,110	0,007	0,105	1,000	1,000	1,000	0,000	0,594	0,380	0,498	0,446	0,410	0,968	0,196	0,979	0,137	0,191	0,607	0,513	0,986	0,592
	r^2	0,000	0,064	0,058	0,155	0,066	0,000	0,000	0,000	1,000	0,007	0,018	0,011	0,013	0,016	0,000	0,038	0,000	0,051	0,040	0,006	0,011	0,000	0,007

\*\* . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

\* . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

**Tabla A5.** Matriz de correlaciones Pearson, entre los índices de los vectores regionales, series de los componentes principales e índices climáticos para la estación DEF, periodo 1972-2016.

DEF		VECTOR LA PAZ	VECTOR NORTE	VECTOR SUR	VECTOR YUNGAS	VECTOR NOROESTE	CP1	CP2	CP3	CP4	NIÑO 12	NIÑO 34	NIÑO 3	NIÑO 4	C	E	SOI	AMM	PDO	MEI	AMO NS	AMO S	TNA	TSA
VECTOR LA PAZ	r	1,000	0,177	,625**	,424**	,396**	,940**	-0,139	-0,068	0,064	-,504**	-,379*	-,435**	-,320*	-0,289	-,422**	,449**	0,076	-0,131	-,449**	-0,158	-0,083	-0,090	-0,060
	α	0,000	0,244	0,000	0,004	0,009	0,000	0,364	0,656	0,675	0,000	0,010	0,003	0,032	0,057	0,004	0,002	0,619	0,391	0,002	0,299	0,603	0,557	0,695
	r <sup>2</sup>	1,000	0,031	0,391	0,180	0,157	0,884	0,019	0,005	0,004	0,254	0,144	0,189	0,102	0,084	0,178	0,202	0,006	0,017	0,202	0,025	0,007	0,008	0,004
VECTOR NORTE	r	0,177	1,000	,356*	-0,005	,403**	0,249	,668**	-,458**	0,206	-0,284	-0,071	-0,106	0,064	0,036	-,327*	0,026	-0,062	0,060	-0,060	-0,176	-,491**	-0,078	-0,139
	α	0,244	0,000	0,017	0,973	0,008	0,099	0,000	0,002	0,174	0,059	0,643	0,486	0,675	0,814	0,030	0,864	0,684	0,695	0,695	0,246	0,001	0,613	0,362
	r <sup>2</sup>	0,031	1,000	0,127	0,000	0,162	0,062	0,446	0,210	0,042	0,081	0,005	0,011	0,004	0,001	0,107	0,001	0,004	0,004	0,004	0,004	0,031	0,241	0,006
VECTOR SUR	r	,625**	,356*	1,000	,331*	0,252	,737**	,427**	0,035	-0,233	-,362*	-,345*	-,367*	-0,258	-0,236	-0,286	,390**	0,078	-0,274	-,352*	-0,143	-0,173	-0,077	-0,190
	α	0,000	0,017	0,000	0,027	0,107	0,000	0,003	0,820	0,124	0,014	0,020	0,013	0,087	0,123	0,060	0,008	0,612	0,069	0,018	0,347	0,273	0,616	0,210
	r <sup>2</sup>	0,391	0,127	1,000	0,110	0,064	0,543	0,182	0,001	0,054	0,131	0,119	0,135	0,067	0,056	0,082	0,152	0,006	0,075	0,124	0,020	0,030	0,006	0,036
VECTOR YUNGAS	r	,424**	-0,005	,331*	1,000	0,117	,514**	-0,009	,518**	0,106	-,353*	-,414**	-,376*	-,387**	-,386**	-0,146	,419**	0,155	-0,116	-,432**	0,029	0,083	0,003	0,050
	α	0,004	0,973	0,027	0,000	0,462	0,000	0,954	0,000	0,490	0,017	0,005	0,011	0,009	0,010	0,345	0,004	0,309	0,448	0,003	0,848	0,603	0,983	0,743
	r <sup>2</sup>	0,180	0,000	0,110	1,000	0,014	0,264	0,000	0,268	0,011	0,125	0,171	0,141	0,150	0,149	0,021	0,176	0,024	0,013	0,187	0,001	0,007	0,000	0,003
VECTOR NOROESTE	r	,396**	,403**	0,252	0,117	1,000	,407**	0,016	-0,136	0,229	-,369*	-0,261	-,305*	-0,181	-0,178	-,315*	0,214	-0,007	0,222	-0,245	-0,036	-0,142	-0,035	0,146
	α	0,009	0,008	0,107	0,462	0,000	0,007	0,920	0,391	0,145	0,016	0,094	0,049	0,252	0,258	0,042	0,174	0,965	0,157	0,117	0,819	0,370	0,826	0,356
	r <sup>2</sup>	0,157	0,162	0,064	0,014	1,000	0,166	0,000	0,018	0,052	0,136	0,068	0,093	0,033	0,032	0,099	0,046	0,000	0,049	0,060	0,001	0,020	0,001	0,021
CP1	r	,940**	0,249	,737**	,514**	,407**	1,000	0,000	0,000	0,000	-,503**	-,393**	-,440**	-,335*	-,307*	-,407**	,437**	0,082	-0,102	-,451**	-0,157	-0,090	-0,088	-0,106
	α	0,000	0,099	0,000	0,000	0,007	0,000	1,000	1,000	1,000	0,000	0,008	0,002	0,024	0,043	0,006	0,003	0,591	0,507	0,002	0,304	0,573	0,566	0,489
	r <sup>2</sup>	0,884	0,062	0,543	0,264	0,166	1,000	0,000	0,000	0,000	0,253	0,154	0,194	0,112	0,094	0,166	0,191	0,007	0,010	0,203	0,025	0,008	0,008	0,011
CP2	r	-0,139	,668**	,427**	-0,009	0,016	0,000	1,000	0,000	0,000	-0,114	-0,177	-0,130	-0,098	-0,144	-0,065	0,184	0,035	-0,165	-0,149	-0,023	-0,229	-0,031	-0,138
	α	0,364	0,000	0,003	0,954	0,920	1,000	0,000	1,000	1,000	0,457	0,246	0,394	0,523	0,351	0,676	0,227	0,822	0,278	0,328	0,879	0,145	0,839	0,366
	r <sup>2</sup>	0,019	0,446	0,182	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,013	0,031	0,017	0,010	0,021	0,004	0,034	0,001	0,027	0,022	0,001	0,052	0,001	0,019
CP3	r	-0,068	-,458**	0,035	,518**	-0,136	0,000	0,000	1,000	0,000	-0,113	-,351*	-0,283	-,375*	-,369*	0,057	,388**	0,131	-,299*	-,366*	0,109	0,225	0,010	0,130
	α	0,656	0,002	0,820	0,000	0,391	1,000	1,000	0,000	1,000	0,460	0,018	0,059	0,011	0,014	0,715	0,009	0,393	0,046	0,013	0,476	0,153	0,946	0,395
	r <sup>2</sup>	0,005	0,210	0,001	0,268	0,018	0,000	0,000	1,000	0,000	0,013	0,123	0,080	0,141	0,136	0,003	0,151	0,017	0,089	0,134	0,012	0,051	0,000	0,017
CP4	r	0,064	0,206	-0,233	0,106	0,229	0,000	0,000	0,000	1,000	-0,123	-0,062	-0,053	-0,145	-0,088	-0,073	0,115	-0,208	-0,001	-0,096	-,336*	-,395**	-0,216	-0,110
	α	0,675	0,174	0,124	0,490	0,145	1,000	1,000	1,000	0,000	0,422	0,685	0,728	0,343	0,569	0,638	0,452	0,171	0,997	0,531	0,024	0,010	0,154	0,472
	r <sup>2</sup>	0,004	0,042	0,054	0,011	0,052	0,000	0,000	0,000	1,000	0,015	0,004	0,003	0,021	0,008	0,005	0,013	0,043	0,000	0,009	0,113	0,156	0,047	0,012

\*\* . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

\* . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

**Tabla A6.** Matriz de correlaciones Pearson, entre los índices de los vectores regionales, series de los componentes principales e índices climáticos para la estación MAM, periodo 1972-2016.

MAM		VECTOR LA PAZ	VECTOR NORTE	VECTOR SUR	VECTOR YUNGAS	VECTOR NOROESTE	CP1	CP2	CP3	CP4	NIÑO 12	NIÑO 34	NIÑO 3	NIÑO 4	C	E	SOI	AMM	PDO	MEI	AMO NS	AMO S	TNA	TSA
VECTOR LA PAZ	r	1,000	0,238	,574**	,602**	,604**	,964**	-0,067	-0,154	-0,025	-0,139	-0,265	-0,257	-0,205	-0,169	-0,072	0,010	-0,142	0,042	-0,165	-0,165	-0,214	-0,176	0,024
	α	0,000	0,115	0,000	0,000	0,000	0,000	0,664	0,311	0,872	0,363	0,079	0,088	0,176	0,272	0,641	0,946	0,353	0,785	0,280	0,278	0,174	0,247	0,877
	r <sup>2</sup>	1,000	0,057	0,329	0,362	0,365	0,929	0,004	0,024	0,001	0,019	0,070	0,066	0,042	0,029	0,005	0,000	0,020	0,002	0,027	0,027	0,046	0,031	0,001
VECTOR NORTE	r	0,238	1,000	-0,073	0,084	0,098	0,276	-,721**	,336*	0,029	0,095	0,140	0,119	0,165	0,132	0,020	-0,163	0,165	0,159	0,237	-0,065	-,359*	0,041	-0,277
	α	0,115	0,000	0,634	0,585	0,538	0,066	0,000	0,024	0,851	0,536	0,359	0,435	0,279	0,392	0,898	0,285	0,278	0,295	0,117	0,672	0,020	0,789	0,065
	r <sup>2</sup>	0,057	1,000	0,005	0,007	0,010	0,076	0,520	0,113	0,001	0,009	0,020	0,014	0,027	0,017	0,000	0,027	0,027	0,025	0,056	0,004	0,129	0,002	0,077
VECTOR SUR	r	,574**	-0,073	1,000	,581**	,430**	,670**	,531**	0,249	-0,183	-0,291	-,459**	-,400**	-,442**	-,356*	-0,108	,355*	-0,102	-0,167	-,448**	-0,050	0,112	-0,109	0,237
	α	0,000	0,634	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,099	0,230	0,052	0,002	0,006	0,002	0,018	0,484	0,017	0,503	0,274	0,002	0,744	0,479	0,474	0,117
	r <sup>2</sup>	0,329	0,005	1,000	0,338	0,185	0,449	0,282	0,062	0,033	0,085	0,211	0,160	0,195	0,127	0,012	0,126	0,010	0,028	0,201	0,003	0,013	0,012	0,056
VECTOR YUNGAS	r	,602**	0,084	,581**	1,000	,528**	,706**	0,231	0,255	,437**	-0,224	-,405**	-,362*	-,306*	-,303*	-0,112	,402**	-0,224	-0,257	-,436**	-0,044	0,144	-0,162	,296*
	α	0,000	0,585	0,000	0,000	0,000	0,000	0,126	0,092	0,003	0,139	0,006	0,015	0,041	0,046	0,469	0,006	0,139	0,088	0,003	0,774	0,362	0,288	0,049
	r <sup>2</sup>	0,362	0,007	0,338	1,000	0,279	0,498	0,053	0,065	0,191	0,050	0,164	0,131	0,094	0,092	0,013	0,162	0,050	0,066	0,190	0,002	0,021	0,026	0,088
VECTOR NOROESTE	r	,604**	0,098	,430**	,528**	1,000	,652**	0,052	0,063	-0,109	-0,127	-0,018	-0,090	-0,026	0,035	-0,121	-0,055	-0,283	0,138	-0,024	-0,123	-0,109	-0,240	0,118
	α	0,000	0,538	0,004	0,000	0,000	0,000	0,745	0,693	0,491	0,424	0,912	0,572	0,869	0,826	0,444	0,730	0,069	0,384	0,878	0,436	0,493	0,125	0,456
	r <sup>2</sup>	0,365	0,010	0,185	0,279	1,000	0,425	0,003	0,004	0,012	0,016	0,000	0,008	0,001	0,001	0,015	0,003	0,080	0,019	0,001	0,015	0,012	0,058	0,014
CP1	r	,964**	0,276	,670**	,706**	,652**	1,000	0,000	0,000	0,000	-0,213	-,322*	-,332*	-0,229	-0,178	-0,148	0,106	-0,133	-0,011	-0,241	-0,171	-0,206	-0,169	0,073
	α	0,000	0,066	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	1,000	1,000	0,160	0,031	0,026	0,131	0,248	0,337	0,489	0,382	0,942	0,111	0,262	0,190	0,267	0,631
	r <sup>2</sup>	0,929	0,076	0,449	0,498	0,425	1,000	0,000	0,000	0,000	0,045	0,104	0,110	0,052	0,032	0,022	0,011	0,018	0,000	0,058	0,029	0,042	0,029	0,005
CP2	r	-0,067	-,721**	,531**	0,231	0,052	0,000	1,000	0,000	0,000	-,329*	-,460**	-,389**	-,447**	-,373*	-0,134	,470**	-0,079	-0,278	-,534**	0,128	,435**	-0,016	,382**
	α	0,664	0,000	0,000	0,126	0,745	1,000	0,000	1,000	1,000	0,027	0,001	0,008	0,002	0,013	0,386	0,001	0,604	0,065	0,000	0,402	0,004	0,915	0,010
	r <sup>2</sup>	0,004	0,520	0,282	0,053	0,003	0,000	1,000	0,000	0,000	0,108	0,212	0,151	0,200	0,139	0,018	0,221	0,006	0,077	0,285	0,016	0,189	0,000	0,146
CP3	r	-0,154	,336*	0,249	0,255	0,063	0,000	0,000	1,000	0,000	-0,052	-0,140	-0,064	-0,227	-0,202	0,086	,361*	-0,002	-0,261	-0,165	-0,020	0,037	-0,001	0,069
	α	0,311	0,024	0,099	0,092	0,693	1,000	1,000	0,000	1,000	0,732	0,357	0,678	0,133	0,188	0,580	0,015	0,990	0,083	0,278	0,896	0,817	0,995	0,652
	r <sup>2</sup>	0,024	0,113	0,062	0,065	0,004	0,000	0,000	1,000	0,000	0,003	0,020	0,004	0,052	0,041	0,007	0,130	0,000	0,068	0,027	0,000	0,001	0,000	0,005
CP4	r	-0,025	0,029	-0,183	,437**	-0,109	0,000	0,000	0,000	1,000	-0,028	-0,205	-0,128	-0,161	-0,221	0,030	0,249	-0,270	-,372*	-0,240	0,006	0,225	-0,150	0,261
	α	0,872	0,851	0,230	0,003	0,491	1,000	1,000	1,000	0,000	0,857	0,177	0,403	0,290	0,150	0,847	0,098	0,073	0,012	0,112	0,967	0,151	0,324	0,083
	r <sup>2</sup>	0,001	0,001	0,033	0,191	0,012	0,000	0,000	0,000	1,000	0,001	0,042	0,016	0,026	0,049	0,001	0,062	0,073	0,138	0,058	0,000	0,051	0,023	0,068

\*\* . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

\* . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

**Tabla A7.** Matriz de correlaciones Pearson, entre los índices de los vectores regionales, series de los componentes principales e índices climáticos para la estación JJA, periodo 1972-2016.

JJA		VECTOR LA PAZ	VECTOR NORTE	VECTOR SUR	VECTOR YUNGAS	VECTOR NOROESTE	CP1	CP2	CP3	CP4	NIÑO 12	NIÑO 34	NIÑO 3	NIÑO 4	C	E	SOI	AMM	PDO	MEI	AMO NS	AMO S	TNA	TSA
VECTOR LA PAZ	r	1,000	,361*	,547**	,596**	,787**	,961**	-0,216	-0,044	0,050	-0,040	0,057	0,029	0,071	0,120	-0,076	-0,058	-0,243	0,110	0,026	-,373*	-0,208	-,329*	-0,184
	α	0,000	0,015	0,000	0,000	0,000	0,000	0,155	0,774	0,746	0,793	0,709	0,851	0,645	0,438	0,626	0,705	0,108	0,470	0,864	0,012	0,185	0,027	0,227
	r <sup>2</sup>	1,000	0,130	0,299	0,355	0,619	0,924	0,047	0,002	0,003	0,002	0,003	0,001	0,005	0,014	0,006	0,003	0,059	0,012	0,001	0,139	0,043	0,108	0,034
VECTOR NORTE	r	,361*	1,000	,441**	,473**	,323*	,483**	,503**	-0,286	,320*	0,085	0,097	0,114	0,027	0,063	0,065	-0,101	-0,082	0,039	0,129	-0,226	-0,249	-0,163	-0,257
	α	0,015	0,000	0,002	0,001	0,039	0,001	0,000	0,057	0,032	0,578	0,527	0,457	0,861	0,683	0,677	0,509	0,591	0,801	0,397	0,136	0,111	0,285	0,089
	r <sup>2</sup>	0,130	1,000	0,194	0,224	0,104	0,233	0,253	0,082	0,102	0,007	0,009	0,013	0,001	0,004	0,004	0,010	0,007	0,002	0,017	0,051	0,062	0,027	0,066
VECTOR SUR	r	,547**	,441**	1,000	,437**	,559**	,662**	,325*	-,311*	-,372*	0,233	0,186	0,220	0,205	0,137	0,167	-0,180	-,383**	,373*	0,236	-,310*	-0,273	-0,273	-0,044
	α	0,000	0,002	0,000	0,003	0,000	0,000	0,029	0,037	0,012	0,124	0,221	0,146	0,178	0,374	0,280	0,237	0,009	0,012	0,118	0,038	0,080	0,070	0,773
	r <sup>2</sup>	0,299	0,194	1,000	0,191	0,312	0,438	0,106	0,097	0,138	0,054	0,035	0,048	0,042	0,019	0,028	0,032	0,147	0,139	0,056	0,096	0,075	0,075	0,002
VECTOR YUNGAS	r	,596**	,473**	,437**	1,000	,442**	,731**	,445**	,347*	0,093	-0,004	-0,191	-0,103	-0,246	-0,251	0,047	0,219	-0,157	-0,034	-0,149	-0,271	-0,152	-0,194	-0,069
	α	0,000	0,001	0,003	0,000	0,004	0,000	0,002	0,020	0,543	0,979	0,209	0,503	0,103	0,100	0,760	0,149	0,303	0,823	0,329	0,072	0,337	0,201	0,654
	r <sup>2</sup>	0,355	0,224	0,191	1,000	0,195	0,534	0,198	0,120	0,009	0,000	0,036	0,011	0,061	0,063	0,002	0,048	0,025	0,001	0,022	0,073	0,023	0,038	0,005
VECTOR NOROESTE	r	,787**	,323*	,559**	,442**	1,000	,785**	-0,189	-0,178	0,117	0,057	0,196	0,182	0,134	0,190	0,019	-0,094	-,320*	0,155	0,125	-,350*	-0,299	-,327*	-0,043
	α	0,000	0,039	0,000	0,004	0,000	0,000	0,238	0,265	0,467	0,724	0,219	0,254	0,402	0,233	0,907	0,558	0,042	0,334	0,437	0,025	0,057	0,037	0,792
	r <sup>2</sup>	0,619	0,104	0,312	0,195	1,000	0,616	0,036	0,032	0,014	0,003	0,038	0,033	0,018	0,036	0,000	0,009	0,102	0,024	0,016	0,123	0,089	0,107	0,002
CP1	r	,961**	,483**	,662**	,731**	,785**	1,000	0,000	0,000	0,000	-0,008	0,029	0,031	0,013	0,050	-0,027	-0,008	-0,267	0,125	0,015	-,413**	-0,283	-,337*	-0,161
	α	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	1,000	1,000	0,959	0,850	0,841	0,932	0,747	0,862	0,958	0,076	0,414	0,922	0,005	0,069	0,024	0,289
	r <sup>2</sup>	0,924	0,233	0,438	0,534	0,616	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,003	0,001	0,000	0,071	0,016	0,000	0,171	0,080	0,114	0,026
CP2	r	-0,216	,503**	,325*	,445**	-0,189	0,000	1,000	0,000	0,000	0,159	0,005	0,072	-0,040	-0,090	0,165	0,011	-0,103	0,064	0,081	-0,115	-0,110	-0,061	-0,131
	α	0,155	0,000	0,029	0,002	0,238	1,000	0,000	1,000	1,000	0,298	0,976	0,639	0,793	0,562	0,283	0,942	0,501	0,678	0,597	0,451	0,489	0,691	0,391
	r <sup>2</sup>	0,047	0,253	0,106	0,198	0,036	0,000	1,000	0,000	0,000	0,025	0,000	0,005	0,002	0,008	0,027	0,000	0,011	0,004	0,007	0,013	0,012	0,004	0,017
CP3	r	-0,044	-0,286	-,311*	,347*	-0,178	0,000	0,000	1,000	0,000	-0,287	-,431**	-,400**	-,414**	-,408**	-0,183	,392**	0,170	-,372*	-,462**	0,121	0,200	0,157	0,191
	α	0,774	0,057	0,037	0,020	0,265	1,000	1,000	0,000	1,000	0,056	0,003	0,007	0,005	0,006	0,236	0,008	0,264	0,012	0,001	0,428	0,203	0,303	0,209
	r <sup>2</sup>	0,002	0,082	0,097	0,120	0,032	0,000	0,000	1,000	0,000	0,082	0,186	0,160	0,171	0,166	0,033	0,154	0,029	0,138	0,213	0,015	0,040	0,025	0,036
CP4	r	0,050	,320*	-,372*	0,093	0,117	0,000	0,000	0,000	1,000	-0,164	0,056	-0,019	0,092	0,170	-0,188	-0,069	0,113	-0,256	0,023	0,061	0,068	-0,047	-0,245
	α	0,746	0,032	0,012	0,543	0,467	1,000	1,000	1,000	0,000	0,281	0,713	0,902	0,548	0,271	0,222	0,652	0,461	0,090	0,881	0,690	0,670	0,761	0,104
	r <sup>2</sup>	0,003	0,102	0,138	0,009	0,014	0,000	0,000	0,000	1,000	0,027	0,003	0,000	0,008	0,029	0,035	0,005	0,013	0,066	0,001	0,004	0,005	0,002	0,060

\*\* . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

\* . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

**Tabla A8.** Matriz de correlaciones Pearson, entre los índices de los vectores regionales, series de los componentes principales e índices climáticos para la estación SON, periodo 1972-2016.

SON		VECTOR LA PAZ	VECTOR NORTE	VECTOR SUR	VECTOR YUNGAS	VECTOR NOROESTE	CP1	CP2	CP3	CP4	NIÑO 12	NIÑO 34	NIÑO 3	NIÑO 4	C	E	SOI	AMM	PDO	MEI	AMO NS	AMO S	TNA	TSA
VECTOR LA PAZ	r	1,000	0,108	0,429	0,663	0,608	0,924	-0,238	-0,204	-0,052	0,165	0,264	0,239	0,274	0,287	0,095	-0,395	-0,223	0,242	,351*	-0,080	-0,111	-0,087	0,049
	α	0,000	0,478	0,003	0,000	0,000	0,000	0,116	0,180	0,736	0,278	0,080	0,114	0,069	0,056	0,537	0,007	0,141	0,110	0,018	0,602	0,489	0,572	0,749
	r <sup>2</sup>	1,000	0,012	0,184	0,440	0,370	0,854	0,057	0,042	0,003	0,027	0,070	0,057	0,075	0,082	0,009	0,156	0,050	0,059	0,123	0,006	0,012	0,008	0,002
VECTOR NORTE	r	0,108	1,000	0,123	,320*	0,165	0,200	0,666	-0,514	-0,100	-0,199	-0,163	-0,175	-0,106	-0,096	-0,203	-0,055	-0,219	0,005	-0,097	-,313*	-0,280	-,324*	-,324*
	α	0,478	0,000	0,419	0,032	0,291	0,189	0,000	0,000	0,514	0,191	0,284	0,251	0,490	0,529	0,181	0,718	0,149	0,973	0,526	0,036	0,077	0,030	0,030
	r <sup>2</sup>	0,012	1,000	0,015	0,102	0,027	0,040	0,444	0,264	0,010	0,040	0,027	0,031	0,011	0,009	0,041	0,003	0,048	0,000	0,009	0,098	0,078	0,105	0,105
VECTOR SUR	r	0,429	0,123	1,000	0,680	0,469	0,663	,304*	0,487	-0,150	0,016	0,107	0,080	0,102	0,128	-0,013	-0,204	-,312*	0,113	0,167	-0,257	-0,306	-0,262	-0,003
	α	0,003	0,419	0,000	0,000	0,001	0,000	0,042	0,001	0,325	0,918	0,483	0,601	0,506	0,404	0,934	0,179	0,037	0,461	0,272	0,089	0,052	0,082	0,983
	r <sup>2</sup>	0,184	0,015	1,000	0,462	0,220	0,440	0,092	0,237	0,023	0,000	0,011	0,006	0,010	0,016	0,000	0,042	0,097	0,013	0,028	0,066	0,094	0,069	0,000
VECTOR YUNGAS	r	0,663	,320*	0,680	1,000	0,567	0,825	0,264	0,086	,327*	0,078	,295*	0,238	0,291	,329*	0,019	-,338*	-0,233	0,124	,299*	-0,104	-0,247	-0,080	0,058
	α	0,000	0,032	0,000	0,000	0,000	0,000	0,080	0,574	0,028	0,609	0,049	0,116	0,052	0,027	0,900	0,023	0,123	0,417	0,046	0,498	0,120	0,603	0,707
	r <sup>2</sup>	0,440	0,102	0,462	1,000	0,321	0,681	0,070	0,007	0,107	0,006	0,087	0,057	0,085	0,108	0,000	0,114	0,054	0,015	0,089	0,011	0,061	0,006	0,003
VECTOR NOROESTE	r	0,608	0,165	0,469	0,567	1,000	0,624	0,108	0,029	0,083	0,133	0,223	0,210	0,220	0,216	0,101	-,314*	-0,242	-0,079	0,273	-0,020	-0,069	-0,117	0,138
	α	0,000	0,291	0,001	0,000	0,000	0,000	0,490	0,855	0,598	0,395	0,151	0,177	0,157	0,163	0,521	0,040	0,118	0,616	0,077	0,898	0,670	0,456	0,378
	r <sup>2</sup>	0,370	0,027	0,220	0,321	1,000	0,389	0,012	0,001	0,007	0,018	0,050	0,044	0,048	0,047	0,010	0,099	0,059	0,006	0,075	0,000	0,005	0,014	0,019
CP1	r	0,924	0,200	0,663	0,825	0,624	1,000	0,000	0,000	0,000	0,132	0,248	0,225	0,241	0,262	0,083	-,369*	-,305*	0,273	,332*	-0,169	-0,249	-0,171	0,045
	α	0,000	0,189	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	1,000	1,000	0,388	0,101	0,138	0,111	0,082	0,587	0,013	0,041	0,069	0,026	0,267	0,117	0,262	0,771
	r <sup>2</sup>	0,854	0,040	0,440	0,681	0,389	1,000	0,000	0,000	0,000	0,017	0,062	0,051	0,058	0,069	0,007	0,136	0,093	0,075	0,110	0,029	0,062	0,029	0,002
CP2	r	-0,238	0,666	,304*	0,264	0,108	0,000	1,000	0,000	0,000	-0,260	-0,278	-0,264	-0,269	-0,268	-0,181	0,220	-0,139	-0,191	-0,262	-0,210	-,330*	-0,220	-0,080
	α	0,116	0,000	0,042	0,080	0,490	1,000	0,000	1,000	1,000	0,085	0,064	0,080	0,074	0,076	0,233	0,146	0,363	0,208	0,082	0,166	0,035	0,147	0,603
	r <sup>2</sup>	0,057	0,444	0,092	0,070	0,012	0,000	1,000	0,000	0,000	0,068	0,077	0,070	0,072	0,072	0,033	0,048	0,019	0,036	0,069	0,044	0,109	0,048	0,006
CP3	r	-0,204	-0,514	0,487	0,086	0,029	0,000	0,000	1,000	0,000	0,081	0,121	0,115	0,069	0,087	0,090	0,020	-0,115	0,125	0,103	-0,072	-0,177	-0,040	0,184
	α	0,180	0,000	0,001	0,574	0,855	1,000	1,000	0,000	1,000	0,597	0,429	0,451	0,654	0,569	0,559	0,895	0,453	0,415	0,500	0,640	0,267	0,793	0,226
	r <sup>2</sup>	0,042	0,264	0,237	0,007	0,001	0,000	0,000	1,000	0,000	0,007	0,015	0,013	0,005	0,008	0,008	0,000	0,013	0,016	0,011	0,005	0,031	0,002	0,034
CP4	r	-0,052	-0,100	-0,150	,327*	0,083	0,000	0,000	0,000	1,000	0,110	0,270	0,239	0,218	0,244	0,101	-0,049	0,090	-0,095	0,140	0,216	0,180	0,268	0,262
	α	0,736	0,514	0,325	0,028	0,598	1,000	1,000	1,000	0,000	0,472	0,073	0,113	0,150	0,107	0,509	0,750	0,555	0,536	0,357	0,154	0,261	0,075	0,082
	r <sup>2</sup>	0,003	0,010	0,023	0,107	0,007	0,000	0,000	0,000	1,000	0,012	0,073	0,057	0,048	0,060	0,010	0,002	0,008	0,009	0,020	0,047	0,032	0,072	0,069

\*\* . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

\* . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

**Tabla A9.** Correlación (r) y significancia ( $\alpha$ ) entre series de las CP de estaciones terrestres (EST) y productos satelitales (CHIRPS y MSWEP) a nivel AH y estacional, periodo 1982-2016.

		CP1				CP2				CP3				CP4			
		CHIRPS	MSWEP	CHIRPS_G	MSWEP_G												
AH	r	0,852	0,948	0,743	0,763	0,719	0,646	0,515	0,564	0,260	0,095	0,155	0,026	0,007	0,130	0,448	0,180
	$\alpha$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,131	0,585	0,374	0,881	0,969	0,457	0,007	0,300
DEF	r	0,783	0,960	0,776	0,736	0,655	0,729	0,524	0,614	0,001	0,031	0,013	0,168	0,182	0,034	0,115	0,098
	$\alpha$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,994	0,858	0,940	0,335	0,295	0,845	0,510	0,575
MAM	r	0,938	0,966	0,918	0,886	0,376	0,699	0,484	0,811	0,284	0,248	0,589	0,587	0,129	0,173	0,108	0,046
	$\alpha$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,026	0,000	0,003	0,000	0,099	0,151	0,000	0,000	0,461	0,321	0,537	0,794
JJA	r	0,857	0,954	0,849	0,912	0,313	0,402	0,312	0,219	0,097	0,348	0,019	0,058	0,190	0,223	0,245	0,666
	$\alpha$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,067	0,017	0,068	0,206	0,579	0,040	0,915	0,739	0,274	0,197	0,156	0,000
SON	r	0,907	0,956	0,843	0,907	0,606	0,323	0,530	0,594	0,029	0,146	0,063	0,542	0,092	0,018	0,116	0,158
	$\alpha$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,059	0,001	0,000	0,869	0,403	0,719	0,001	0,598	0,918	0,508	0,365

**Tabla A10.** Correlación (r) y significancia ( $\alpha$ ) entre los índices de los grupos regionales de estaciones terrestres (EST) y productos satelitales (CHIRPS y MSWEP) a nivel AH y estacional, periodo 1982-2016.

		VECTOR LA PAZ				VECTOR NORTE				VECTOR NOROESTE				VECTOR SUR				VECTOR YUNGAS			
		CHIRPS	MSWEP	CHIRPS_G	MSWEP_G	CHIRPS	MSWEP	CHIRPS_G	MSWEP_G	CHIRPS	MSWEP	CHIRPS_G	MSWEP_G	CHIRPS	MSWEP	CHIRPS_G	MSWEP_G	CHIRPS	MSWEP	CHIRPS_G	MSWEP_G
AH	r	0,762	0,794	0,752	0,783	0,372	0,382	0,625	0,613	0,217	0,476	0,226	0,497	0,672	0,808	0,660	0,592	0,529	0,435	0,557	0,596
	$\alpha$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,028	0,024	0,000	0,000	0,241	0,007	0,221	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,009	0,001	0,000
DEF	r	0,725	0,873	0,719	0,867	0,578	0,427	0,636	0,755	0,183	0,526	0,360	0,555	0,507	0,766	0,564	0,621	0,420	0,473	0,324	0,426
	$\alpha$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	0,000	0,000	0,317	0,002	0,043	0,001	0,002	0,000	0,000	0,000	0,012	0,004	0,058	0,011
MAM	r	0,823	0,860	0,867	0,908	0,591	0,433	0,640	0,629	0,610	0,747	0,636	0,462	0,572	0,592	0,632	0,552	0,655	0,683	0,614	0,700
	$\alpha$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,008	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
JJA	r	0,870	0,869	0,777	0,848	0,486	0,681	0,526	0,694	0,762	0,870	0,789	0,819	0,568	0,755	0,588	0,527	0,586	0,771	0,608	0,576
	$\alpha$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
SON	r	0,878	0,877	0,881	0,892	0,432	0,522	0,341	0,644	0,630	0,708	0,468	0,500	0,428	0,654	0,497	0,428	0,715	0,655	0,658	0,701
	$\alpha$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	0,001	0,045	0,000	0,000	0,000	0,006	0,003	0,010	0,000	0,002	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000