

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS



**“PRONÓSTICO DE LARGO PLAZO DE EVENTOS “EL NIÑO”
USANDO LA DETECCIÓN DE COOPERATIVIDAD EN HUMEDAD
RELATIVA Y AGUA PRECIPITABLE”**

Presentada por:

JORGE AUGUSTO CALLEJA RONDINEL

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO METEORÓLOGO

Lima – Perú












2023

**La UNALM es la titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art. 24. Reglamento de Propiedad Intelectual)**

Document Information

Analyzed document	Tesis - Jorge A. Calleja Rondinel.pdf (D164909754)
Submitted	4/24/2023 3:51:00 PM
Submitted by	EUSEBIO IDELMO CISNEROS TARMEÑO
Submitter email	ecisneros@lamolina.edu.pe
Similarity	2%
Analysis address	ecisneros.unalm@analysis.arkund.com

Sources included in the report

SA	Universidad Nacional Agraria La Molina / tesis-GOMEZ-TUNQUE_230922.pdf Document tesis-GOMEZ-TUNQUE_230922.pdf (D144724455) Submitted by: eingol@lamolina.edu.pe Receiver: eingol.unalm@analysis.arkund.com	 3
SA	Universidad Nacional Agraria La Molina / tesis-GOMEZ-TUNQUE-kennedy_rev_18Junio2022.pdf Document tesis-GOMEZ-TUNQUE-kennedy_rev_18Junio2022.pdf (D140701598) Submitted by: eingol@lamolina.edu.pe Receiver: eingol.unalm@analysis.arkund.com	 5
SA	RUIZ_JIMENEZ_BARTOLOME_Erasmus_201606.pdf Document RUIZ_JIMENEZ__BARTOLOME__Erasmus_201606.pdf (D47501905)	 1
SA	355-Texto del artículo-1233-1-2-20180917 (3).docx Document 355-Texto del articulo-1233-1-2-20180917 (3).docx (D44339550)	 4
SA	TESIS180112.docx Document TESIS180112.docx (D34720649)	 1
W	URL: https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-variability-oceanic-ni%C3%... Fetched: 4/24/2023 4:08:00 PM	 1
SA	anteproyecto Marjori Morejon.docx Document anteproyecto Marjori Morejon.docx (D54168186)	 1
SA	Universidad Nacional Agraria La Molina / Tesis_final_Daniel_Paredes_Orihuela.docx Document Tesis_final_Daniel_Paredes_Orihuela.docx (D153654171) Submitted by: emenacho@lamolina.edu.pe Receiver: emenacho.unalm@analysis.arkund.com	 4
SA	TESIS_ALDOMONTECINOS.pdf Document TESIS_ALDOMONTECINOS.pdf (D79525149)	 1
SA	Universidad Nacional Agraria La Molina / Ondas Kelvin oceánicas.pdf Document Ondas Kelvin oceánicas.pdf (D142716584) Submitted by: 20150338@lamolina.edu.pe Receiver: mcastillo.unalm@analysis.arkund.com	 1
SA	Rodriguez_Antonio_Tesis_Maestría_ESPOL_18abril17.docx Document Rodriguez_Antonio_Tesis_Maestría_ESPOL_18abril17.docx (D27828934)	 2

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“PRONÓSTICO DE LARGO PLAZO DE EVENTOS “EL NIÑO”
USANDO LA DETECCIÓN DE COOPERATIVIDAD EN HUMEDAD
RELATIVA Y AGUA PRECIPITABLE”**

Presentada por:

JORGE AUGUSTO CALLEJA RONDINEL

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO METEORÓLOGO

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

Dr. Ernesto Ever Menacho Casimiro
PRESIDENTE

Ing. Franklin Delio Unsihuay Tovar
MIEMBRO

Mg. Sc. Victoria Doris Calle Montes
MIEMBRO

Mg. Sc. Eusebio Cisneros Tarmeño
ASESOR

Lic. Carlos Quispe Ccalluari
CO-ASESOR

DEDICATORIA

A mi familia, especialmente a mis padres Jorge Luis Calleja y Elena Rondinel, a mis hermanos Vanessa y Aaron que son el motor y mi mayor motivación para seguir adelante.

También dedico la presente tesis a mi tía querida Lorenza y mi abuela Graciela (Q.E.P.D.), quienes siempre se preocuparon por mi persona y me brindaron los mejores consejos en vida.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial al Lic. Carlos Quispe Ccalluari, por impulsar sobre el tema de investigación en referente al pronóstico a largo plazo del ENSO, sus conocimientos brindados, también por el apoyo con los ordenadores en las instalaciones del Laboratorio de Modelado Oceanográfico, Ecosistémico y del Cambio Climático (LMOECC) del Instituto del Mar del Perú (IMARPE).

Muchas gracias al Mg. Sc. Eusebio Cisneros Tarmeño por la asesoría brindada y el compromiso que tuvo durante el desarrollo de la tesis.

Gracias a los docentes meteorólogos por la formación académica durante mi etapa universitaria.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	xii
ABSTRACT	xiii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISION DE LITERATURA	3
2.1. CIRCULACIÓN DE WALKER.....	3
2.2. TEORÍAS ENSO	4
2.2.1. Retroalimentación de Bjerknes.....	4
2.2.2. Teoría del oscilador retardado	5
2.2.3. Teoría de recarga-descarga.....	6
2.2.4. Teoría del oscilador del Pacífico Occidental.....	7
2.2.5. Teoría del oscilador advectivo – reflectivo	8
2.2.6. El oscilador unificado	9
2.3. ÍNDICES “EL NIÑO”.....	10
2.3.1. Índice de oscilación del sur (soi)	10
2.3.2. Índice Oceánico Niño (ONI)	11
2.3.3. Índice Costero El Niño (ICEN)	13
2.3.4. Índice Térmico Costero Peruano (ITCP)	14
2.3.5. Otros índices	14
2.4. TIPOS EL NIÑO	14
2.4.1. Niño Canónico	14
2.4.2. Niño Modoki	15
2.4.3. Niño Costero.....	17
2.5. VARIABLES METEOROLÓGICAS DE ESTUDIO	17
2.5.1. Humedad relativa.....	17
2.5.2. Agua precipitable	18
2.6. TELECONEXIONES	19
2.6.1. Definición	19

2.6.2. Métodos que se emplean en las teleconexiones	20
2.6.3. Impactos climáticos de las teleconexiones enso en el mundo	21
2.7. PATRONES METEOROLÓGICOS-OCEÁNICOS ASOCIADOS AL ENSO	24
2.7.1. Fuentes de variabilidad intraestacional	24
2.7.2. Patrones sinópticos asociados al ENSO	27
2.8. Efecto del cambio climático	28
2.9. PRONÓSTICO NUMÉRICO.....	29
2.9.1. El sistema de pronóstico.....	29
2.9.2. Pronóstico ENSO.....	32
2.9.3. Validación estadística de los pronósticos.....	33
2.10. SERIES DE TIEMPO.....	37
2.10.1. Definición	37
2.10.2. Componentes de la serie de tiempo.....	37
2.10.3. Dominio del tiempo y dominio de frecuencia.....	37
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	39
3.1. Área de estudio	39
3.2. DATOS.....	40
3.3. MATERIALES REQUERIDOS EN LA INVESTIGACIÓN.....	42
3.4. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO	42
3.4.1. Metodología para el análisis del comportamiento temporal de las variables meteorológicas de estudio	42
3.4.2. Metodología para el pronóstico según la obtención de la fuerza enlace deseada a través de la implementación del algoritmo de detección cooperativa.....	44
3.4.3. Metodología para la validación del pronóstico a largo plazo	48
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
4.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS VARIABLES ATMOSFÉRICAS DE ESTUDIO PARA	

DETERMINAR LA ESTACIONARIEDAD	51
4.1.1. Análisis exploratorio de las variables meteorológicas de estudio	51
4.1.2. Prueba de estacionariedad de las variables meteorológicas de estudio	63
4.2. RESULTADOS DEL PRONÓSTICO SEGÚN LA OBTENCIÓN DE LAS FUERZAS ENLACES DESEADAS DE LAS CORRELACIONES CRUZADAS DE LAS ANOMALÍAS DIARIAS DE LAS VARIABLES ATMOSFÉRICAS DE ESTUDIO ENTRE NODOS UBICADOS EN LA REGIÓN DE “EL NIÑO” Y EXTERIORES, PERO PERTENCIENTES AL OCÉANO PACÍFICO TROPICAL	75
4.2.1. Resultados de las fuerzas enlaces deseadas de las anomalías de las variables meteorológicas de estudio	75
4.2.2. Determinación del umbral de pronóstico del evento ENSO “EL NIÑO”	76
4.2.3. Resultados del pronóstico del evento ENSO “EL NIÑO”	86
4.3. RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DEL PRONÓSTICO A LARGO PLAZO DE LA FUERZA ENLACE DESEADA	133
V. CONCLUSIONES	143
VI. RECOMENDACIONES	144
VII. BIBLIOGRAFÍA	145
VIII. ANEXOS	155

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores del ICEN mediante categorías ante los eventos ENSO	13
Tabla 2: Representación de la tabla de contingencia 2 x2	36
Tabla 3: Tabla de contingencia 2x2 del pronóstico a largo plazo	49
Tabla 4: Prueba de ADF para la determinación de estacionariedad de la variable de humedad relativa.....	65
Tabla 5: Prueba de ADF para la determinación de estacionariedad de la variable de agua precipitable	70
Tabla 6: Valores de tasas de acierto y falsas alarmas según la calibración del umbral de pronóstico de la variable humedad relativa	80
Tabla 7: Valores de tasas de acierto y falsas alarmas según la calibración del umbral de pronóstico de la variable agua precipitable.....	83
Tabla 8: Validación de los pronósticos ENSO “El Niño” de categoría "a" del periodo de estudio en humedad relativa y agua precipitable.....	135
Tabla 9: Validación de los pronósticos ENSO “El Niño” de categoría "d" del periodo de estudio en humedad relativa y agua precipitable.....	136
Tabla 10: Validación de los pronósticos ENSO “El Niño” de categoría "b" del periodo de estudio en humedad relativa y agua precipitable.....	140
Tabla 11: Validación de los pronósticos ENSO “El Niño” de categoría "c" del periodo de estudio en humedad relativa y agua precipitable.....	142

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de circulación de Walker	3
Figura 2. Diagrama esquemático de la teoría de oscilador retardado	6
Figura 3. Esquema del proceso de la teoría del oscilador recarga-descarga.	7
Figura 4. Modelo esquemático de la teoría del oscilador del Pacífico.	8
Figura 5. Diagrama esquemático de la teoría del oscilador advectivo-reflectivo.	9
Figura 6. Esquema del oscilador unificado	10
Figura 7. Serie histórica del Índice de Oscilación del Sur (SOI)	11
Figura 8. Serie histórica del Índice Oceánico Niño (ONI) 1950-2020.....	12
Figura 9. Serie histórica del Índice Costero El Niño (ICEN).....	13
Figura 10. El Niño Canónico.....	15
Figura 11. El Niño Modoki	16
Figura 12. Representación de los nodos ubicados en el globo terráqueo a diferentes escalas temporales y espaciales	19
Figura 13. Distribución geográfica y estacional de las anomalías de precipitación a gran escala asociadas a un evento ENSO El Niño	23
Figura 14. Modelo tridimensional de la MJO. Las flechas indican los flujos del viento, “A” significa centros de alta presión y “C” de baja presión.....	25
Figura 15. Compuesto de anomalías de altura en 200hPa (isóbaras), viento (vectores) y precipitación (tonos)	26
Figura 16. Procedimiento para el pronóstico del tiempo	29
Figura 17. Representación del Sistema Global de Observación a nivel mundial.....	30
Figura 18. Proceso de asimilación de datos para la variable de viento.....	31
Figura 19. Representación del modelo tridimensional de la atmósfera por los modelos numéricos	32
Figura 20. Esquema del dominio del tiempo y dominio de frecuencia en una serie de tiempo	38

Figura 21. Ubicación de los puntos en el área de estudio del Pacífico central y oriental. Los nodos i correspondientes a la región Niño están señalados con color rojo, mientras que los nodos j que se ubican fuera de la cuenca Niño están señalados con puntos de color azul. Estos sirvieron para el análisis de la correlación cruzada en las teleconexiones emergentes	40
Figura 22. Esquema tridimensional del arreglo de los datos de las variables de estudio, donde el eje x está representado por las longitudes, el eje Y por las latitudes y el eje Z por el tiempo	41
Figura 23. Representación gráfica del diagrama de cajas o bigotes	43
Figura 24. Representación gráfica del pronóstico ideal luego de la determinación del umbral (θ).....	48
Figura 25. Flujograma del procedimiento metodológico para el pronósticode largo plazo de eventos "El Niño"	50
Figura 26. Diagrama de cajas de humedad relativa (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 30°N)	53
Figura 27. Diagrama de cajas de humedad relativa (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 22.5°N)	53
Figura 28. Diagrama de cajas de humedad relativa (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 15°N)	54
Figura 29. Diagrama de cajas de humedad relativa (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 7.5°N)	54
Figura 30. Diagrama de cajas de humedad relativa (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 0°N)	55
Figura 31. Diagrama de cajas de humedad relativa (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 7.5°S).....	55
Figura 32. Diagrama de cajas de humedad relativa (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 15°S).....	56
Figura 33. Diagrama de cajas de humedad relativa (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 22.5°S).....	56

Figura 34. Diagrama de cajas de humedad relativa (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 30°S).....	57
Figura 35. Diagrama de cajas de agua precipitable (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 30°N)	59
Figura 36. Diagrama de cajas de agua precipitable (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 22.5°N).....	59
Figura 37. Diagrama de cajas de agua precipitable (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 15°N)	60
Figura 38. Diagrama de cajas de agua precipitable (Lon.:120°E – 75°W - Lat.:7.5°N)	60
Figura 39. Diagrama de cajas de agua precipitable (Lon.:120°E – 75°W - Lat.: 0°N)	61
Figura 40. Diagrama de cajas de agua precipitable (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 7.5°S).....	61
Figura 41. Diagrama de cajas de agua precipitable (Lon.:120°E – 75°W - Lat.:15°S)	62
Figura 42. Diagrama de cajas de agua precipitable (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 22.5°S).....	62
Figura 43. Diagrama de cajas de agua precipitable (Lon: 120°E – 75°W - Lat.:30°S)	63
Figura 44. Fuerzas enlaces deseadas de humedad relativa (1952-2019)	76
Figura 45. Fuerzas enlaces deseadas de agua precipitable (1952 - 2019).....	76
Figura 46. Diagrama de cajas de la determinación del umbral de pronóstico de las fuerzas enlaces deseadas de la variable humedad relativa.....	79
Figura 47. Dispersión de las tasas de acierto y falsa alarma según el umbral de pronóstico escogido de la variable humedad relativa	81
Figura 48. Diagrama de cajas de la determinación del umbral de pronóstico de las fuerzas enlaces deseadas de la variable agua precipitable	82
Figura 49. Dispersión de las tasas de acierto y falsa alarma según el umbral de pronóstico escogido de la variable agua precipitable	86
Figura 50. Serie temporal de las fuerzas enlaces deseadas de humedad relativa (color rojo) e índice Niño 3.4 (sombreado de color azul) con el umbral (línea negra horizontal) para el periodo de prueba (1953-1980)	97

Figura 51. Serie temporal de las fuerzas enlaces deseadas de humedad relativa (color rojo) e índice Niño 3.4 (sombreado de color azul) con el umbral (línea negra horizontal) para el periodo de validación de pronóstico (1981-2020).....	97
Figura 52. Serie temporal de las fuerzas enlaces deseadas de agua precipitable (color rojo) e índice Niño 3.4 (sombreado de color azul) con el umbral (línea negra horizontal) para el periodo de prueba (1953-1980)	98
Figura 53. Serie temporal de las fuerzas enlaces deseadas de agua precipitable (color rojo) e índice Niño 3.4 (sombreado de color azul) con el umbral (línea negra horizontal) para el periodo de validación de pronóstico (1981-2020).....	98
Figura 54. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1953	99
Figura 55. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1954	99
Figura 56. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1955	100
Figura 57. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1956	100
Figura 58. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1957	101
Figura 59. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1958	101
Figura 60. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1959	102
Figura 61. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1960	102
Figura 62. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1961	103
Figura 63. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1962	103
Figura 64. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1963	104
Figura 65. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1964	104
Figura 66. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1965	105
Figura 67. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1966	105
Figura 68. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1967	106
Figura 69. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1968	106
Figura 70. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1969	107
Figura 71. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1970	107
Figura 72. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1971	108

Figura 73. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1972	108
Figura 74. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1973	109
Figura 75. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1974	109
Figura 76. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1975	110
Figura 77. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1976	110
Figura 78. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1977	111
Figura 79. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 197	111
Figura 80. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1979	112
Figura 81. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1980	112
Figura 82. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1981	113
Figura 83. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1982	113
Figura 84. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1983	114
Figura 85. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1984	114
Figura 86. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1985	115
Figura 87. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1986	115
Figura 88. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1987	116
Figura 89. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1988	116
Figura 90. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1989	117
Figura 91. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1990	117
Figura 92. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1991	118
Figura 93. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1992	118
Figura 94. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1993	119
Figura 95. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1994	119
Figura 96. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1995	120
Figura 97. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1996	120
Figura 98. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1997	121
Figura 99. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1998	121
Figura 100. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1999 ...	122
Figura 101. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2000 ...	122
Figura 102. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2001 ...	123

Figura 103. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 200123
Figura 104. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2003	...124
Figura 105. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2004	...124
Figura 106. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2005	...125
Figura 107. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2006	...125
Figura 108. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2007	...126
Figura 109. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2008	...126
Figura 110. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2009	...127
Figura 111. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2010	...127
Figura 112. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2011	...128
Figura 113. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2012	...128
Figura 114. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2013	...129
Figura 115. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2014	...129
Figura 116. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2015	...130
Figura 117. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2016	...130
Figura 118. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2017	...131
Figura 119. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2018	...131
Figura 120. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2019	...132
Figura 121. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2020	...132
Figura 122. Cuadro comparativo de tablas de contingencia en humedad relativa y agua precipitable del pronóstico ENSO "El Niño"	134

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Script de procesamiento de datos	156
Anexo 2 Script del área de estudio	157
Anexo 3 Script del análisis exploratorio de las variables meteorológicas de estudio	159
Anexo 4 Script del cálculo de las anomalías diarias de las variables meteorológicas de estudio.....	160
Anexo 5 Script del cálculo de las correlaciones cruzadas y fuerzas enlaces de las anomalías de las variables meteorológicas de estudio	161
Anexo 6 Script de la validación estadística del pronóstico ENSO "El Niño"	163

RESUMEN

El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) es uno de los fenómenos climáticos a gran escala que tiene influencia en distintas partes del mundo.

Este presente trabajo se dedica a pronosticar eventos ENSO “El Niño” a largo plazo como mínimo un año de antelación, para ello se usó las variables meteorológicas: agua precipitable y humedad relativa que fueron obtenidas del del modelo atmosférico Reanálisis NCEP/NCAR I con una resolución espacial de $7.5^\circ \times 7.5^\circ$ abarcando entre las latitudes 30°S – 30°N y las longitudes 120°E - 60°W y una resolución temporal de forma diaria desde el año 1950 al 2019.

Se analizó el comportamiento cooperativo de las variables meteorológicas en la cuenca del Océano Pacífico Tropical descrito por la evolución temporal de las teleconexiones, que a su vez son calculadas mediante la correlación cruzada por cada décimo día de las anomalías diarias de las variables meteorológicas. Por cada correlación atribuye la asociación entre dos series de tiempo con 365 datos anteriores para cada décimo día, el primero ubicado en la región de la cuenca de El Niño (14 nodos) entre las latitudes 5°S - 5°N y las longitudes 160°E - 90°W y el otro nodo, fuera de la cuenca El Niño (193 nodos).

Luego del cálculo de las correlaciones cruzadas, se halló la fuerza enlace que es el resultado del máximo menos el promedio de las correlaciones cruzadas, esto dividido entre la desviación estándar del valor absoluto de las correlaciones cruzadas de cada tiempo en consideración. A la vez se calculó el promedio de cada fuerza enlace individual durante el periodo de estudio.

Para el pronóstico de un evento El Niño, se determinó el umbral de aceptación de la fuerza enlace deseada, esta debe ser mayor que el índice Niño 3.4 ($+ 0.5^\circ\text{C}$ por al menos 5 meses) antes del inicio del año. La validación del pronóstico se hizo mediante la evaluación de medidas estadísticas tales como la tasa de acierto y falsa alarma, lo cual se obtuvieron como tasas en el periodo de estudio de 0.727 y 0.478 respectivamente tanto en humedad relativa como agua precipitable.

Palabras clave: El Niño, pronóstico, teleconexiones, correlación cruzada, cuenca El Niño, fuerza enlace, umbral, índice Niño 3.4, tasa de acierto, falsa alarma.

ABSTRACT

El Niño/Southern Oscillation (ENSO) is one of the large-scale weather phenomena that influences different parts of the world.

This present work is dedicated to forecasting ENSO events "El Niño" in the long term at least one year in advance, for which the meteorological variables were used: precipitable water and relative humidity that were obtained from the atmospheric model Reanalysis NCEP / NCAR I with a Spatial resolution of $7.5^\circ \times 7.5^\circ$ covering between latitudes $30^\circ\text{S} - 30^\circ\text{N}$ and longitudes $120^\circ\text{E}-60^\circ\text{W}$ and a temporal resolution on a daily basis from the year 1950 to 2019.

The cooperative behavior of the meteorological variables in the Tropical Pacific Ocean basin described by the temporal evolution of the teleconnections, which in turn are calculated by cross-correlation for every tenth day of the daily anomalies of the meteorological variables, was analyzed. For each correlation attributes the association between two time series with 365 previous data for each tenth day, the first located in the El Niño basin region (14 nodes) between latitudes $5^\circ\text{S}-5^\circ\text{N}$ and longitudes $160^\circ\text{E}-90^\circ\text{W}$ and the other node, outside the El Niño basin (193 nodes).

After calculating the cross-correlations, the link strength was found, which is the result of the maximum minus the average of the cross-correlations, divided by the standard deviation of the absolute value of the cross-correlations for each time under consideration. At the same time, the average of each individual link strength was calculated during the study period.

For the forecast of an El Niño event, the acceptance threshold of the desired link strength was determined, this must be greater than the Niño 3.4 index ($+ 0.5^\circ\text{C}$ for at least 5 months) before the beginning of the year. The validation of the forecast was made by evaluating statistical measures such as the hit rate and false alarm, which were obtained as rates in the study period of 0.727 and 0.478 respectively, both in relative humidity and precipitable water.

Keywords: El Niño, pronóstico, teleconexiones, correlación cruzada, cuenca El Niño, fuerza enlace, umbral, índice Niño 3.4, hit rate, falsa alarm

I. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, han existido por lo menos 120 episodios de eventos El Niño en los últimos cinco siglos según las investigaciones históricas recopiladas por Quinn W., Neal V., y Antúnez de Mayolo S. (1986, 1987; IMARPE, 1999; INDECI, 2002). Incluso El Niño como tal, es conocido desde las civilizaciones preincas como los Moche, los Lima y los Nazca se asentaron en las costas del Perú antiguo (SENAMHI, 2014).

Los dos episodios cálidos más importantes de los últimos años (1982-1983 y 1997-1998), han suscitado intensos estudios sobre sus respectivos impactos socioeconómicos (Maturana et al., 2004). Las características del evento 1997/98 trae consigo en el Perú, nuevos temas en la gestión de riesgos (Temple, 2002). De tal forma que los impactos que se generan por este evento interanual deben ser minimizados con anticipación a largo plazo.

Los eventos El Niño generan impactos a la población de carácter tanto negativo como positivo. Entre los impactos negativos, según el MINAM se mencionan la posibilidad de pérdida de terrenos agrícolas, destrucción de infraestructura productiva, colapso de vías de comunicación, muerte o migración de especies vegetales y animales, incremento de enfermedades como el cólera, malaria y conjuntivitis; mientras que los impactos positivos se recalca las mejores condiciones para el cultivo de arroz en la costa, disminución de la intensidad de las heladas en la sierra central y norte (Corcuera, 2016). Sin embargo, los impactos negativos son los que retrasan al desarrollo humano de las zonas que puede afectar dicho evento.

Esta investigación explora el uso de variables atmosféricas como la humedad relativa y el agua precipitable con el fin de pronosticar a largo plazo los eventos ENSO “El Niño” para que se tomen las medidas de prevención correctamente. Con ello se emplea un algoritmo de detección cooperativa en base a la dinámica de las fluctuaciones de las teleconexiones a través de correlaciones cruzadas de las anomalías diarias de las variables atmosféricas de estudio en el océano Pacífico Tropical.

El presente trabajo aporta a la ciencia de la investigación con innovadoras soluciones de predicción de eventos ENSO “El Niño”, de esta manera seguir con el estudio del evento para descubrir métodos innovadores que puedan ser aplicados a fin de tener resultados óptimos para la predicción que beneficien a las poblaciones que son más afectadas, como la costa norte de nuestro país, por ello se debe conocer fundamentalmente el mecanismo de la meteorología en la cuenca del Pacífico, en la cual interactúa continuamente la atmósfera con el océano.

Objetivo principal

- Pronosticar eventos “El Niño” Oscilación Sur (ENSO) a largo plazo en el océano Pacífico Tropical usando la detección cooperativa con humedad relativa y agua precipitable.

Objetivos específicos

- Analizar el comportamiento temporal de las variables atmosféricas de estudio (humedad relativa y agua precipitable) para determinar la estacionariedad de las variables mencionadas.
- Pronosticar a largo plazo según la obtención de la fuerza enlace deseada a través de la implementación de un algoritmo de detección cooperativa en base a la dinámica de las fluctuaciones de las teleconexiones mediante el cálculo de correlaciones cruzadas de las anomalías diarias de las variables de estudio entre nodos ubicados en la región de “El Niño” y exteriores pero pertenecientes al océano Pacífico Tropical
- Determinar la validación estadística del pronóstico a largo plazo de la fuerza enlace deseada con respecto a los años de los eventos “El Niño” tomando en cuenta el índice ONI.

II. REVISION DE LITERATURA

El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) es un fenómeno natural caracterizado por la fluctuación de las temperaturas del océano en la parte central y oriental del Pacífico ecuatorial, asociada a cambios en la atmósfera (OMM, 2014).

2.1. CIRCULACIÓN DE WALKER

El término “Circulación de Walker” fue propuesto en el año 1969 por el meteorólogo noruego Jacob Bjerknes como el resultado de la oscilación en las presiones superficiales entre el hemisferio oriental y occidental que se vinculan a través de una circulación atmosférica en el plano zonal (Ambrizzi et al., 2005).

La circulación de Walker puede ser definida como una circulación cíclica longitudinal que está estrechamente vinculado al gradiente de temperatura del mar (TSM) a lo largo del Océano Pacífico Ecuatorial (Veiga et al., 2013).

Esta circulación presenta vientos en niveles bajos que se desplazan desde el oeste hacia el este en medio del Océano Pacífico Central, movimientos ascendentes sobre el agua cálida en el Pacífico Occidental (ver Figura 1), flujos de aire en la tropósfera superior de oeste a este y movimientos descendentes sobre el agua fría en el Pacífico Occidental (Lau y Yang, 2003).

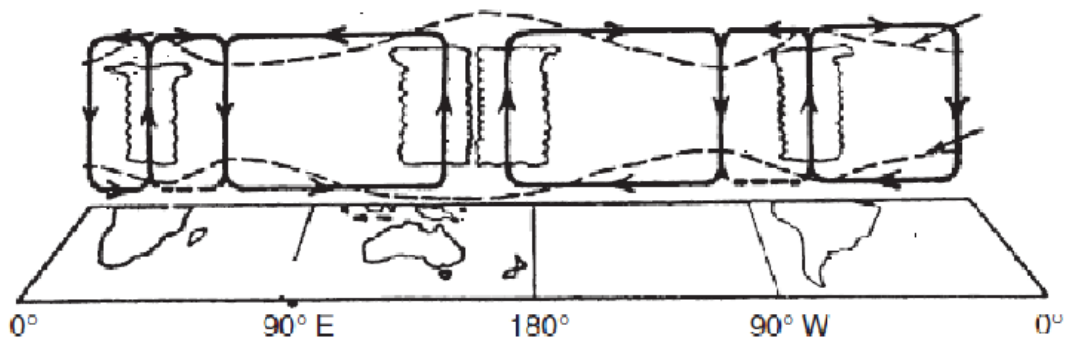


Figura 1. Esquema de circulación de Walker
FUENTE: Lau y Wang (2003)

Durante los meses de verano austral (diciembre, enero y febrero) el transporte de vapor de agua es principalmente hacia el oeste en los trópicos debido a los vientos alisios (Rao et al., 1998).

El impulso principal de la circulación de Walker son las variaciones longitudinales de calentamiento por condensación, este se equilibra por enfriamiento debido a la expansión adiabática del aire ascendente. En las regiones donde existe exceso de condensación es suministrado por la convergencia horizontal del flujo de humedad de sitios distantes con cantidades máximas de evaporación de la superficie (Cornejo y Stone, 1977).

Una alteración en la circulación de Walker se inicia por las anomalías positivas de TSM en el Pacífico Central y Oriental, estas establecen una fuente de calor sensible creando gradientes horizontales de presión, de este modo el aire que converge hacia la fuente de calor en niveles bajos se eleva debido a que es menos denso que el aire circundante, el vapor de agua en el aire se condensa a medida que se eleva liberando calor latente (Veiga et al., 2009).

La importancia de la circulación de Walker es el motor de intercambio de energía entre las regiones tropicales y las latitudes altas, también equilibra la energía atmosférica en la región ecuatorial y determina los climas en los trópicos (Lau y Yang, 2003).

2.2. TEORÍAS ENSO

Diferentes teorías han tratado de explicar la naturaleza y la variabilidad de los eventos ENSO, su inicio, desarrollo y los cambios de fases. En el año 1987 se propuso un modelo en el que explica la importancia de las anomalías de TSM, viento y corrientes oceánicas en el Pacífico Tropical determinado por el contenido de calor ecuatorial en el océano. Este modelo incluye retroalimentaciones océano-atmosfera en un sistema acoplado. (Zebiak y Cane, 1987).

2.2.1. Retroalimentación de Bjerknes

En el año 1969, Bjerknes observó una gran anomalía de TSM a lo largo del Océano Pacífico Central y Oriental que estuvo acompañado de una fuerza de tipo anómala de vientos del oeste de la región central del Pacífico nororiental (Bjerknes, 1969).

Producto de la observación se hipotetizó una “retroalimentación océano-atmósfera positiva” debilitando la circulación de Walker debido a la reducción de gradiente de TSM de este a

oeste, produciéndose la anomalía del viento del oeste en el Océano Pacífico Central Ecuatorial (Wang, 2001).

Esta retroalimentación océano-atmósfera explica la naturaleza de oscilación del ENSO y la relación entre el transporte de calor atmosférico y oceánico, ambos de carácter anómalo. Estas a su vez se compensan debido al déficit o el exceso de sus componentes debido a la conservación de energía, de esta manera una retroalimentación positiva está asociado a fases cálidas del ENSO (El Niño) y negativa en fases frías (La Niña) (Yang et al., 2016).

Teniendo en cuenta la naturaleza oscilatoria del ENSO, la retroalimentación positiva necesita de una retroalimentación negativa para convertir el sistema océano-atmósfera de fase cálida a fría. Es por ello que se propusieron cuatro teorías que explican el mecanismo del ENSO las cuales son: el oscilador retardado, el oscilador recarga-descarga, el oscilador del Pacífico Occidental y el oscilador advectivo-reflectivo. Además de un oscilador unificado que involucra las cuatro teorías mencionadas anteriormente (Wang, 2018).

2.2.2. Teoría del oscilador retardado

Esta teoría explica el fin de un evento cálido del ENSO y el inicio de un evento frío en donde se requiere que la amplitud de las ondas ecuatoriales Kelvin en el Océano Pacífico Occidental estén fuertemente relacionadas a las anomalías de tensión de viento zonal del Pacífico Central y Oriental debido a la reflexión de ondas Rossby incidentes (Mantua y Battisti, 1994).

El modelo de oscilador retardado tiene una retroalimentación tanto positiva como negativa, sin considerar las anomalías que puedan ocurrir en un evento ENSO en el Pacífico Occidental. La retroalimentación negativa está representada por las ondas Rossby que son generadas en el Pacífico Oriental la cual se propagan y son reflejadas en el Pacífico Occidental, de esta manera las ondas Kelvin revierten las anomalías oscilando en escala interanual (Wang,2001).

En la Figura 2, las áreas rojas representan las anomalías positivas de la TSM (condiciones de El Niño), mientras que las azules, anomalías negativas de la TSM (La Niña), las flechas verdes indican las anomalías de vientos. Las flechas K_{up} y K_{down} , son las ondas Kelvin ascendentes y descendentes respectivamente, mientras que las flechas R_{up} y R_{down} , son las ondas Rossby también ascendentes y descendentes respectivamente.

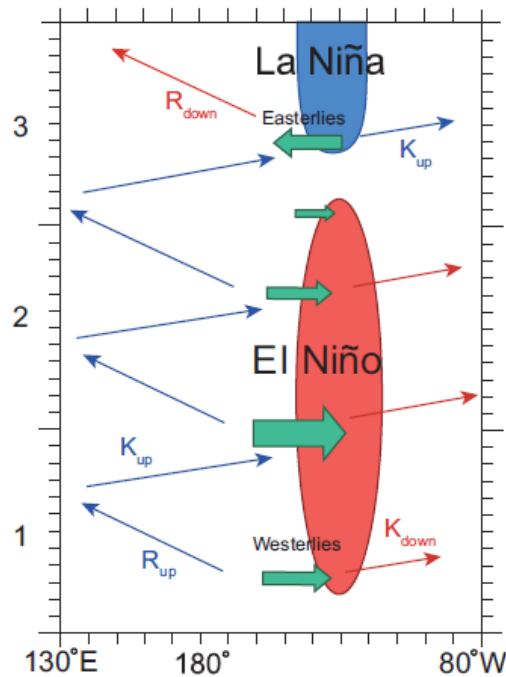


Figura 2. Diagrama esquemático de la teoría de oscilador retardado
FUENTE: Wang (2018)

2.2.3. Teoría de recarga-descarga

Una anomalía positiva de TSM induce vientos del oeste que fuerza sobre el Pacífico Central a Oriental provocando una retroalimentación positiva llevando a la fase madura de un evento El Niño. Al mismo tiempo se produce una divergencia oceánica determinado por el bombeo de Ekman y transportes geostroficados llamado transporte de Sverdrup, a su vez asociado con anomalías de vientos del oeste logrando hacer una descarga del contenido de calor ecuatorial (ver Figura 3-a). En la parte b de la Figura 3, se muestra el proceso de descarga reduce gradualmente la profundidad de la termoclina en el Pacífico Oriental, de esta manera conduce a una tendencia de enfriamiento la cual representa de una fase de transición. Debido a la descarga del contenido de calor ecuatorial, la profundidad de la termoclina del Pacífico Oriental es anormalmente superficial (ver Figura 3-c) lo cual permite bombear agua fría a la capa superficial a través de corrientes ascendentes iniciando así la fase de recarga. De este modo la anomalía de TSM se reduce a cero (ver Figura 3-d), el calor obtenido por el proceso de recarga incitará corrientes ascendentes de agua cálida evolucionado a la fase cálida. El proceso de recarga-descarga se controla según el fortalecimiento o debilitamientos de vientos alisios a través de un ajuste dinámico del océano (Jin,1997).

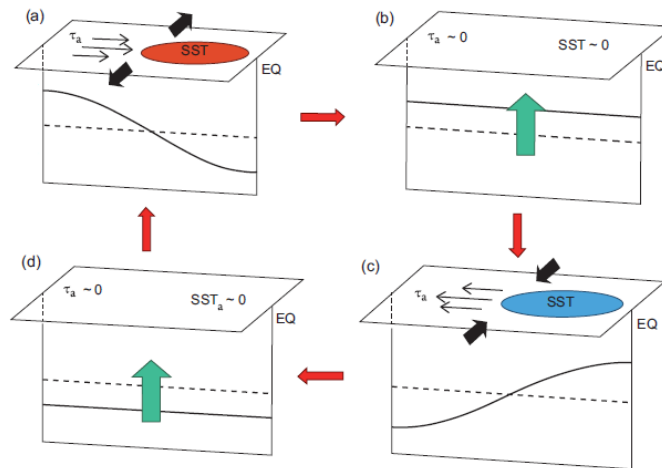


Figura 3. Esquema del proceso de la teoría del oscilador recarga-descarga.
FUENTE: Wang (2018)

Donde (a) la fase cálida (b) la transición de fase cálida a fría (c) la fase fría (d) la transición de fase fría a cálida. La TSM roja (azul) representa anomalías de TSM cálidas (frías) y las flechas negras finas representan anomalías del viento. Las líneas discontinuas representan la base de las anomalías de profundidad de termoclina y las líneas negras son las anomalías de profundidad de termoclina. Las flechas negras sombreadas significan la divergencia y la convergencia del transporte de Sverdrup. Las flechas verdes representan el afloramiento.

2.2.4. Teoría del oscilador del Pacífico Occidental

Este mecanismo se basa en el calentamiento por condensación en la región del Pacífico Central Ecuatorial que produce un par de ciclones fuera del Ecuador provocando una anomalía del viento ecuatorial del oeste. La termoclina y la TSM en el Pacífico Central y Oriental aumentan debido a los vientos anómalos del oeste, específicamente de la región Niño 4 (5°N - 5°S , 160°E - 150°W) hacia la región Niño 3 (5°N - 5°S , 150°W - 90°W) generando una retroalimentación océano-atmósfera positiva. Por otro lado, los dos ciclones fuera del Ecuador elevan la termoclina mediante el bombeo de Ekman expandiendo sobre el Pacífico Occidental provocando una TSM y aumento de presión a nivel del mar en la región Niño 6, de este modo se genera vientos del este sobre el Pacífico Occidental que propicia enfriamiento en la parte oriental provocando una retroalimentación negativa (Weisberg y Wang, 1997).

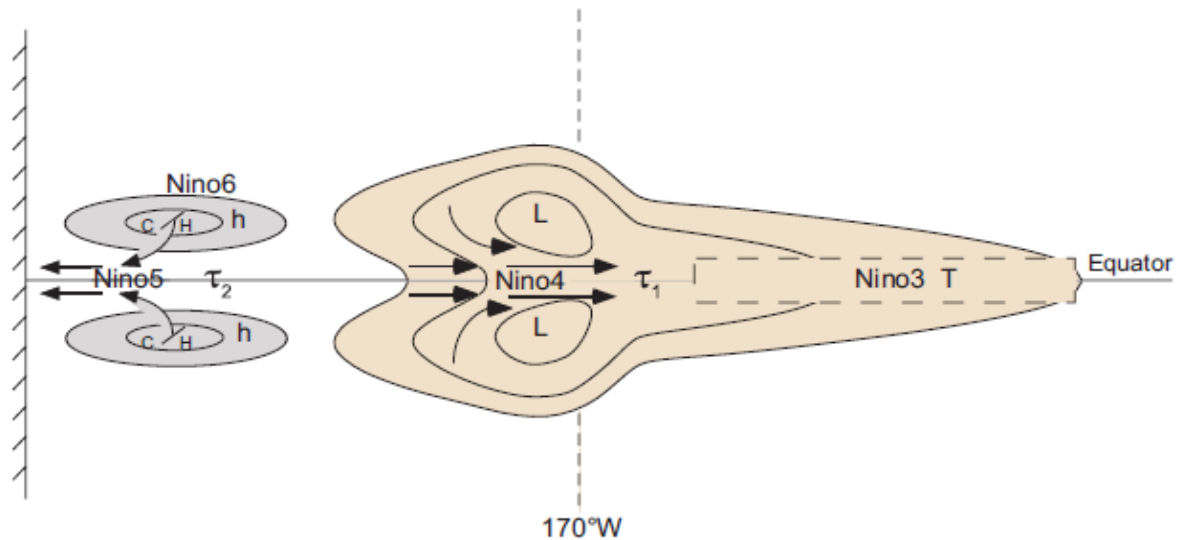


Figura 4. Modelo esquemático de la teoría del oscilador del Pacífico.
FUENTE: Wang (2018)

Las letras L, C y H representan presión superficial bajo, TSM frío y presión superficial alto, respectivamente. τ_1 y τ_2 representan anomalías zonales de la tensión del viento en las regiones Niño 4 y Niño 5, respectivamente. T es la anomalía de la TSM en la región de Niño 3 y h es la anomalía de profundidad de la termoclina en la región de Niño 6.

2.2.5. Teoría del oscilador advectivo – reflectivo

Este modelo explica la retroalimentación océano-atmósfera positiva se debe a la advección de la piscina cálida en la región del Pacífico Occidental a la parte oriental mediante corrientes oceánicas zonales que obligan a la propagación de las ondas Kelvin hacia el este, este tipo de advección zonal es más efectiva que la vertical para lograr una configuración del sistema ENSO acoplado. Para que la oscilación del modelo se necesita de una retroalimentación negativa que está determinado por las corrientes zonales anómalas asociados con la reflexión de ondas en el límite occidental y oriental del océano y corrientes zonales climatológicas (Picaut et al., 1997).

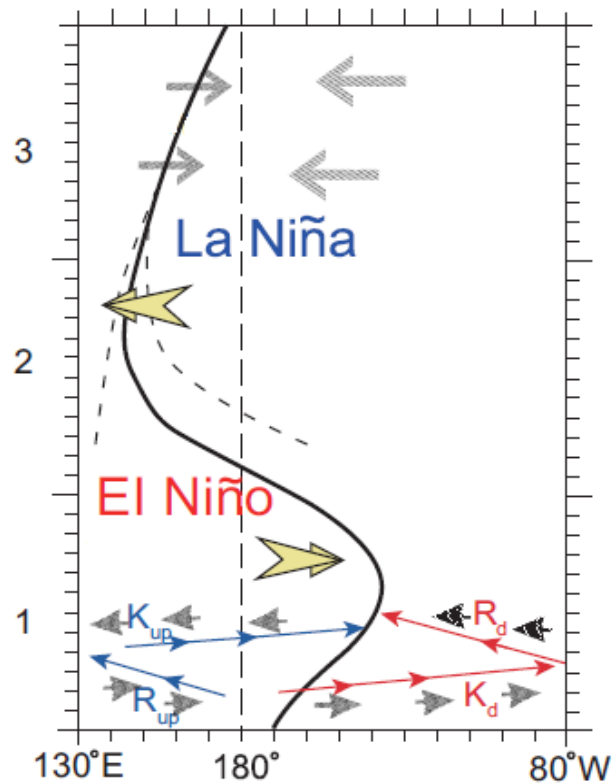


Figura 5. Diagrama esquemático de la teoría del oscilador advectivo-reflectivo.
FUENTE: Wang (2018)

Las flechas amarillas representan las anomalías zonales del viento y las flechas grises son las corrientes oceánicas. La línea negra sólida indica el borde oriental de la piscina cálida del Pacífico occidental. K_d y K_{up} representan las ondas Kelvin descendentes y ascendentes que se propagan hacia el este. Mientras que las letras R_{up} y R_d representan ondas de Rossby ascendentes y descendentes que se propagan hacia el oeste.

2.2.6. El oscilador unificado

Este modelo unificado agrupa las cuatro teorías explicadas anteriormente de carácter interanual, la cual considera anomalías de TSM en la región Niño 3 (región sombreada de color rojo en la Figura 6), anomalías de tensión de viento zonal (τ_1 y τ_2) que se encuentran en la región Niño 4 y Niño 5 y las anomalías de profundidad de la termoclina (h) en la región del Niño 6 (Wang, 2001).

Las anomalías de las termoclinas fuera del Ecuador en el Pacífico Occidental están asociadas con las anomalías de la tensión del viento zonal en el Pacífico Central Ecuatorial, estas a su vez están controladas por las anomalías de TSM del Pacífico Oriental. Las anomalías del viento zonal en el Pacífico Occidental están controladas por las anomalías de la termoclina fuera del Ecuador en el Pacífico Occidental (Wang, 2018).

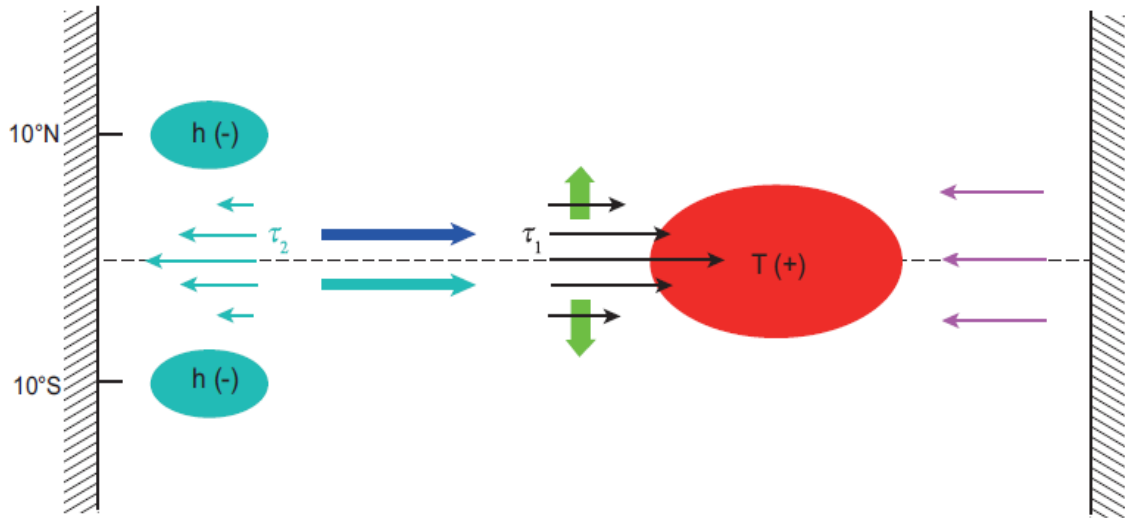


Figura 6. Esquema del oscilador unificado
FUENTE: Wang (2018)

2.3. ÍNDICES “EL NIÑO”

A lo largo de la historia diferentes investigadores propusieron evaluar el estado del ENSO mediante una forma más reducida y a una escala numérica estableciéndose un índice para la descripción del fenómeno (Barnston,2015).

2.3.1. Índice de oscilación del sur (soi)

El índice de Oscilación Sur (SOI) es una medida que involucra las presiones a nivel del mar en una combinación de algunas estaciones situadas principalmente cerca de los centros de acción de la Oscilación del Sur, en este caso se toma en cuenta las presiones mensuales de la estación Tahití y Darwin debido que es la más eficaz al contabilizar la variación porcentual (Trenberth,1984).

La metodología que establece la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) para el cálculo de este índice es la siguiente:

$$SOI = \frac{Tahití_e - Darwin_e}{\sqrt{\frac{\sum (Tahití_e - Darwin_e)^2}{N}}} \quad \text{Ec. 1}$$

$$Tahití_e = \frac{Tahití_{Presión\ actual} - Tahití_{Presión\ climatológico}}{\sqrt{\frac{\sum (Tahití_{Presión\ actual} - Tahití_{Presión\ climatológico})^2}{N}}} \quad \text{Ec.2;}$$

$$\text{Darwin}_e = \frac{\text{Darwin}_{\text{Presión actual}} - \text{Darwin}_{\text{Presión climatológico}}}{\sqrt{\frac{\sum(\text{Darwin}_{\text{Presión actual}} - \text{Darwin}_{\text{Presión climatológico}})^2}{N}}} \quad \text{Ec.3;}$$

Donde las anomalías mensuales de presión a nivel del mar de Tahití y Darwin son normalizadas por separado (Tahití_e y Darwin_e) por la media de la desviación estándar de 12 meses. (Ropelewski y Jones, 1987).

- $\text{Tahití}_{\text{Presión actual}}$ y $\text{Darwin}_{\text{Presión actual}}$ son las presiones a nivel del mar observadas de cada mes en cada estación correspondiente.
- $\text{Tahití}_{\text{Presión climatológico}}$ y $\text{Darwin}_{\text{Presión climatológico}}$ son las presiones a nivel del mar promediadas en un periodo base establecido (1981-2010)
- N: número de meses

Los periodos prolongados de valores negativos de SOI coinciden con aguas del océano anormalmente cálidas en el Pacífico tropical oriental, tal como se muestra en la Figura 7, típicas de un evento “El Niño”.

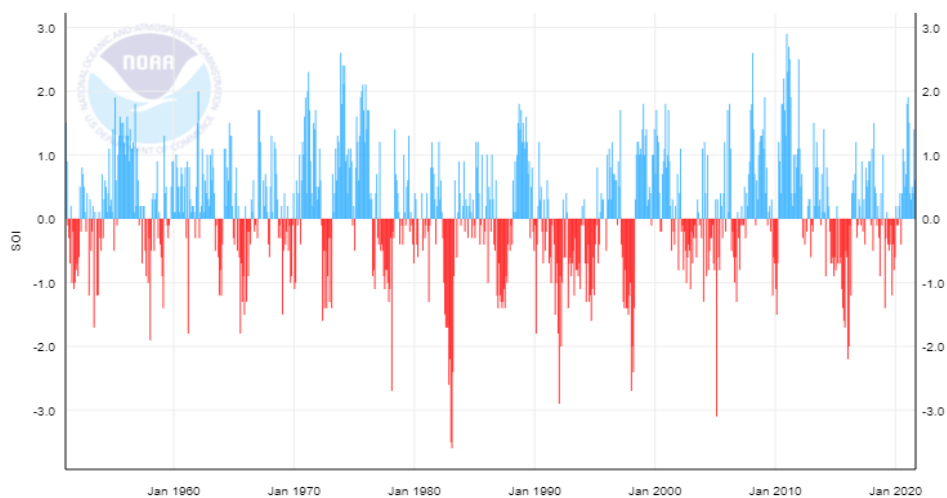


Figura 7. Serie histórica del Índice de Oscilación del Sur (SOI)
FUENTE: NOAA.

2.3.2. Índice Oceánico Niño (ONI)

Según la NOAA el índice ONI es la principal medida que se usa para monitorear los eventos “El Niño” y “La Niña”.

Para determinar el cálculo del índice ONI se toma en cuenta una serie de observaciones mediante un conjunto de datos reconstruidos y extendidos de TSM (ERSST), para lo cual se

calcula el promedio mensual de TSM en la región Niño 3.4 (5°N - 5°S , 120° - 170°W), este dato mensual se promedia nuevamente con respecto al meses anteriores considerando 3 meses en ejecución. Este nuevo promedio se compara diferenciando con una climatología establecida de la región Niño 3.4 (promedio de 30 años) obteniendo así una anomalía que es el índice ONI. (Dahlman, 2009).

La climatología base se actualiza cada 5 años sin alterar el registro histórico de los eventos “El Niño” y “La Niña”, de este modo para la determinación de estos eventos se definen como un mínimo de 5 periodos consecutivos de los 3 meses superpuestos de índices ONI tomados con anterioridad, si los valores son mayores a 0.5°C entonces se considera que están presentes las condiciones “El Niño”, en caso de ser menores a -0.5°C será catalogada como eventos “La Niña”, sin embargo si se mantiene entre los umbrales establecidos indica que las condiciones son neutras (NOOA,2009). La variación temporal de los índices se muestra en la Figura 8, donde las coloraciones rojizas corresponden a los valores positivos y las azuladas, a los negativos.

Este índice es de importancia para los pronósticos de eventos ENSO debido a la persistencia de sus valores durante el otoño y el invierno del hemisferio norte, lo cual hace predecir con facilidad; sin embargo, dicha persistencia se debilita durante la primera boreal denominándola “la barrera de persistencia de primavera” (Clarke, 2008).

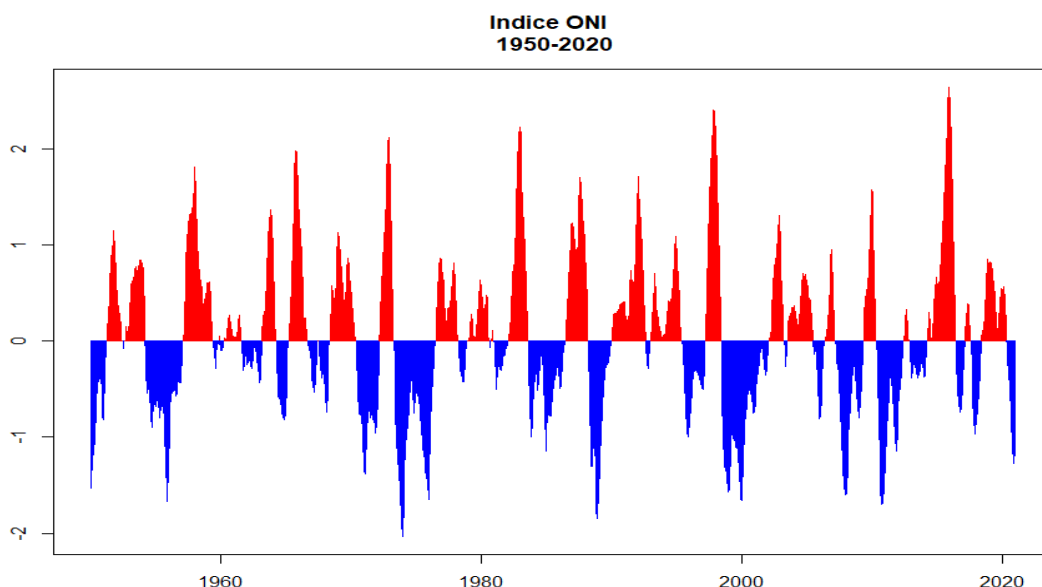


Figura 8. Serie histórica del Índice Oceanico Niño (ONI) 1950-2020
FUENTE: NOAA, adaptación propia.

2.3.3. Índice Costero El Niño (ICEN)

Según el Comité Técnico del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño, este índice consiste en la media móvil de tres meses de anomalías mensuales de TSM en la región Niño 1.2 (10°S-0°,90°-80°W). Los datos son obtenidos por el producto ERSST de la NOAA y las anomalías son calculadas con respecto a la climatología base (1981-2010). (EFEN,2012).

Este índice es de vital importancia para la región costera de Sudamérica para poder determinar la presencia y las magnitudes de los eventos “El Niño” y “La Niña” (Takahashi et al., 2014).

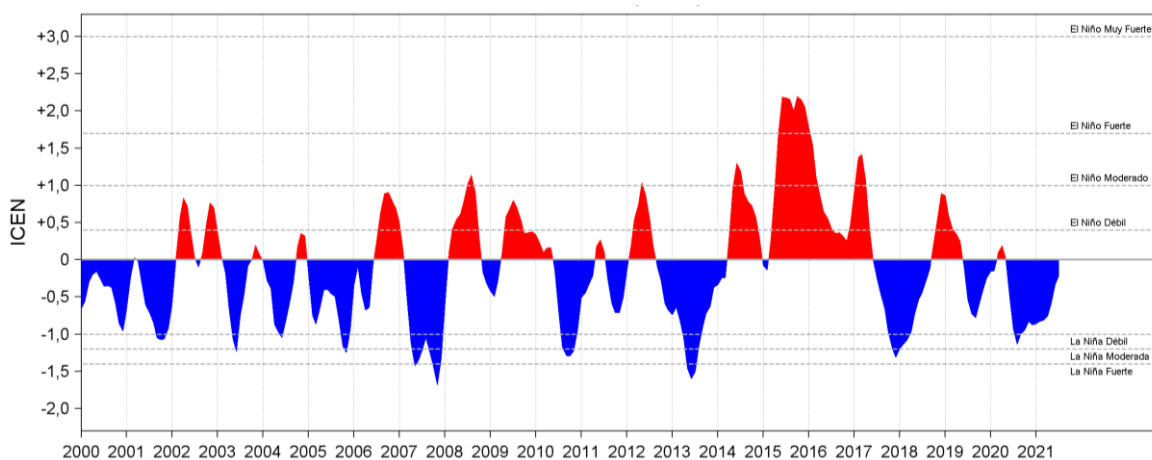


Figura 9. Serie histórica del Índice Costero El Niño (ICEN)

FUENTE: EFEN (2012), Takahashi et al. (2014), adaptado por IMARPE (2021)

Tabla 1: Valores del ICEN mediante categorías ante los eventos ENSO

Condición	Categoría	Valor mensual del ICEN
La Niña	Fuerte	Menor que -1.4
	Moderada	Mayor o igual que -1.4 y menor que -1.2
	Débil	Mayor o igual que -1.2 y menor que -1.0
Neutro		Mayor o igual que -1.0 y menor o igual que 0.4
El Niño	Débil	Mayor que 0.4 y menor o igual que 1.0
	Moderada	Mayor que 1.0 y menor o igual que 1.7
	Fuerte	Mayor que 1.7 y menor o igual que 3.0
	Extraordinaria	Mayor que 3.0

FUENTE: EFEN (2012)

2.3.4. Índice Térmico Costero Peruano (ITCP)

Para la evaluación de los efectos de eventos ENSO en el área de afloramiento costero del Perú (5°S - 19°S , 90°W - 70°W) se usa el índice térmico costero peruano, este evalúa la media móvil de 3 meses de la primera componente principal reducida de un análisis de componentes principales (ACP) de las anomalías de TSM entre la línea ecuatorial y los 10°S (Quispe Ccalluari, C. et al.,2016).

2.3.5. Otros índices

El índice Trans-Niño (TNI) evalúa la diferencia de las anomalías de TSM normalizadas promediadas en las regiones Niño 1.2 y Niño 4 (Trenberth y Stepaniak, 2001).

Otros índices desarrollados involucran parámetros como la radiación de onda larga saliente (R_{nl}) basada en satélites que miden el grado de convección en el Pacífico Tropical durante los eventos ENSO. Por otro lado, también hay índices basados en el flujo de movimiento de masas de aire en la zona de las regiones “El Niño” (Barnston,2015).

2.4. TIPOS EL NIÑO

Cada evento “El Niño” que ocurrió a lo largo de la historia es diferente uno del otro, es por ello que existen varios tipos según la intensidad, localización de las anomalías de las variables meteorológicas y/o oceánicas, el proceso de inicio, madurez y finalización e impactos socioeconómicos y ambientales (Zambrano, 1996).

Según su localización existen dos tipos de eventos ENSO, estos se definen en función de las ubicaciones de sus anomalías máximas de TSM: el tipo del Pacífico Oriental (EP) o también llamado “Niño Canónico” y el tipo del Pacífico Central (CP) cerca de la línea de fecha internacional como también se conoce “Niño Modoki” (Wang,2018).

2.4.1. Niño Canónico

Este evento se caracteriza por las anomalías de TSM y vientos superficiales ubicadas en el Pacífico Central y Oriental Ecuatorial en la cual está regulado principalmente por la variación de la termoclina en toda la cuenca, debido a esto se ajusta más con la teoría del oscilador retardado (Kao y Yu, 2009).

Con respecto a la precipitación, existe un exceso en las zonas costeras de Sudamérica asociados con los cambios de anomalías de TSM y vientos superficiales que se extienden por toda la cuenca del Pacífico Central y Oriental produciendo cambios zonales en la

circulación de Walker y desplazamiento meridional hacia el sur de la Zona de Convergencia Intertropical (Rasmusson y Carpenter, 1982).

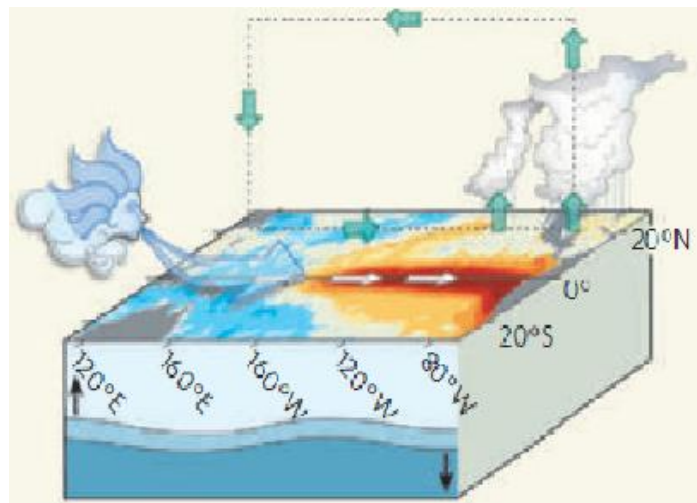


Figura 10. El Niño Canónico
FUENTE: Ashok y Yamagata (2009)

2.4.2. Niño Modoki

El término Modoki proviene del idioma japonés que significa “similar pero diferente”. Este tipo de evento no está relacionado al Niño convencional, sus impactos son significativamente diferentes en muchas partes del mundo (Ashok et al., 2007).

Kim et al., (2009) propusieron que este evento solo se limita en el Pacífico Central con anomalías de TSM máxima cerca de la línea de fecha internacional. La mayoría de estas anomalías aparecen, se desarrollan y descomponen en la misma localización.

Se caracteriza por presentar mayores variaciones de TSM y vientos superficiales manifestando un calentamiento sobre el Pacífico Central Ecuatorial con centros fríos en ambos lados (Kao y Yu, 2008). Las variaciones de termoclina no son de carácter primordial, sin embargo, la advección zonal es importante para su evolución (Kug et al., 2009).

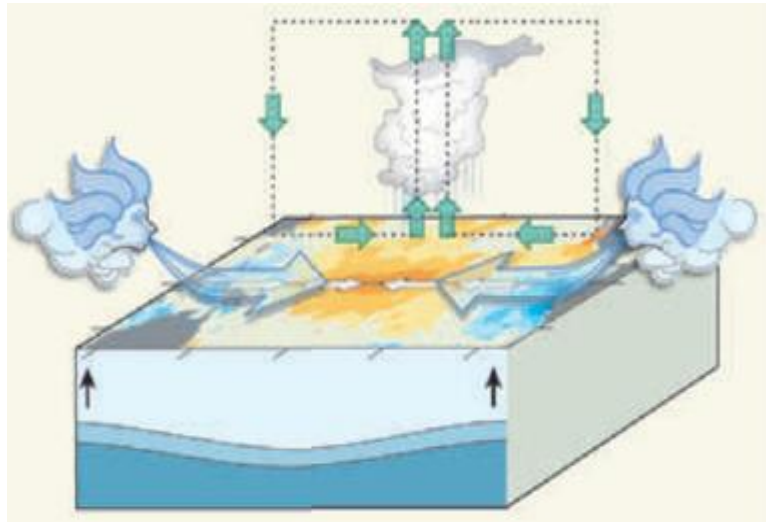


Figura 11. El Niño Modoki
FUENTE: Ashok y Yamagata (2009)

Existe un mecanismo de enlace extratropical por las variaciones de presión superficial y TSM que intuye la aparición de un evento Modoki de fase fría (La Niña) después de un fuerte evento cálido de tipo Canónico (Yu y Kim, 2011).

En las últimas décadas se han presentado más frecuencia y persistencia de los eventos del Niño Modoki que el Canónico, esto puede ser consecuencia del calentamiento global antropogénico observado desde finales de 1970. (Kim et al, 2009).

Para diferenciar estos dos tipos de eventos se puede usar los índices “El Niño” para su identificación y medir su intensidad, de tal modo que el índice Niño 3 (5°N - 5°S , 150° - 90°W) corresponde para el Niño Canónico y el Niño 3.4 para el Niño Modoki. (Ashok y Yamagata, 2009).

Otra diferencia entre estos dos tipos de eventos “El Niño” es su periodicidad, el Niño Canónico tiene una variabilidad interdecadal más fuerte mientras que el Niño Modoki el cambio de década es relativamente pequeño, esto implica que la fase de transición ocurra en los meses de primavera boreal. (Roy y Kripalani, 2019).

Para determinar un nuevo tipo “El Niño” se debe tener en consideración las características de evolución, dinámica, respuesta atmosférica-oceánica y teleconexiones asociadas al ENSO. (Takahashi et al., 2011).

2.4.3. Niño Costero

Debido a los impactos que se generó en el verano austral del 2017 en las costas de Sudamérica, especialmente el norte del Perú, otro tipo de evento “El Niño” se desarrolló siendo diferente pero no nuevo debido a que anteriormente ocurrió en el 1925 denominado “Niño Costero” (Ramírez y Briones, 2017).

El Niño Costero desarrolla anomalías de TSM a una escala local, específicamente en la región Niño 1.2. Para el monitoreo y predicción se hace uso del índice Costero El Niño (ICEN) (Martínez y Takahashi, 2017).

2.5. VARIABLES METEOROLÓGICAS DE ESTUDIO

2.5.1. Humedad relativa

La humedad relativa es el grado de saturación de vapor de agua a una presión y volumen inicial de una parcela de aire húmedo o insaturado, lo que requiere un desplazamiento progresivo de una transformación termodinámica de tipo isotérmico e isobárico de gas seco con vapor de agua hasta la saturación, también se puede lograr la saturación mediante la adición de vapor sin desplazamiento del gas seco conservando su densidad y presión parcial o por compresión de cualquier combinación de desplazamiento o adición (Lovell-Smith y Pearson, 2005).

Su fórmula de cálculo es la siguiente:

$$HR = \frac{f(t_d, P) e(t_d)}{f(t, P) e(t)} \times 100\% \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

- HR es la humedad relativa (adimensional) en porcentaje
- $f(t_d, P) e(t_d)$ corresponde a la presión parcial o actual del vapor de agua en (hPa o mb) que está en función a la temperatura de rocío (t_d) y presión inicial P.
- $f(t, P) e(t)$ corresponde a la presión de saturación en (hPa o mb) que está en función de la temperatura del aire (t) y presión inicial P.

Conforme aumenta la temperatura, también aumenta la cantidad de vapor de agua que debe existir en una parcela de aire húmedo para alcanzar la saturación (HR es igual a 100%). La humedad relativa disminuye en cuanto aumenta la altura y en latitudes tropicales es mayor

el contenido a comparación de las latitudes medias y altas debido a que estas últimas presentan extensas regiones desérticas (Peixoto y Oort, 1996). Se ha demostrado que, en el verano boreal, la humedad relativa en los trópicos tiene una respuesta tardía al ciclo ENSO (McCarthy y Toumi, 2004).

2.5.2. Agua precipitable

El agua precipitable o PWAT (*precipitable water*) por sus siglas en inglés, es la cantidad de vapor de agua atmosférica en una columna vertical del área de una sección transversal entre dos niveles de presión especificados, se expresa en términos de altura (mm) y se puede obtener mediante la siguiente ecuación (Marques et al., 1977).

$$PWAT = \frac{10}{g} \int_{P_0}^P \bar{q} \partial P \quad \text{Ec.5}$$

Donde:

- PWAT es el agua precipitable expresado en kg/m²
- \bar{q} es la media de la humedad específica en gramos de vapor de agua por kilogramo del aire húmedo
- P y P₀ son las presiones de las superficies isobáricas delimitado en la columna del aire atmosférico expresado en mb o hPa.
- g es la aceleración de la gravedad expresado en m/s²

Generalmente valores altos de PWAT (48 a 49 kg/m² o mm aproximadamente en superficie) suelen ubicarse en los trópicos mientras los valores menores en las latitudes medias, la variación zonal se desplaza según el movimiento de la ZCIT, ocurre a 10°S en marzo y migra sobre el ecuador a 5°N en junio, avanza más hacia el norte a 7,5°N en setiembre y luego regresa hacia el ecuador en diciembre, por ello que la mayor magnitud de PWAT se da durante los meses de verano y menor en invierno según el hemisferio (Teng et al., 2013).

La humedad de la tropósfera subtropical responde a las oscilaciones en el sistema del ENSO en escalas interanuales, es decir que el contenido de vapor de agua de la atmósfera subtropical disminuye durante el evento ENSO El Niño, lo que significa que la tropósfera extratropical es más fría durante un evento ENSO El Niño (Hurley y Galewsky, 2010).

2.6. TELECONEXIONES

2.6.1. Definición

Tras el desarrollo y evolución de un evento ENSO se genera cambios importantes en distintos lugares del mundo alejados de la cuenca del Pacífico tropical, como respuesta de ello se denomina teleconexión. Según Nigam y Baxter (2015), el término “teleconexión” hace referencia en las ciencias atmosféricas al vínculo de variabilidad climática entre regiones geográficas distantes en diferentes escalas temporales.

Estas teleconexiones están basadas en el transporte de energía, propagación de ondas y la dinámica climática a escala global (miles de kilómetros) a través de una red. (Zhou et al., 2015). Como consecuencia, hace que el clima sea más estable y más eficiente con la transferencia de información de los patrones climáticos. (Tsonis et al., 2008).

Esta red viene a ser una red climática que se compone de varios puntos o nodos (sitios geográficos) ubicados en una cuadrícula espacial que interactúan entre sí. Esta a su vez se compone de dos subredes estableciendo vínculos entre los dos hemisferios, una subred se ubica en los trópicos y la otra en latitudes más altas. La tropical es una subred casi completamente conectada, mientras que la de latitud más alta actúa como una red sin escala caracterizada por nodos dominantes, es por ello que las teleconexiones son bien desarrolladas en el invierno del hemisferio norte. (Tsonis y Roebber, 2004).

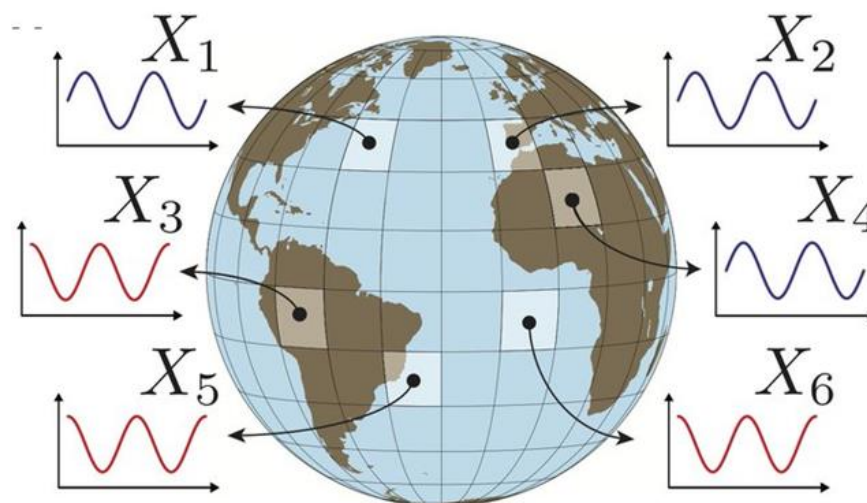


Figura 12. Representación de los nodos ubicados en el globo terráqueo a diferentes escalas temporales y espaciales

FUENTE: Ferreira et al. (2019)

2.6.2. Métodos que se emplean en las teleconexiones

Las teleconexiones están sujetas por una correlación significativa de las variables climatológicas en las que interactúan desde meses hasta varias décadas, dicha correlación es más fuerte solo entre nodos vecinos. Estas pueden analizarse en medidas de similitud como el coeficiente de Pearson, análisis de correlación canónica, análisis de componentes principales, correlaciones cruzadas, etc. (Agarwal et al., 2019).

Las correlaciones son útiles para determinar el grado de asociación de medición de las variables climáticas y a su vez caracterizar o predecir algunos fenómenos. Entre variables cuantitativas se puede mostrar usando un diagrama de dispersión. (Boslaugh y Watters, 2008).

Para determinar la correlación de las variables cuantitativas se puede utilizar el coeficiente de Pearson, es el método más sencillo y más común de todos para datos distribuidos normalmente de forma conjunta, en la cual se asigna un valor entre -1 a 1, donde 0 es sin correlación, 1 es correlación positiva total y -1 es correlación negativa total. Una correlación positiva significa que, si la variable cuantitativa “x” aumenta, entonces la variable “y” también aumentará; sin embargo, cuando se trata de una correlación negativa, mientras la variable “x” aumenta, “y” disminuye y viceversa. (Nettleton, 2014).

El coeficiente de Pearson se verá afectado por valores extremos, por ello puede exagerar o disminuir la fuerza y dirección de las relaciones lineales de las variables cuantitativas. Para obtener el valor (r) de una muestra estadística, se calcula de la siguiente manera:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2][\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2]}} \quad \text{Ec.6}$$

Donde, x_i e y_i son valores de términos “i-ésimo”, \bar{x} e \bar{y} son las medias o promedios de una muestra de datos de variables cuantitativas x e y respectivamente. (Mukaka, 2012).

El análisis de correlación canónica es un método estadístico multivariado en la que se extrae las asociaciones entre dos conjuntos de variables de dimensiones grandes y relaciones no lineales a comparación del coeficiente de Pearson, estos conjuntos poseen diferentes aspectos o puntos de vista. (Uurtio, 2017). En las teleconexiones se usa como una técnica exploratoria en la determinación de las señales temporales de estas y en la búsqueda de

rezagos en las variables de estudio, los primeros en usarse fueron las presiones a nivel del mar de Tahití y Darwin relacionadas a la Oscilación del Sur. (Nicholls, 1987).

El análisis de componentes principales también es parte del análisis multivariado utilizado en las teleconexiones que consiste en una transformación de espacio vectorial de una serie de posibles correlaciones en un menor número de variables según su grado de importancia, de esta manera se reduce la gran dimensionalidad de los conjuntos de datos de estudio. (Richardson, 2009).

En este presente estudio, se utilizará el método del análisis de correlaciones cruzadas en base a la dinámica de las fluctuaciones de las teleconexiones. En el ámbito de la estadística, las funciones de correlación cruzada proporcionan una medida de asociación entre señales en la cual se puede cuantificar el grado de similitud entre dos conjuntos de series de tiempo de variables cuantitativas. En relación al coeficiente de correlación de Pearson, este último viene a ser una versión normalizada de una correlación cruzada. (Derrick y Thomas, 2004). El procedimiento para su obtención y aplicación se detallará con mejor precisión en la metodología.

2.6.3. Impactos climáticos de las teleconexiones enso en el mundo

Los eventos ENSO genera de por sí un incremento de precipitaciones en el Océano Pacífico central y oriental que provoca una alteración pluviométrica en otros lugares del mundo, esta es compensando por un autoequilibrio en el sistema climático de las variaciones que se puedan dar. Estas variaciones se pueden analizar mediante el uso de parámetros oceánicos y atmosféricos y a su vez realizar pronósticos de cierta fiabilidad ante la aparición de eventos climáticos extremos (sequías, inundaciones, ciclones tropicales, etc.), y mitigar los posibles efectos que tienen como consecuencia y afectan tanto en salud, economía, sociedad en las regiones del mundo. (Marcos, 1999).

2.6.3.1. América Latina

En el altiplano del sur de Perú, principalmente en la vertiente del Titicaca y al este de los Andes se presentan sequías hidrológicas durante un evento El Niño con una reducción de lluvias de hasta 18%. (Lavado y Espinoza, 2014).

En la región amazónica de Sudamérica, Colombia y Venezuela se presentan reducciones de precipitaciones, como también en el sector noreste de Brasil, en la cual persisten rachas secas

de variabilidad estacional e interanual que se intensifican por la interacción de las teleconexiones ENSO, PDO y AMO. (Paredes et al., 2015).

En la región central de Chile presenta una variabilidad interanual de precipitación líquidas y sólidas en exceso en los meses de invierno austral, esta está parcialmente determinada por las anomalías positivas de la TSM en el Pacífico ecuatorial central durante un evento El Niño. (Escobar y Aceituno, 1998).

La frecuencia de los ciclones tropicales se ven reducidos en el Caribe durante la disipación de un evento El Niño, ya que puede inducir un calentamiento en el Océano Índico tropical suprimiendo la formación de un ciclón tropical. (Lin et al., 2020). Se ha comprobado que los eventos El Niño están relacionados con el aumento anómalo de flujos de vientos del oeste en la tropósfera superior sobre la cuenca del Caribe y el Atlántico ecuatorial que inhiben la actividad de los ciclones tropicales. (Gray, 1984).

2.6.3.2. América del Norte

En América del Norte se produce un incremento de las temperaturas del aire durante el invierno boreal en el norte de Estados Unidos, sur de Canadá y Alaska. En regiones al sur del Golfo de México se experimentan convecciones fuertes relacionados al ENSO, debido a los fuertes vientos del oeste anómalos, estas condiciones hacen que se formen tormentas y huracanes con mayor frecuencia en dicho golfo. (Ropelewski y Halpert, 1986).

El efecto que deja un evento El Niño sobre la región suroeste y sureste de Estados Unidos y noreste de México es el incremento de precipitaciones e inundaciones dependiendo de la intensidad moderada o fuerte. Se presentan aguas inusualmente cálidas frente a la costa de California y oeste de México aportando la energía necesaria para la formación de fuertes depresiones y el debilitamiento de la inversión de los vientos alisios permiten que el aire húmedo penetre en la región suroeste. (Andrade y Sellers, 1988).

Existe una correlación negativa entre el número de tormentas tropicales y huracanes que se forman en el Atlántico Norte con respecto a la intensidad de los eventos Niño ya sea moderado o fuerte. (Gray, 1984).

2.6.3.3. Asia

En el continente asiático, la variabilidad climática relacionada a los eventos ENSO está principalmente afectado por el debilitamiento de los monzones en la India. Los valores del SOI negativos (positivos) significa un debilitamiento (fortalecimiento) de la circulación de

Walker estén fuertemente relacionados a las lluvias monzónicas (sequías) que suceden en la India y sureste de Asia en simultáneo durante los meses de agosto, setiembre y octubre. (Bhalme y Jadhav, 1984).

Existe una reducción de precipitaciones en la región noreste de China y sureste de Mongolia, por lo general durante los años ENSO las lluvias están debajo de lo normal incluso en algunas ocasiones se presentan sequías. Esta relación se debe a los procesos de acoplamiento que involucran al moznón del verano boreal y el alta subtropical del Pacífico occidental. (Wang y Li, 1990).

2.6.3.4. África

Las principales teleconexiones asociadas del continente africano con un evento ENSO El Niño son el incremento de TSM en el océano Atlántico surecuatorial y en el litoral de Guinea Ecuatorial, fuerte sequía en el Sahara occidental, disminución de precipitaciones y sequías en el extremo sureste de África, Madagascar, meseta de Etiopía e incremento de precipitaciones en el extremo oriental de la región del África ecuatorial. (Marcos, 1999).

2.6.3.5. Europa

Los eventos cálidos ENSO afectan a gran distancia a la circulación atmosférica de la región atlántico-europeo nororiental principalmente en los inviernos boreales (enero y febrero) después del año sucedido el evento. También se presencia un incremento de precipitaciones en Europa occidental. (Fraedrich, 1990).

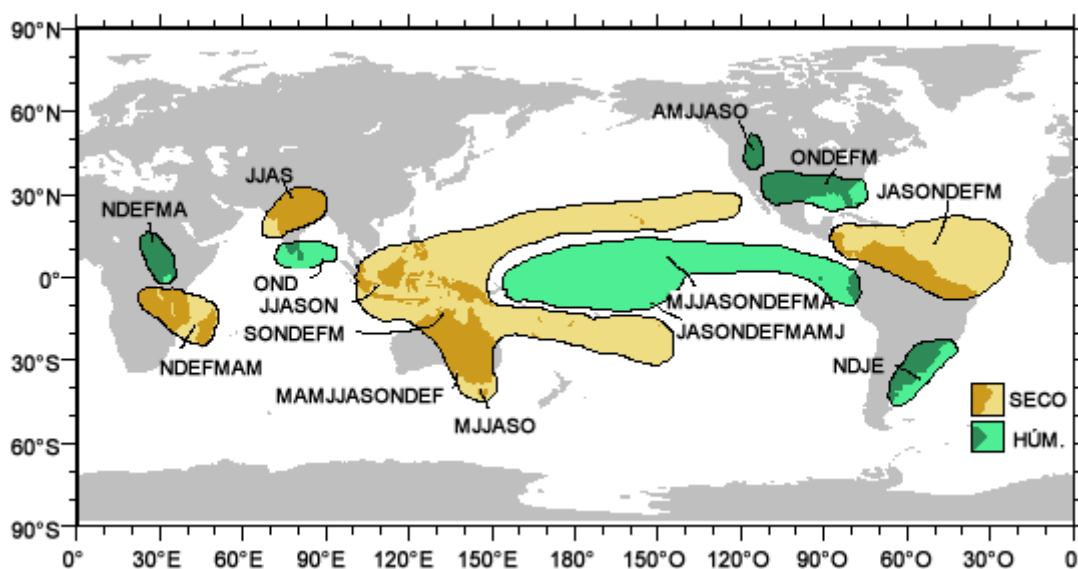


Figura 13. Distribución geográfica y estacional de las anomalías de precipitación a gran escala asociadas a un evento ENSO El Niño
FUENTE: MetEd (2016)

2.7. PATRONES METEOROLÓGICOS-OCEÁNICOS ASOCIADOS AL ENSO

2.7.1. Fuentes de variabilidad intraestacional

2.7.1.1. Oscilación Madden-Julian (Mjo)

La Oscilación Madden – Julian es un sistema océano atmósfera acoplado de variabilidad intraestacional de gran escala y convección profunda de duración aproximada de 30 a 90 días. El componente atmosférico tiene una oscilación que se propaga lentamente hacia el este con velocidades de 5m/s en promedio entre 30 a 60 días a través de la superficie de aguas cálidas de los océanos Índico y Pacífico. Mientras que el componente oceánico está regido a través de flujos superficiales de impulso, calor latente y sensible, radiación y viento por un periodo entre 60 a 75 días (Zhang, 2005).

La dinámica de la MJO comprende en una convección precedida por una convergencia en niveles bajos con movimiento ascendente vertical, mientras que en la altura se forma un sistema de alta con vientos del este con enfriamiento y sequedad. Tras el paso de las lluvias intensas, una región de ráfagas de vientos del oeste acompaña precipitaciones de tipo estratiforme, hacia el lado oriental se forma en superficie anomalías de alta presión con vientos del este mientras que en la tropósfera superior predomina los vientos del oeste (Kiladis et al., 2005).

La interacción que se cree que actúa la MJO con el ENSO de la fase “El Niño” es que esta oscilación promueve al evento “El Niño” debido a las anomalías del estrés de vientos del oeste se propagan hacia el este del Pacífico Ecuatorial; sin embargo, Hendon et al. (2007) sostiene que la actividad del MJO promueve una retroalimentación positiva para el ENSO apoyados de vientos del oeste superficiales más pronunciados en la primavera boreal.

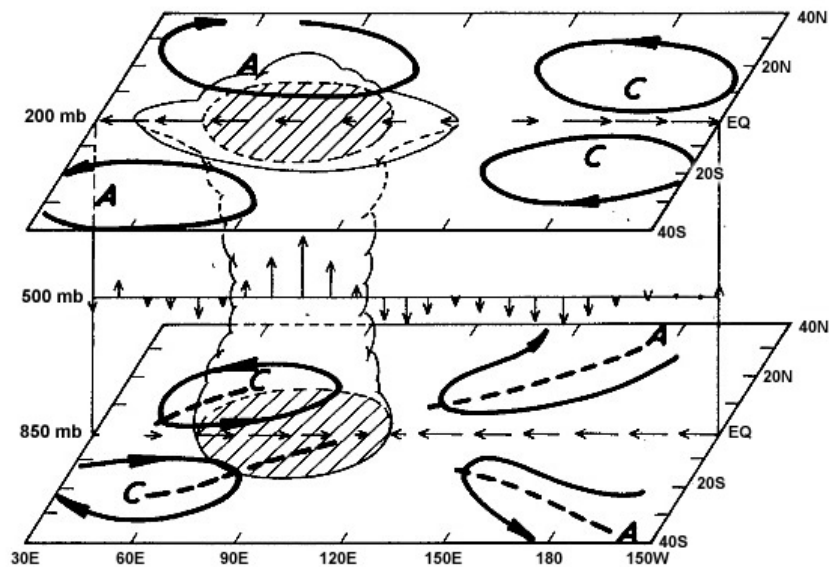


Figura 14. Modelo tridimensional de la MJO. Las flechas indican los flujos del viento, “A” significa centros de alta presión y “C” de baja presión
FUENTE: Rui Y Wang (1990)

2.7.1.2. Ondas Ecuatoriales

Las ondas Kelvin son ondulaciones de gravedad de gran escala que depende de la gravedad, la aceleración de Coriolis y la presencia de fronteras verticales o el Ecuador. Su particularidad de este tipo de ondas es su propagación unidireccional con sentido al este que se mueve hacia el Ecuador a lo largo de un límite alcanzado su máxima magnitud, hacia el polo a lo largo de un límite oriental, y un flujo ciclónico alrededor de un límite de sistema cerrado. Las ondas Kelvin atmosféricas juegan un rol importante en el balance de energía de la atmósfera tropical por la liberación del calor latente por convección, generación y mantenimiento de la Oscilación Madden-Julian y se cree que son importantes para el inicio de un evento ENSO El Niño (Wang, 2001).

Según Straub y Kiladis (2002), las ondas Kelvin acopladas por convección se propagan al este con velocidades de 15 a 20 m/s con un periodo promedio de 6 a 7 días, mientras que las ondas Kelvin secas en la estratósfera inferior tienden a propagarse a velocidades de 30 a 40 m/s, la reducción de la velocidad de fase de seco a húmedo implica una interacción entre la convección tropical y la estructura dinámica a gran escala de las ondas.

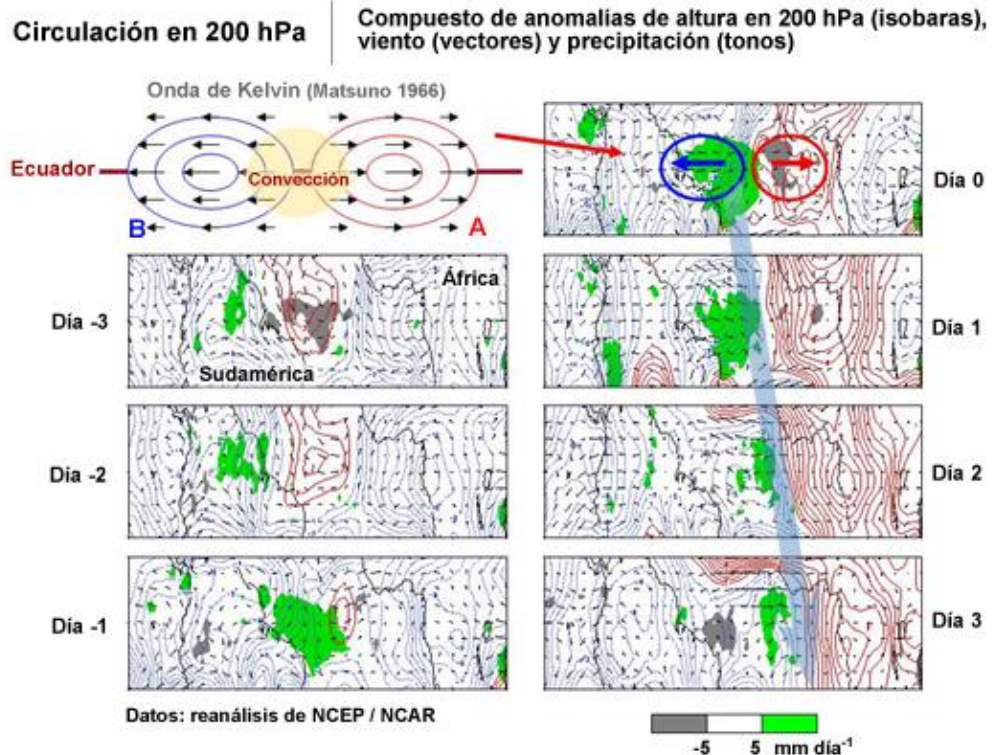


Figura 15. Compuesto de anomalías de altura en 200hPa (isóbaras), viento (vectores) y precipitación (tonos)

FUENTE: Wang y Fu (2005), adaptado por MetEd (2016)

Cuando una anomalía de estrés del viento del oeste excita una onda Kelvin descendente relativamente fuerte se propaga hacia la región oriental, donde se reflejan como ondas Rossby, estas últimas se propagan hacia el oeste con velocidades de 10 a 20 m/s en caso de ser ondas Rossby atmosféricas secas y de 5 a 7m/s cuando son acoplados por convección. A medida que la onda Kelvin se propaga a través del Pacífico oriental, la TSM aumenta debido a la interacción océano-atmósfera. En el sector occidental de la anomalía de estrés del viento del oeste, las ondas Rossby más graves se desplazan meridionalmente hacia el límite occidental y se reflejan como ondas Kelvin ascendente, que se reduce a medida que se propaga hacia el Pacífico oriental, pero no revierte la anomalía local descendente. A medida del desarrollo de un evento ENSO, hay una corriente continua de estas ondas Kelvin y Rossby que se propagan lejos de la región de forzamiento en el Pacífico central (Kirtman, 1997).

2.7.2. Patrones sinópticos asociados al ENSO

2.7.2.1. Zona De Convergencia Intertropical (ZCIT)

La Zona de Convergencia Intertropical es uno de los sistemas más importantes de la región tropical. Se ubica en la rama ascendente de la celda de Hadley transfiriendo calor y humedad desde los niveles inferiores de la atmósfera en los trópicos a los niveles superiores de la tropósfera hacia latitudes medias y altas, de esta manera mantiene el balance del calor global. Su dinámica se debe a la interacción de condiciones meteorológicas y oceánicas como la confluencia de los vientos alisios del noreste y sureste y la máxima temperatura superficial del mar (TSM) desplazándose de norte a sur en los meses de verano a lo largo del año propiciando actividad convectiva con precipitaciones importantes (Ferreira, 1996).

Cuando ocurre un evento “El Niño” se genera una alteración de la circulación meridional de Hadley y por consiguiente se produce anomalías en la nubosidad convectiva de la ZCIT asociados a la TSM cálida en el Pacífico Ecuatorial favoreciendo una alteración considerable de la distribución espacial de las lluvias (Pabón y Montealegre, 2017).

2.7.2.2. Alta de Bolivia

La Alta de Bolivia es una circulación anticiclónica de niveles altos de la tropósfera entre 17°S - 70°W que se desarrolla principalmente en los meses de verano para el hemisferio sur condicionando una variación estacional de las precipitaciones sobre el altiplano de Sudamérica según su posición e intensidad. Presenta un núcleo cálido en niveles altos debido al calentamiento por condensación de la tropósfera media, su actividad está conjuntamente desarrollada con varios patrones sinópticos, una de ellas es la vaguada del noreste de Brasil (Lenters y Cook, 1997).

Durante un evento “El Niño”, la Alta de Bolivia tiende a desplazarse hacia el oeste, cerca al Pacífico provocando una mayor convección de aire en la región occidental de la cordillera de los Andes (Villarando, 1998).

2.7.2.3. Anticiclón del Pacífico Sur Oriental (APSO)

El Anticiclón del Pacífico Sur Oriental (APSO) es un sistema de giro anticiclónico conducida principalmente por el viento que se extiende sobre toda la cuenca oceánica del Pacífico sur. En los meses de verano austral, el APSO es más intenso frente a las costas centro y sur de Chile mientras que en el invierno es más intenso hacia el norte de Chile. El posicionamiento y la intensidad favorece la magnitud de los vientos provenientes del sur hacia las costas de

Perú transportando masas de aguas frías generalmente en los meses de invierno austral (Ancapichún y Garcés-Vargas, 2015).

Los sistemas de presión extratropicales guardan relaciones durante un evento “El Niño”, tal el caso que el APSO sufre un descenso de presión (índice SOI negativo) provocando el debilitamiento de los vientos alisios en superficie. Mientras que el Anticiclón del Atlántico se desplaza hacia el noreste más de lo normal, provocando un mayor flujo y advección de aire cálido y húmedo hacia la cuenca amazónica (Villarpando, 1998).

2.7.2.4. Corriente en chorro

Según la NOAA (1998), la corriente en chorro o jet de niveles altos es una zona de vientos máximos de sentido de oeste a este en la tropósfera superior con velocidades superiores a 70 nudos y con un núcleo igual o superior a los 90 nudos. Posee 3 ramificaciones paralelas según la posición latitudinal separados a cinco grados aproximadamente, las cuales son de norte a sur: jet subtropical, rama norte del jet polar y rama sur del jet polar.

El efecto del calentamiento en la alta tropósfera provocado por el evento “El Niño”, parece que la rama del jet subtropical de la corriente en chorro fluye sobre la cordillera de los Andes cerca de los 23°S, más al norte que lo normal, y en ocasiones extraordinarias el desplazamiento de la rama de la corriente en chorro llegó hasta el territorio boliviano, influyendo directamente sobre la dinámica de la atmósfera (Villarpando, 1998).

2.8. Efecto del cambio climático

El cambio climático es la variación global de las condiciones meteorológicas y oceánicas a largo plazo debido al calentamiento mundial. Existe una tendencia de proyección de gran alcance hacia el calentamiento del clima de la Tierra por el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que atrapan el calor producido por las actividades cotidianas humanas e industriales como también la alteración de los procesos naturales (OMM, 2014).

Los eventos “El Niño” a lo largo de la historia, se han ido acelerando y sus periodos de recurrencia aminorándose producto del cambio climático. Bajo un escenario donde la temperatura global es constante o tiende a serlo, el evento “El Niño” se comporta como un sistema independiente pero cuando la temperatura global cambia rápidamente, este reacciona respectivamente. Por tanto, la complejidad ante un evento “El Niño” en cuanto a su variabilidad anual y su estacionalidad, se ve reforzado por periodos de un incremento rápido de temperatura, lo que se intuye a que la frecuencia y variabilidad del evento “El Niño” en

el contexto del cambio climático son sensibles a los cambios de temperatura global, mas no a su valor real de dicha temperatura (Tsonis et al., 2003).

Las investigaciones aún no logran definir exactamente un diagnóstico en cuanto a la respuesta de los futuros de los eventos “El Niño” ante el cambio climático; sin embargo según la NOAA gracias a los datos del sistema global de observaciones, satélites y modelos climáticos muestran una perspectiva en que las zonas donde hay climas cálidos conducen a una intensificación regional del ciclo hidrológico tropical durante los eventos “El Niño”, lo que significa que los futuros eventos “El Niño” tienen una alta probabilidad de ser más intensos.

2.9. PRONÓSTICO NUMÉRICO

2.9.1. El sistema de pronóstico

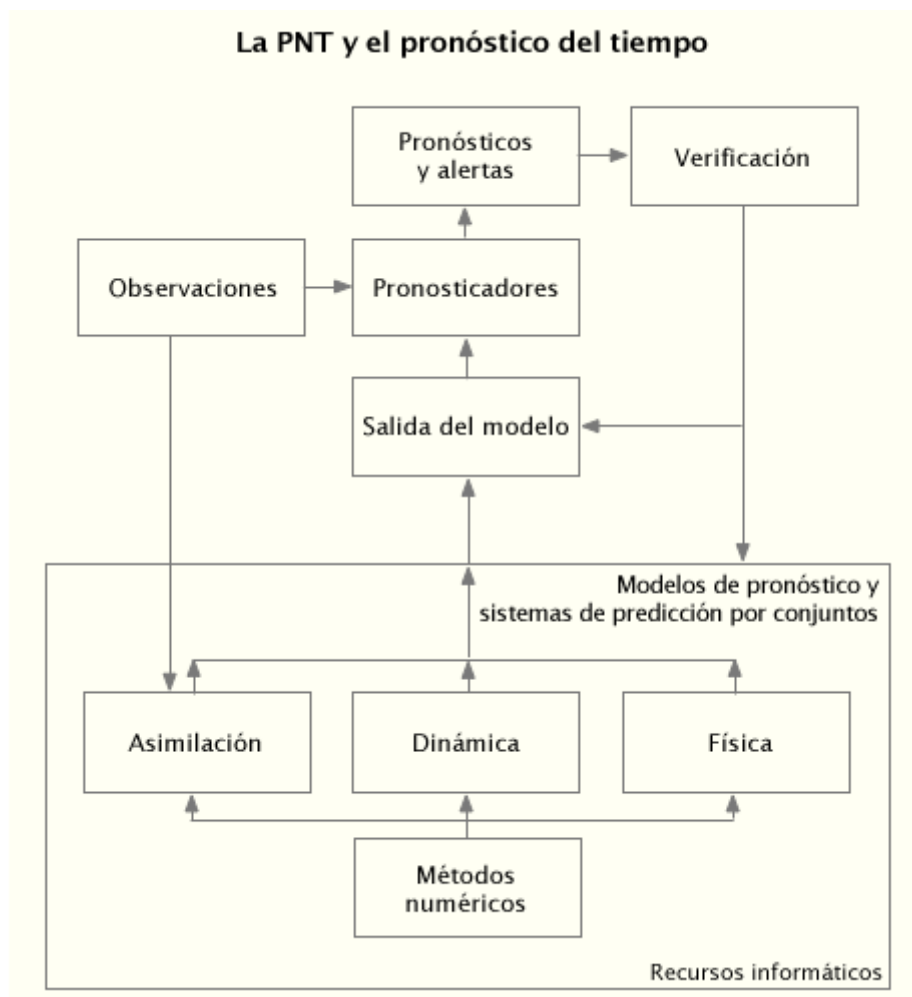


Figura 16. Procedimiento para el pronóstico del tiempo
FUENTE: MetEd (2018)

Los modelos de Predicción Numérica del Tiempo (PNT) son modelos físico-matemáticos que representan el estado del tiempo de la atmósfera y sirven para realizar pronósticos a corto, mediano y largo plazo. Este parte de un proceso inicial del estado actual de la atmósfera que se estima por medio de la red de observaciones atmosféricas y asimilación de datos (Calvo, 2018).

Según el MetEd (2010), se necesita la mayor cantidad de observaciones posibles para la determinación de las condiciones atmosféricas actuales y evaluar la exactitud del análisis o del pronóstico del modelo y así de esta manera efectuar los ajustes que se requieran. A través de estaciones terrestres, marítimas, radiosondajes, perfiladores de vientos y aviones en distintos puntos del globo terráqueo, los datos se recopilan para describir la condición inicial de la atmósfera.



Figura 17. Representación del Sistema Global de Observación a nivel mundial
FUENTE: OMM (2021)

La asimilación de datos es el proceso de combinación estadística entre las observaciones y las predicciones de corto plazo que generan un análisis atmosférico. Según Talagrand (1997), la asimilación de datos es poder usar la cantidad de información necesaria para determinar de la manera más precisa posible el estado del flujo atmosférico y oceánico. Se tiene que tener en cuenta que las observaciones no son distribuidas de la misma manera, hay algunas que presentan irregularidades y mala calidad, es por ello que se necesita un filtro de

control de calidad. Una de las dificultades que se presentan en la asimilación de datos es la dimensión numérica del problema, esta asimilación generalmente se realiza con mayor frecuencia en periodos de 24 horas, lo que resulta más factible por la emisión de pronósticos diarios, además de al menos una integración por 24 horas, los algoritmos de asimilación que actualmente se consideran con más eficiencia requieren esencialmente la solución de uno o varios sistemas lineales de ecuaciones cuya dimensión sea el número de observaciones o la dimensión del modelo. Es importante la asimilación cíclica ya que permite la trasmisión de información de condiciones pasadas a presentes de forma coherente para el modelo.

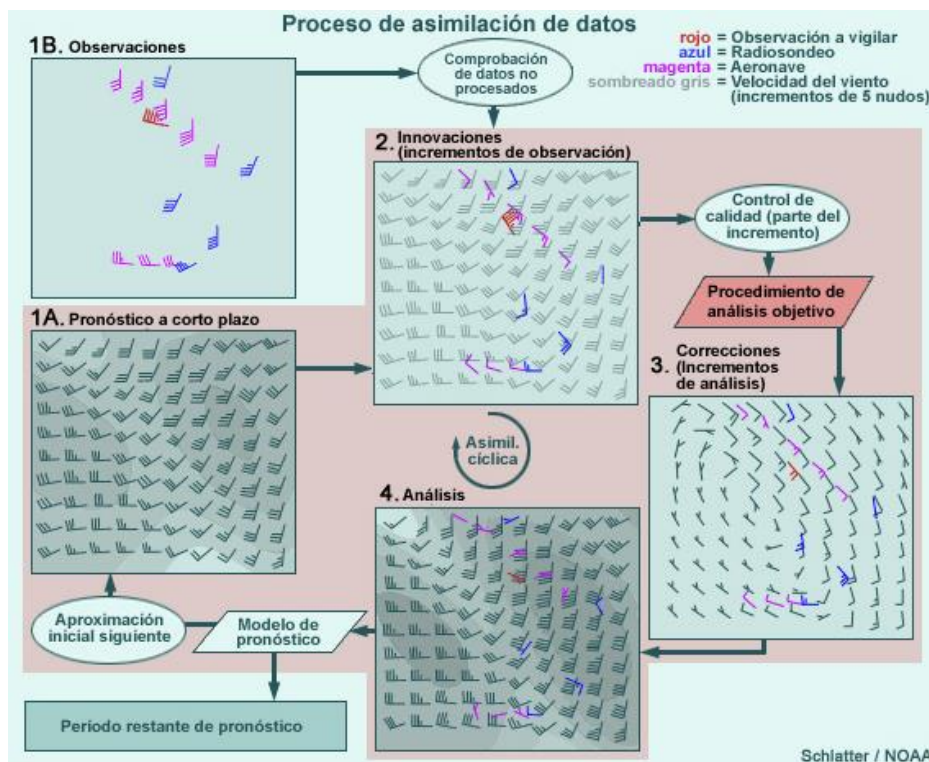


Figura 18. Proceso de asimilación de datos para la variable de viento
FUENTE: Schlatter/NOAA, adaptado por MetEd.

Los modelos numéricos se basan en la dinámica de la atmósfera de las ecuaciones primitivas de los procesos hidrostáticos y no hidrostáticos. A partir de las leyes físicas de movimiento y conservación de la energía se pueden generar una serie de ecuaciones matemáticas. A partir de las condiciones iniciales se puede resolver mediante ecuaciones para la obtención de nuevos valores a un periodo futuro para la elaboración del pronóstico.

Las ecuaciones de Euler contienen las leyes fundamentales de Newton., la ecuación de la termodinámica (conservación de la energía), la ecuación de la continuidad (conservación de la masa) y la ley de los gases perfectos. En total son cinco ecuaciones primitivas que gobiernan los cambios en el movimiento y la termodinámica de la atmósfera. (Calvo, 2018).

Según MetEd (2010), en la atmósfera real, variables como la temperatura, la presión el viento y la humedad presentan variaciones que van de un lugar a otro de forma continua y gradual, por ello los modelos utilizan los datos sobre una malla o cuadrícula en un esquema tridimensional para la representación de la atmósfera en la resolución de las ecuaciones de la atmósfera que depende del sistema de coordenadas, el tipo de modelo, las escalas temporales y espaciales, es por ello que estos modelos suelen dividir a la atmósfera en pequeñas área o celdas que representan los diferentes procesos físicos de la atmósfera. Las ecuaciones de pronóstico deben considerar los efectos que se producen en los modelos que no se pueden pronosticar de manera directa debido al grado de complejidad que implica los procesos físicos o por la dimensión de la escala que debe incluir el modelo.

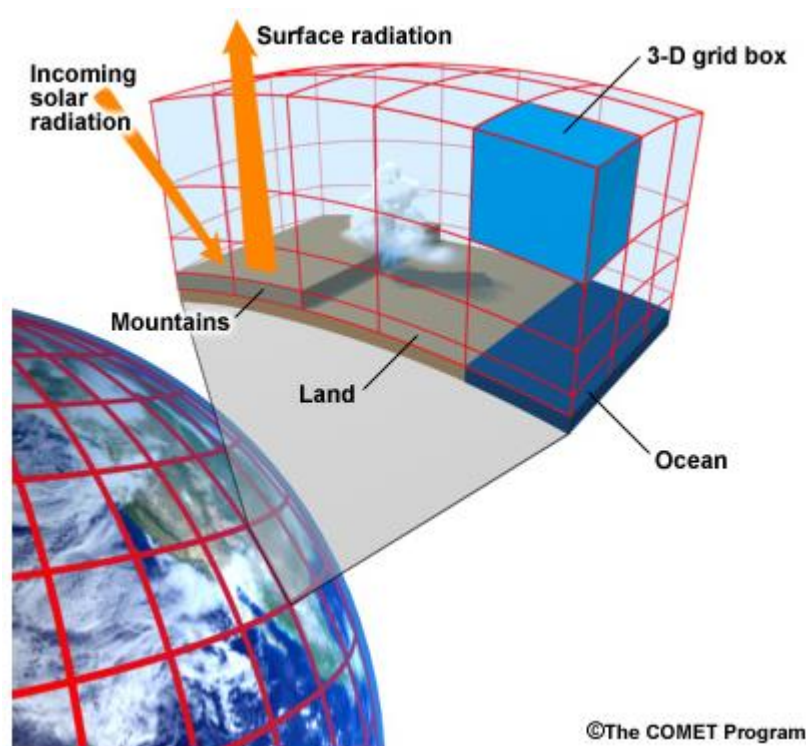


Figura 19. Representación del modelo tridimensional de la atmósfera por los modelos numéricos
FUENTE: MetEd, (2010)

2.9.2. Pronóstico ENSO

Según MetEd (2016), hoy en día diferentes modelos acoplados océano-atmósfera son capaces de generar pronósticos con resultados cada vez más certeros con antelación de un año. Para pronosticar un evento ENSO, existen modelos dinámicos y estadísticos en base a la temperatura superficial del mar (TSM).

Los modelos dinámicos utilizan las leyes físicas fundamentales que gobiernan el comportamiento de la atmósfera y del océano para producir los pronósticos, las ecuaciones

que se mencionaron anteriormente se incluyen para el procesamiento del pronóstico de este tipo de modelos, las representaciones de las ecuaciones físico-matemáticas se convierten en programas informáticos. En cambio, los modelos estadísticos recurren a las observaciones anteriores para poder predecir el futuro, a través de un largo periodo de datos históricos, tendencias, regresiones, extremos y el comportamiento de las variables relacionadas con el ciclo de un evento ENSO.

El grado de complejidad de un modelo estadístico puede verse mediante redes neuronales, estos se basan en una estructura similar al sistema nervioso utilizando la modelación matemática mediante neuronas enlazadas que transmiten información a otras neuronas, las cuales entregan un resultado mediante funciones matemáticas (Ovando et al., 2005).

Las limitaciones que se presentan en el pronóstico de los modelos se deben a la “barrera primaveral”. Para las predicciones durante la temporada de primavera boreal en la fase de crecimiento de un evento ENSO El Niño, los errores de pronóstico inducidos por errores de condiciones iniciales y del propio modelo tienden a una evolución dependiente de la estación prominente y producen una barrera de predictibilidad en la primavera lo cual es un obstáculo por la transición del año para el evento ENSO (Duan y Wei, 2012).

2.9.3. Validación estadística de los pronósticos

En los modelos es necesario realizar la verificación y validación de estos para la determinación del desempeño del pronóstico y conducir a mejorar la credibilidad con la toma de decisiones. Con respecto a la verificación, consiste en el proceso mediante técnicas que utiliza el desarrollador del modelo para asegurar que este sea correcto y coincida con cualquier especificación, mientras que la validación se refiere a los procesos y técnicas que el modelo desarrolla conjuntamente para determinar el nivel de precisión suficiente (Carson, 2002).

Según Sargent (2011), la documentación sobre la verificación y validación de los modelos tiene que ser fundamental para convencer a los usuarios de la exactitud que posee un modelo y sus resultados, por ello debe estar detalladamente sobre las pruebas realizadas, evaluaciones, datos, salidas, etc.

2.9.3.1. Validación cuantitativa

A. BIAS

Se usa para evaluar el grado de sesgo del pronóstico, ante ello se puede analizar la tendencia de subestimar ($B < 0$) o sobrestimar ($B > 0$) el desempeño de predicción del modelo con respecto a los datos observados (Van Der Vaart, 1961), la fórmula de aplicación se detalla de la siguiente manera.

$$B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{Pron}_i - \text{Obs}_i) \quad \text{Ec.7}$$

Donde:

- n es el tamaño de la muestra
- Pron son los datos del pronóstico de los modelos
- Obs son los datos observados a través de la red de observaciones mundial

B. RAÍZ DEL ERROR CUADRÁTICO MEDIO (RMSE)

Mide la magnitud del error del modelo y se obtiene entre la diferencia entre los valores estimados por los modelos de pronóstico y los valores reales observados, estas diferencias se elevan al cuadrado y se calcula el promedio de todas ellas, por último, se le debe sacar la raíz cuadrada (Negrón, 2014).

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{Pron}_i - \text{Obs}_i)^2} \quad \text{Ec.8}$$

Donde:

- n es el tamaño de la muestra
- Pron son los datos del pronóstico de los modelos
- Obs son los datos observados a través de la red de observaciones mundial

C. ERROR MEDIO ABSOLUTO (MAE)

Resulta el grado de acercamiento de la predicción por el modelo con el dato observado, se realiza partiendo de una diferencia entre el valor del modelo y el valor observado en valor absoluto, luego se calcula el promedio. El MAE al igual que el RSME se usan para determinar la variación del error en un conjunto de mediciones (Negrón, 2014).

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\text{Pron}_i - \text{Obs}_i| \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

- n es el tamaño de la muestra
- Pron son los datos del pronóstico de los modelos
- Obs son los datos observados a través de la red de observaciones mundial

2.9.3.2. VALIDACIÓN CATEGÓRICA

Según Jiménez (2014), para pronósticos categóricos no contiene expresión para la incertidumbre, esta característica lo diferencia de un pronóstico probabilístico. La validación consiste en aseverar que uno y solo uno de un posible conjunto de valores va a ocurrir, tal como la presente investigación se mostrará la validación de que si ocurrió o no ocurrió un evento ENSO El Niño según lo pronosticado.

A. TABLA DE CONTIGENCIA

Es una tabla que contiene un esquema de muestreo correspondiente a diferentes escenarios experimentales y distintas hipótesis de interés. La formación básica de una tabla de contingencia es de dimensión 2 x 2 mediante la clasificación cruzada de dos variables binarias en una muestra (Kateri, 2014).

Según Zavala (2016), para la caracterización de la tabla de contingencia 2 x 2 se realiza cuatro combinaciones de pronósticos (sí o no) y observaciones (sí o no) donde el acierto es el pronóstico de ocurrencia del evento y este si ocurrió, el fallo es el pronóstico de no ocurrencia del evento, sin embargo, este sí ocurrió, la falsa alarma es el pronóstico de ocurrencia del evento, pero este no ocurrió y el negativo correcto es el pronóstico de no ocurrencia del evento y que no ocurrió. Un pronóstico ideal y perfecto solo produciría aciertos y negativos correctos, sin fallos ni falsas alarmas.

Tabla 2: Representación de la tabla de contingencia 2 x2

		Observación		
		SI	NO	TOTAL
Pronóstico	SI	a	b	a+b
	NO	c	d	c+d
	TOTAL	a+c	b+d	n=a+b+c+d

- a es el número de aciertos
- b es el número de falsas alarmas
- c es el número de fallos
- d es el número de negativos correctos

FUENTE: Adaptación propia, Zavala (2016).

B. ESTADÍSTICOS CATEGÓRICOS

B.1. RATIO DE ACIERTO o HIT RATE:

Según Wilks (2006), es la medida que se examina de forma predeterminada al evento mediante la medición de la proporción de los fenómenos observados que fueron correctamente pronosticados. Los valores oscilan de cero a uno, siendo el valor perfecto igual a uno.

$$\text{TASA DE ACIERTO} = \frac{a}{a+c} \quad \text{Ec.10}$$

Donde:

- a es el número de aciertos
- c es el número de fallos

B.2. FALSA ALARMA

Es una medida que mide los eventos que no han ocurrido frente a lo pronosticado, el rango de valores puede tomar de cero a uno como el ratio de acierto, siendo el valor ideal cuando vale cero. Se debe analizar generalmente el ratio de acierto y la falsa alarma de manera conjunta para la validación categórica del modelo.

$$\text{FALSA ALARMA} = \frac{b}{b+d} \quad \text{Ec.11}$$

Donde:

- b es el número de falsas alarmas
- d es el número de negativos correctos

2.10. SERIES DE TIEMPO

2.10.1. Definición

Una serie de tiempo está definida como una secuencia de observaciones independientes entre sí de una variable que es recogida de forma cronológica. Estas observaciones son recolectadas en instantes de tiempo ordenadas y equidistantes. (Brockwell y Davis, 2002).

2.10.2. Componentes de la serie de tiempo

Según Peña (2005) una serie de tiempo (Y_t) puede presentar componentes que ayudan a explicar el comportamiento en el tiempo. Sus componentes principales son: tendencia, variación estacional, variación cíclica y variación irregular y se puede representar mediante la siguiente ecuación aditiva.

$$Y(t) = T_t + S_t + C_t + I_t$$

Donde la componente tendencial (T_t) se caracteriza por una proyección cambiante de la misma serie a largo plazo, esta variación se produce en relación al nivel medio o con respecto a la media. Se identifica cuando una serie se comporta continuamente hacia arriba, otra puede declinarse o también pueden permanecer igual en un cierto intervalo de tiempo. La variación estacional (S_t) de una serie de tiempo representa la variabilidad de los datos debido a la influencia de las estaciones, es por ello que está determinada por la periodicidad. Se puede identificar en una gráfica por las oscilaciones regulares en el mismo periodo de año. La variación cíclica (C_t) muestra un comportamiento recurrente con secuencias alternas de puntos arriba respecto a la línea de tendencia que duran más de un año. La variación irregular (I_t) o también llamado “ruido” se refiere a las variaciones erráticas que se debe a los factores de corto plazo, de pequeña entidad y no recurrentes que afectan a la serie de tiempo. Esta componente hace que la serie de tiempo no sea del todo perfecta y fácil de predecir debido a su aleatoriedad.

2.10.3. Dominio del tiempo y dominio de frecuencia

Existen dos enfoques principales para el análisis de series de tiempo: análisis en el dominio del tiempo y análisis en el dominio de la frecuencia. Estos dos enfoques son complementarios y dependientes. El dominio en el tiempo busca caracterizar la serie de datos en los mismos términos en que son observados y reportados en el mismo espacio, una herramienta principal es la autocorrelación; mientras que el dominio de la frecuencia

representa las series de datos en términos de contribuciones que ocurren en diferentes escalas temporales, los métodos del análisis del dominio de la frecuencia se aplican comúnmente al tiempo atmosférico (Wilks, 2006).

Generalmente se usa el análisis armónico para evaluar las fluctuaciones o variaciones que pueda haber en una serie de tiempo como la suma de los componentes de funciones de seno y coseno mientras este sea periódico. El método más clásico para representar la información en el dominio de frecuencia de una señal estacionaria es mediante la Transformada de Fourier (Wilks, 2006).

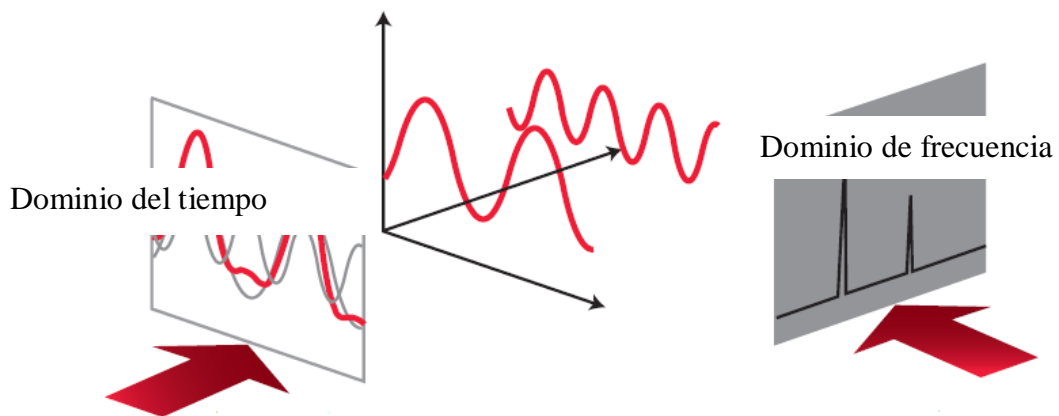


Figura 20. Esquema del dominio del tiempo y dominio de frecuencia en una serie de tiempo
FUENTE: Patterson (2020)

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio

Los datos que se utilizaron en este presente estudio se encuentran ubicados en la región del océano Pacífico Tropical, entre las latitudes 30°S – 30°N y las longitudes 120°E – 60°W .

Según el Instituto Internacional de Investigación para el Clima y Sociedad (IRI) existen varias regiones en el Océano Pacífico tropical para monitorear e identificar eventos ENSO tanto El Niño como La Niña que antiguamente fueron exploradas a través de huellas de los barcos que cruzaron esos sectores, dentro de ellos están: la región El Niño 1.2 ($0\text{-}10^{\circ}\text{S}$, $80^{\circ}\text{-}90^{\circ}\text{W}$), esta normalmente se calienta primero cuando se desarrolla un evento El Niño; la región Niño 3 (5°S - 5°N , 150°W - 90°W), tiene mayor variabilidad en la TSM en escalas temporales ante un evento El Niño e inicialmente estuvo enfocada en el monitoreo y predicción de eventos ENSO, sin embargo posteriores investigaciones determinaron que las mayores interacciones océanos-atmosféricos se ubicaban más al oeste, siendo la región Niño 3.4 en el principal eje actualmente; este último comprende las coordenadas (5°N - 5°S , 170°W - 120°W), tiene la mayor variabilidad en escalas temporales de El Niño y es cuantificado a través de la TSM mediante los índices oceánicos (ONI) explicados anteriormente; y por último la región Niño 4 (5°S - 5°N ; 160°E - 150°W) en esta se producen cambios de la TSM que conducen a valores de alrededor de 27.5°C y tienen menos varianza que las otras regiones de El Niño.

La región que fue analizada comprende las cuatro regiones Niño (Niño 1, Niño 2, Niño 3 y Niño 4) y sectores exteriores a la región antes mencionada ubicados en el océano Pacífico Ecuatorial central y oriental.

La intersección que caracteriza al Niño global o Niño 3.4 tuvo un enfoque determinístico para el pronóstico a largo plazo, ya que los resultados que obtuvieron de la fuerza enlace deseada a través de las correlaciones cruzadas de las anomalías de humedad relativa y agua precipitable fueron comparados con los índices ONI a lo largo del periodo de estudio.

Yamasaki et al., (2008) sostienen que las temperaturas en diferentes zonas del mundo no muestran cambios significativos ante un evento El Niño a excepción cuando la medición se realiza en un área restringida en el Océano Pacífico.

Es por ello que se seleccionaron 207 nodos del área de estudio, de las cuales 14 de ellos se encuentran en la región Niño y 193 nodos restantes se ubican fuera de la región Niño, tal como se muestra en la Figura 21.

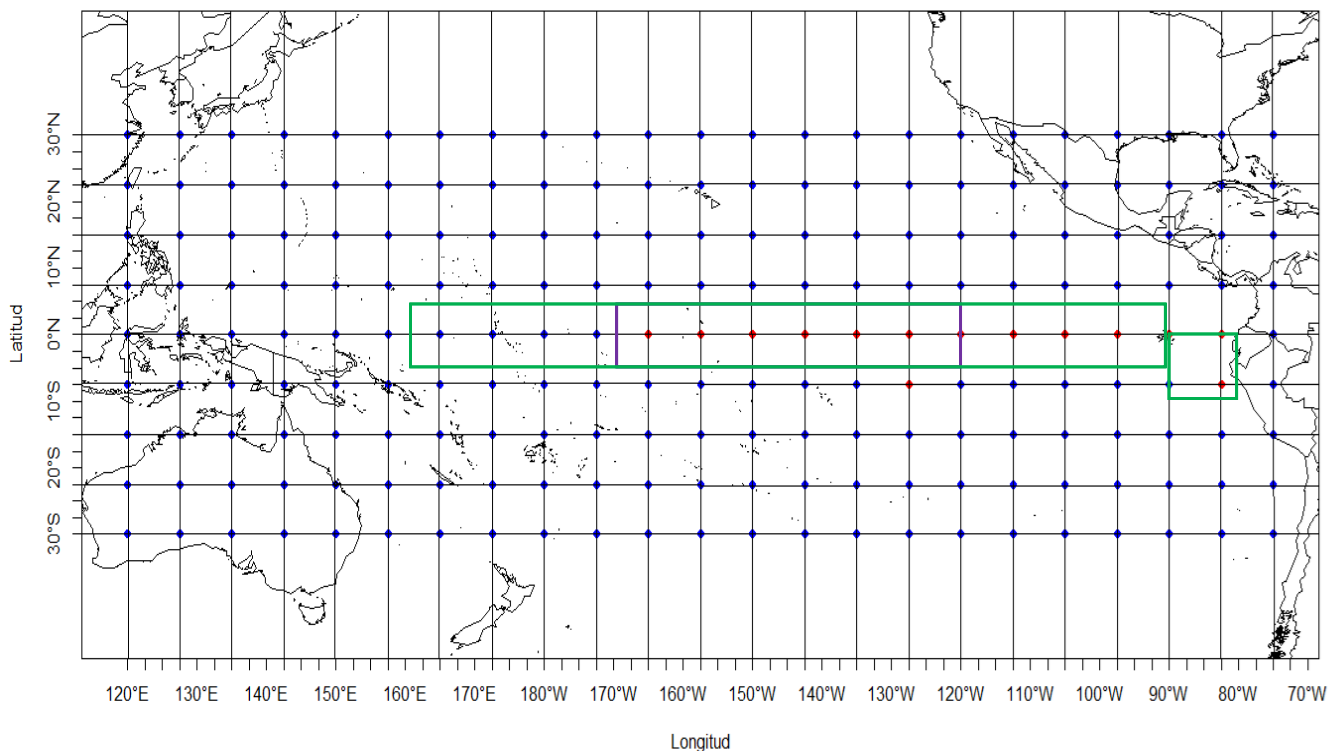


Figura 21. Ubicación de los puntos en el área de estudio del Pacífico central y oriental. Los nodos i correspondientes a la región Niño están señalados con color rojo, mientras que los nodos j que se ubican fuera de la cuenca Niño están señalados con puntos de color azul. Estos sirvieron para el análisis de la correlación cruzada en las teleconexiones emergentes

FUENTE: Elaboración propia (2023)

3.2. DATOS

La información que se utilizó en el presente estudio fueron las variables atmosféricas de humedad relativa y agua precipitable.

Los datos fueron obtenidos del proyecto del Centro Nacional de Predicción Ambiental / Centro Nacional de Reanálisis de Investigaciones Atmosféricas (NCEP/NCAR Reanalysis-

1), esta combina los pronósticos meteorológicos de corto plazo con las observaciones: barcos, aviones, RAOBS, datos de estaciones, observaciones satelitales y muchas más a través de la asimilación de datos. Dicha asimilación también se realiza mediante una combinación de las últimas observaciones con un pronóstico de corto plazo por observaciones anteriores para la obtención de la mejor estimación del estado actual del sistema atmosférico lo que vendría a llamarse análisis. En las combinaciones se pueden utilizar diferentes técnicas matemáticas las cuales se basan en la interpolación estadística espectral. (Kalnay et al., 1996).

La resolución del grillado del área de estudio es de $7.5^\circ \times 7.5^\circ$, donde cada punto está representado mediante un nodo que contiene información de datos diarios de variables predictoras: humedad relativa y agua precipitable, tomando desde el año 1950 hasta el 2019.

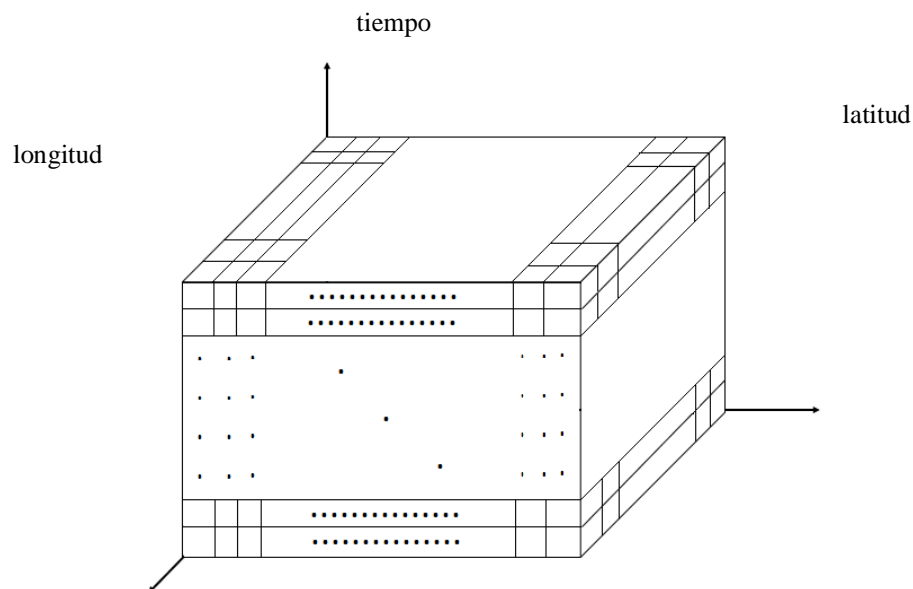


Figura 22. Esquema tridimensional del arreglo de los datos de las variables de estudio, donde el eje x está representado por las longitudes, el eje Y por las latitudes y el eje Z por el tiempo

La resolución temporal de los datos tanto de humedad relativa y agua precipitable es de forma diaria, de tal forma que desde el 1 de enero de 1950 hasta el 31 de diciembre del 2019 existen 25567 valores por cada nodo de cada variable. Para lograr una homogeneidad se eliminaron los datos que corresponden a los días de años bisiestos. En el periodo de tiempo señalado se identificaron 17 días de años bisiestos, por lo que los datos diarios por cada nodo de cada variable se reducen de 25567 a 25550, con el propósito de que los datos.

Los datos diarios homogeneizados son útiles en estudios de tendencias, extremos y variabilidad (Hewaarachchi et al., 2017).

3.3. MATERIALES REQUERIDOS EN LA INVESTIGACIÓN

3.3.1. Ordenador de gran capacidad de almacenamiento proporcionado por el Laboratorio de Modelado Oceanográfico, Ecosistémico y del Cambio Climático (LMOECC) – IMARPE.

3.3.2. Software R 4.1.0 & R Studio

Con el software R se realizó el procesamiento de datos de las variables de humedad relativa y agua precipitable (Anexo 1), la delimitación del área de estudio (Anexo 2), el análisis exploratorio de las variables (Anexo 3), el cálculo de anomalías diarias de las variables (Anexo 4), cálculo de correlaciones cruzadas y fuerzas enlaces de las anomalías diarias de las variables (Anexo 5) y la validación estadística del pronóstico ENSO “El Niño” (Anexo 6).

3.3.3. Software XLSTAT

Con el software XLSTAT se desarrolló automáticamente la prueba Dickey Fuller Aumentada (ADF) para determinar la estacionariedad de las series temporales de las variables de humedad relativa y agua precipitable.

3.4. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

En la presente sección se describirá el procedimiento de la investigación con el propósito de cumplir con los objetivos específicos propuestos.

La metodología que se explicará a continuación fue realizada para cada variable meteorológica de estudio por separado, lo que conlleva que se tuvo resultados independientes para su posterior comparación en el pronóstico a largo plazo.

3.4.1. Metodología para el análisis del comportamiento temporal de las variables meteorológicas de estudio

Con el fin de lograr el objetivo específico uno se analizó el comportamiento temporal de las variables predictoras de estudio, para ello se tendrá que realizar un análisis exploratorio y análisis de series temporales.

3.4.1.1. Análisis exploratorio

La variable meteorológica de estudio fue evaluada mediante el análisis exploratorio para determinar su comportamiento temporal a lo largo del periodo de estudio. Este análisis

implica examinar el conjunto de datos antes de ejecutar cualquier investigación con el fin de la evaluación de la calidad y distribución de estos datos (Komorowski et al., 2016).

Según el objetivo del análisis, se emplean diferentes técnicas estadísticas que dependen del tipo de la variable de estudio, tales como: histogramas, gráfico de líneas (line plot), gráficos de dispersiones, mapas de calor, diagrama de tallos y cajas (boxplots), etc. (Komorowski et al., 2016). Este último se escogió debido al mayor contenido de información de la distribución estadística del conjunto de datos.

El diagrama de cajas o bigotes es una herramienta gráfica estadística que permite visualizar la distribución de los datos en una figura de caja cuadrada, en la que está delimitada por la parte superior e inferior por cuartiles (Q_3 y Q_1 respectivamente) y como parte central la mediana (Q_2). Por otro lado, los bigotes se extienden desde la caja hasta los dos valores extremos “outliers” tal como se observa en la Figura 23 (Wilks, 2006).

Se escogieron los conjuntos de datos por cada longitud para cada mes del año, de esta forma se efectuó para el análisis del comportamiento de la variable a lo largo del periodo de estudio.

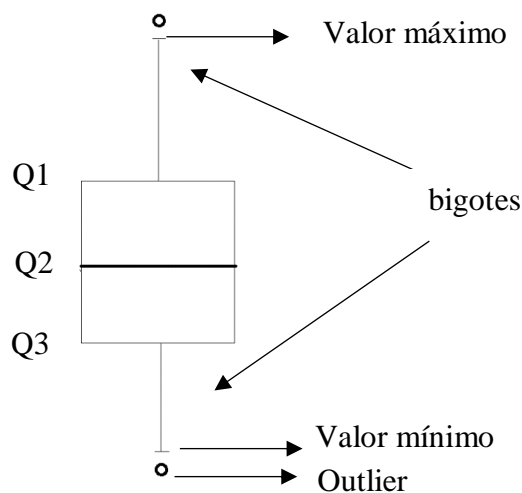


Figura 23. Representación gráfica del diagrama de cajas o bigotes
FUENTE: Williamson et al., (1989) adaptación propia

3.4.1.2. Análisis de series temporales

Una vez realizado el análisis exploratorio de cada serie de tiempo por cada nodo del área de estudio, se procedió a verificar si estas series de tiempo cumplen con la propiedad de ser estacionarias, es decir que cuando su media y su varianza no varíen estadísticamente e independiente del tiempo (Guevara, 2014).

Para lograr el mayor grado posible de efectividad de los pronósticos, estas series de tiempo se requieren que cumplan con la estacionariedad debido a que se ajustan a un modelo donde la distribución es conocida. (Montgomery et al., 2008).

Para determinar la estacionariedad de las series temporales con más precisión, se analizaron mediante la prueba de Dickey-Fuller aumentada (ADF), proponen como hipótesis nula la no estacionariedad de la serie debido a la presencia de al menos una raíz unitaria, esta última muestra un patrón que es impredecible es por ello que se busca rechazar (Ramírez, 2020).

Se ingresaron las series temporales de cada variable de estudio en el software XLSTAT, en caso de que no cumpliera con la estacionariedad se procedió a eliminar el nodo del área de estudio.

3.4.2. Metodología para el pronóstico según la obtención de la fuerza enlace deseada a través de la implementación del algoritmo de detección cooperativa

Como parte central de la investigación y lograr el objetivo específico dos se tuvo como referencia el modelo de Ludescher en la inspección de teleconexiones emergentes (2013) a través del cálculo de las correlaciones cruzadas de las anomalías diarias de las variables meteorológicas de estudio.

3.4.2.1. Metodología para el cálculo de anomalías diarias de las variables meteorológicas de estudio

Para el cálculo de anomalías diarias de las variables meteorológicas de estudio, primero se debe hallar las climatologías de cada nodo de área de estudio que pasaron la prueba de estacionariedad evaluadas anteriormente.

La climatología correspondiente a cada nodo seleccionado se basó según lo estipulado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en la Guía de Prácticas Climatológicas N°100, en la cual manifiesta que la normal climatológica se centra en el valor medio de un elemento climático durante un periodo de tiempo, de tal forma que tanto para la humedad relativa como el agua precipitable se usó la media o promedio aritmético por mes (climatología mensual). Además, para el promedio la OMM recomienda tener un registro de datos de 30 años tomando a partir del año que termina en el dígito 1 hasta el inicio de cada década; sin embargo, en el contexto del seguimiento del cambio climático se sugiere realizar los cálculos más frecuentes. Para esta investigación se eligió como climatología base desde el año 1981 al 2010 para el periodo de estudio.

Una vez obtenida la climatología o normal mensual de cada nodo (12 valores en total por cada mes del año) se realizó la técnica de suavizamiento mediante “spline” para aumentar las señales de los patrones climáticos al tiempo que reduce el ruido provocado por las fluctuaciones aleatorias para así convertirlas en normales diarias (OMM, 2011). Esto supone la interpolación de valores de 12 a 365 datos correspondientes a cada día del año.

Los datos de la serie temporal de cada nodo fueron restados con su normal diaria suavizada según el tiempo que corresponda, de esta manera se obtuvieron las anomalías diarias tal como se muestra en la siguiente ecuación.

$$T'(d/m/a) = T(d/m/a) - \bar{T}(d/m) \quad \text{Ec. 12}$$

Donde $T'(d/m/a)$ es la anomalía diaria obtenida a partir de la resta del dato del modelo NCEP/NCAR Reanalysis-1 ($T(d/m/a)$) con la normal diaria suavizada ($\bar{T}(d/m)$) para cada día “d” del mes “m” y del año “a” de cada nodo del área de estudio

3.4.2.2. Metodología para el cálculo de las correlaciones cruzadas de las anomalías diarias de las variables meteorológicas de estudio

Como parte central de la investigación se tuvo como referencia el modelo de Ludescher en la inspección de teleconexiones emergentes. Este modelo o algoritmo publicado en el año 2013, consiste en evaluar la evolución temporal de las interacciones de los nodos entre la región Niño con los demás nodos del área de estudio exteriores a la cuenca del Niño de acuerdo al comportamiento cooperativo que las variables atmosféricas presentan.

Para la obtención de la evolución temporal de las interacciones entre los nodos se procedió a calcular la correlación cruzada entre las series temporales de las anomalías diarias de las variables atmosféricas de estudio de un nodo que se ubique dentro de la región Niño (nodo i) con otro nodo del área de estudio que se encuentre fuera de la región Niño (nodo j) tal como se muestra en la Figura 21.

La finalidad del uso de la correlación cruzada entre dos series temporales fue para determinar el grado de asociación existente entre las series de un tiempo t (cada décimo día).

Según Guevara Díaz en su publicación “Uso correcto de la correlación cruzada en Climatología” sostiene que la correlación cruzada entre dos series temporales, para un retardo (lag) positivo $r_{xy(k)}$ (ecuación 13), para un retardo negativo $r_{yx(-k)}$ (ecuación 14) y un

retardo cero (se puede usar cualquiera de las dos ecuaciones o la ecuación 15 teniendo en consideración el valor de k igual a cero) se obtiene de la siguiente manera.

$$r_{x,y(k)}^{(t)} = \frac{\sum[(X_t - \mu_x) \times (Y_{t+k} - \mu_y)]}{S_x \times S_y} = \sum \left[\left(\frac{X_t - \mu_x}{S_x} \right) \times \left(\frac{Y_{t+k} - \mu_y}{S_y} \right) \right] \text{ en lag +} \quad \text{Ec.13}$$

$$r_{x,y(-k)}^{(t)} = \frac{\sum[(Y_t - \mu_y) \times (X_{t+k} - \mu_x)]}{S_x \times S_y} = \sum \left[\left(\frac{Y_t - \mu_y}{S_y} \right) \times \left(\frac{X_{t+k} - \mu_x}{S_x} \right) \right] \text{ en lag -} \quad \text{Ec. 14}$$

$$r_{x,y(k=0)}^{(t)} = \frac{\sum[(X_t - \mu_x) \times (Y_t - \mu_y)]}{S_x \times S_y} = \sum \left[\left(\frac{X_t - \mu_x}{S_x} \right) \times \left(\frac{Y_t - \mu_y}{S_y} \right) \right] \text{ en lag = 0} \quad \text{Ec.15}$$

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum(X_t - \mu_x)^2}{N}} \quad \text{Ec. 16 (a)}$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum(Y_t - \mu_y)^2}{N}} \quad \text{Ec.16 (b)}$$

Donde:

- X_t , X_{t+k} , valor de un dato en el tiempo, t, y el dato en el tiempo k, en la serie independiente y estacionaria.
- Y_t , Y_{t+k} , valor de un dato en el tiempo, t y el dato en el tiempo k en la serie dependiente y estacionaria
- S_x y S_y , desviación estándar poblacional de las series X_t y Y_t , respectivamente.
- N, número de pares de datos de las series X_t y Y_t .
- μ_x y μ_y , medias de las series X_t y Y_t , respectivamente
- k, retardo (lag) entre una observación en tiempo t y otra en tiempo posterior o anterior, k: 0, ± 1 , ± 2 ... $\pm N-1$
- N, S_x , S_y , μ_x y μ_y corresponden a la serie de lag cero y se mantienen constantes en los demás lags

(Fuente: Guevara,2014).

En cálculo se hizo mediante el software R previa modificación de los resultados de las correlaciones cruzadas halladas en valores absolutos para retardos de tiempo k entre 0 a 200 días, donde se puede garantizar una estimación confiable del nivel de ruido de fondo (Ludescher et al., 2013).

Dado que el modelo está implementado para el pronóstico con un año de antelación, se evaluó la correlación cruzada de dos series temporales con una amplitud de 365 días para un

tiempo t cada 10 días con un valor de retardo k igual a 200, de la misma forma para las combinaciones totales de los nodos de estudio de las series temporales para un tiempo t.

3.4.2.3. Metodología para el cálculo de la fuerza enlace deseada como pronóstico a largo plazo

A. Cálculo de la fuerza enlace deseada

Para la cuantificación de las teleconexiones dinámicas entre los nodos i y j se empleó un nuevo término denominado fuerza enlace $S_{i,j}(t)$ en el día t en relación al nivel de ruido, que fue definido como la diferencia entre el valor máximo y el valor promedio, dividido entre la desviación estándar de las correlaciones cruzadas, este proceso intuye a una estandarización de los datos para la obtención de medias aritméticas a una nueva escala (Ludescher et. al, 2013). La fórmula para su obtención se define de la siguiente manera.

$$F. E. (i,j) = \frac{\max. - \bar{x}}{SD} (t) \quad \text{Ec. 17}$$

Donde F.E. es la fuerza enlace calculada de la resta del valor máximo (max.) menos la media aritmética (\bar{x}), dividido entre la desviación estándar de los valores absolutos de las correlaciones cruzadas por cada combinación de las series de 365 datos de los nodos i y j evaluados cada décimo día t.

Luego de haber calculado la fuerza enlace por cada tiempo t de cada combinación de los nodos de estudio, se promediaron todas las combinaciones por cada tiempo t para la obtención de la fuerza enlace deseada “S”, que resultó la base para la determinación del pronóstico a largo plazo.

$$S_{(t)} = \overline{F. E. (i,j)}_{(t)} \quad \text{Ec.18}$$

Donde

S es la fuerza enlace deseada calculada a partir del promedio de la fuerza enlace de cada combinación por cada tiempo t. Tanro la ecuación 17 y 18 se ejecutaron mediante el software R.

B. Determinación del umbral de pronóstico

Para la determinación del umbral (θ) adecuado para el pronóstico, la fuerza enlace deseada se dividió en 2 partes, la primera parte fue establecido a manera de prueba que comprende desde el año 1953 al 1980 y la segunda parte fue la fase de pronóstico que abarca desde el año 1981 al 2020.

En la fase de prueba se halló el umbral de pronóstico tabulando los valores de las fuerzas enlaces deseadas, para ello se realizó la comparación de estas fuerzas con el índice ONI. Cuando esta fuerza enlace deseada tiende a aumentar, crece la cooperación entre la cuenca de El Niño y los sitios circundantes en el área del Pacífico, y si esta cruza el umbral desde abajo y el índice ONI esté por debajo de $0,5^{\circ}\text{C}$ se dio el aviso de alarma, y por ende predecir que un evento El Niño comenzará al siguiente año calendario (Ludescher et al., 2013).

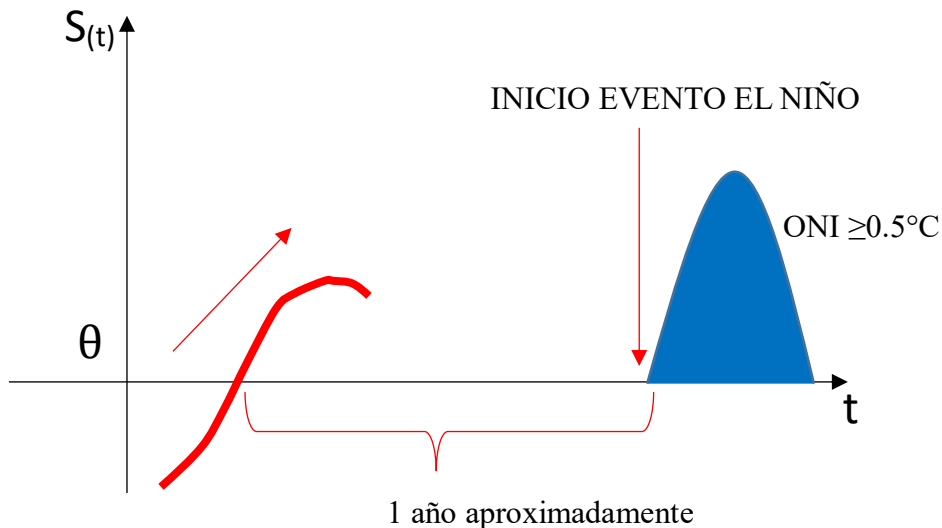


Figura 24. Representación gráfica del pronóstico ideal luego de la determinación del umbral (θ)

FUENTE: Elaboración propia (2023)

3.4.3. Metodología para la validación del pronóstico a largo plazo

El umbral de pronóstico escogido fue validado estadísticamente en la fase de prueba, para ello se empleó una tabla de contingencia de doble entrada que fue dividida en 2 secciones: pronosticados y observados, tal como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3: Tabla de contingencia 2x2 del pronóstico a largo plazo

		OBSERVADOS	
		SI	NO
PRONOSTICADOS	SI	a	b
	NO	c	d

Donde la sección de pronosticados abarca los valores de la fuerza enlace deseada mientras que los valores observados resultan de la identificación de los eventos “El Niño” a través del registro histórico y el índice ONI.

El valor de “a” corresponde los casos en que la alarma se activó y al siguiente año calendario se inició un evento “El Niño”, el valor de “b” reúne también los casos en que se activa la alarma, pero no ocurrió el inicio de un evento “El Niño”.

Para el caso en que no se active la alarma, pero si se dio el inicio de un evento “El Niño” corresponde al valor de “c”, mientras que el valor de “d” son casos en que no se activa la alarma ni el inicio de un evento “El Niño”.

Como parte final de la validación estadística del pronóstico a largo plazo se calculó los atributos escalares siendo los más importantes la tasa de acierto que mide la relación de pronósticos correctos al número de veces que este evento ha ocurrido (ecuación 19) y la falsa de alarma (ecuación 20) al número total de la no ocurrencia de los eventos “El Niño” (Wilks, 2006).

$$\text{TASA DE ACIERTOS} = \frac{a}{a+c} \quad \text{Ec. 19}$$

$$\text{FALSA ALARMA} = \frac{b}{b+d} \quad \text{Ec.20}$$

El umbral escogido que comprende en la fase de prueba debe tener el valor máximo de tasa de aciertos y a su vez el valor mínimo de falsa alarma, esto puede interpretarse que la resta de la primera con la segunda tiene que ser el máximo valor absoluto posible.

Una vez escogido el umbral de pronóstico, se realizó el mismo procedimiento de la determinación del umbral, pero esta vez con la comparación con el índice ONI fue con el

umbral establecido y su posterior validación estadística explicado anteriormente. En el anexo 6 se detalla el desarrollo para su obtención.

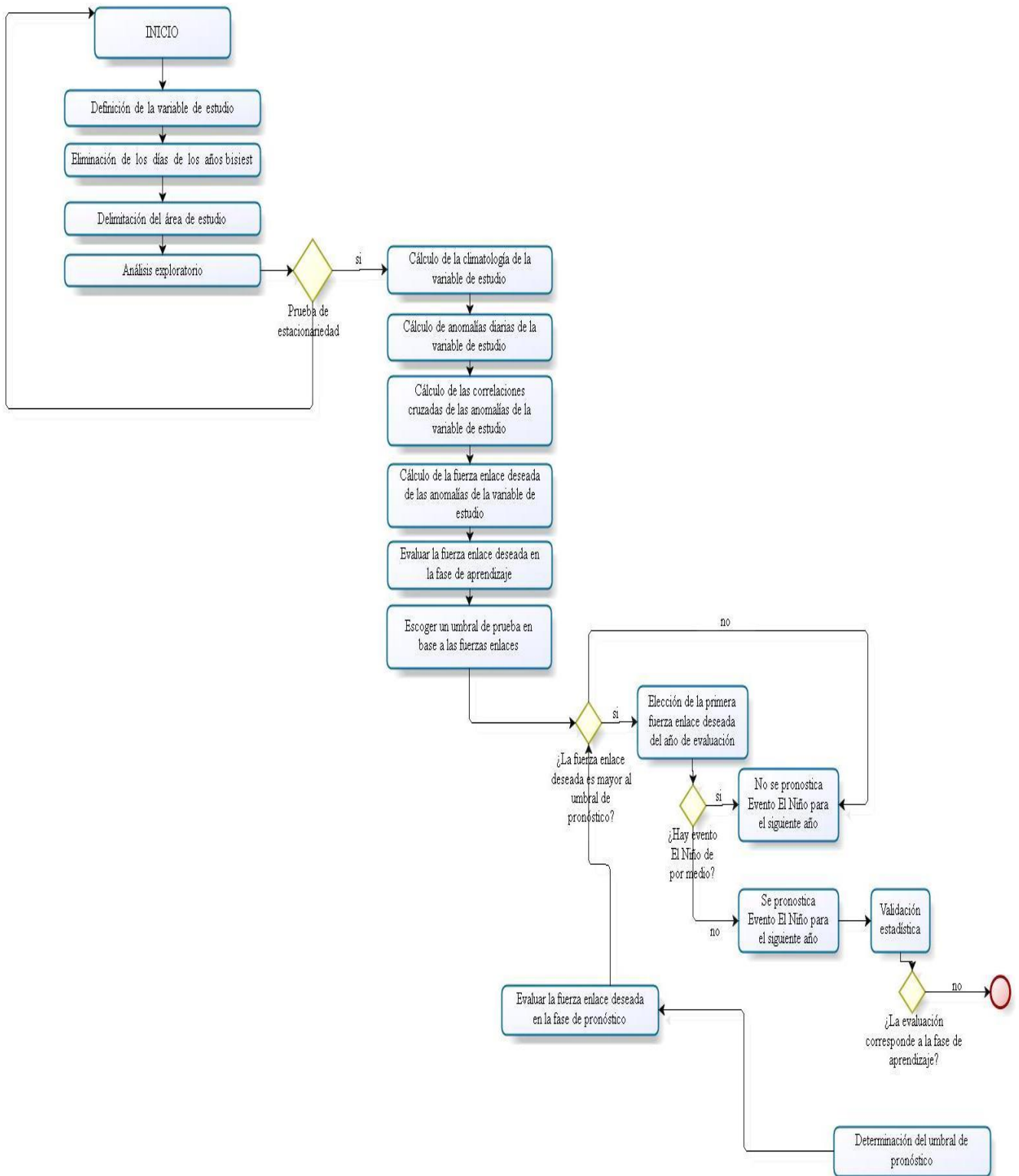


Figura 25. Flujograma del procedimiento metodológico para el pronóstico de largo plazo de eventos "El Niño"

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS VARIABLES ATMOSFÉRICAS DE ESTUDIO PARA DETERMINAR LA ESTACIONARIEDAD

4.1.1. Análisis exploratorio de las variables meteorológicas de estudio

El comportamiento de las variables meteorológicas de estudio entre el año 1950 al 2019 se puede observar desde la Figura 26 a la Figura 43, en la que se muestra los diagramas de cajas por cada latitud del área de estudio en los diferentes meses del año.

A. HUMEDAD RELATIVA

La distribución temporal de la humedad relativa en los nodos de estudio muestra un comportamiento senoidal con valores mayores en los meses de verano correspondiente al hemisferio austral o boreal a comparación de los meses de invierno, puesto que el grado de saturación se presenta más alto en los meses de verano por el contenido de vapor de agua.

Para las latitudes del hemisferio norte, en la latitud 30°N (ver Figura 26), se observa un incremento de valores entre los meses de mayo a julio producto de la estacionalidad, con una mediana mayor al 80% de humedad relativa en el mes de junio, posterior a ese mes muestra una tendencia descendente, también se puede apreciar los valores atípicos llegando a valores de 0% de humedad relativa, estos corresponden a las longitudes extremas del área de estudio. En la latitud de 22.5°N (ver Figura 27), cercano al trópico de Cáncer (23.5°N), se puede apreciar un comportamiento menos senoidal a comparación de la latitud 30°N con valores generalmente próximos a los 80% de humedad relativa durante los meses del año, también presentan valores atípicos, sin embargo, con menores cantidades de valores entre los meses de julio, agosto y setiembre. En la latitud 15°N (ver Figura 28), se observa un comportamiento más uniforme en los meses del año, con valores atípicos más reducidos específicamente entre los meses de junio a setiembre. Para la latitud 7.5°N (ver Figura 29), el tamaño de las cajas durante el año es cada vez más reducido cuanto más se acerca a la

línea ecuatorial reduciéndose el número de valores atípicos con valores cercanos al 40% de humedad relativa.

Para el Ecuador (0°N) se puede observar (ver Figura 30), un comportamiento similar en los meses del año, los valores atípicos son más reducidos a nivel de esta latitud, puesto que la línea ecuatorial no existe un gradiente acentuado de las variables meteorológicas, los valores atípicos mínimos son cercanos al 50% de humedad relativa.

Para las latitudes del hemisferio sur, en la latitud 7.5°S (ver Figura 31), muestra mayor distribución de valores mayores hacia los meses de verano austral, los valores atípicos se observan entre los meses de julio, agosto y setiembre, especialmente en el mes de agosto con valores atípicos mínimos inferiores al 40% de humedad de relativa. En la latitud 15°S (ver Figura 32) los valores atípicos tienden a aumentar a comparación de las latitudes cercanas al Ecuador, llegando incluso a 0% de humedad relativa en el mes de agosto. En la latitud 22.5°S (ver Figura 33) se observa un comportamiento senoidal, con valores mayores en los meses de verano austral y menores en los meses de invierno austral, los valores atípicos varían entre 0% a 60% de humedad relativa durante el año, siendo los meses de verano austral cercanos a 60% y los meses de invierno austral próximos a 40% de humedad relativa. Para la latitud 30°S (ver Figura 34), no muestra valores atípicos máximos a comparación de la misma latitud al hemisferio contrario, el comportamiento es más senoidal con picos en los meses de verano austral y valores mínimos en los meses de invierno austral, con respecto a los valores atípicos mínimos, estos se presentan durante el año entre los valores de 0% y 40% en general.

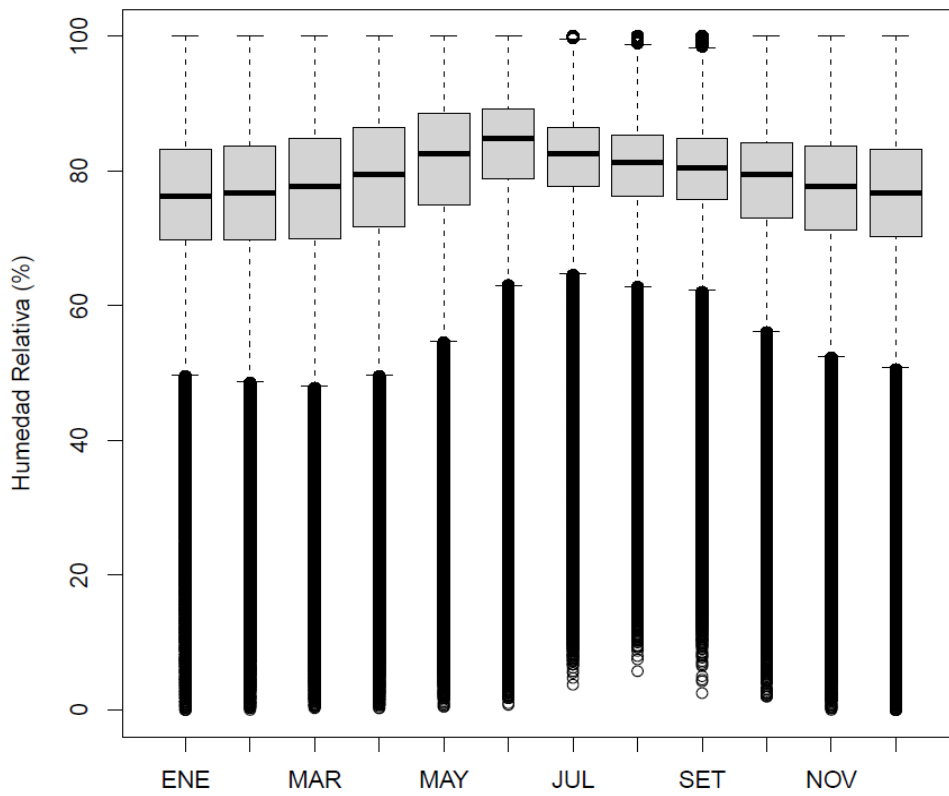


Figura 26. Diagrama de cajas de humedad relativa (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 30°N)

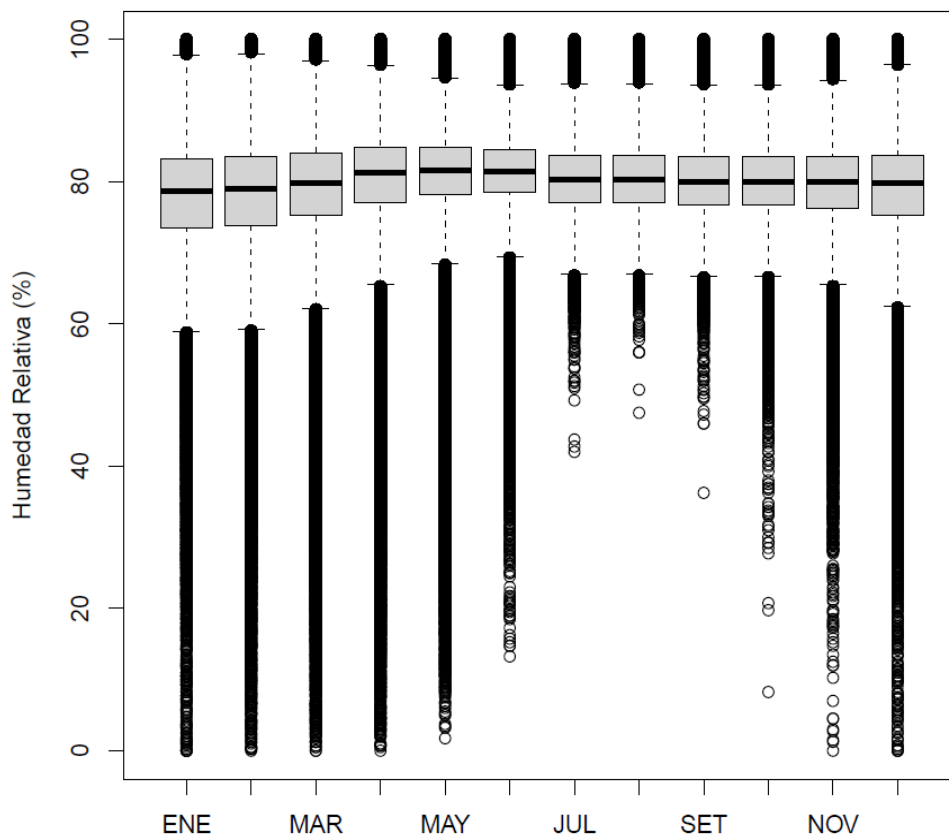


Figura 27. Diagrama de cajas de humedad relativa (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 22.5°N)

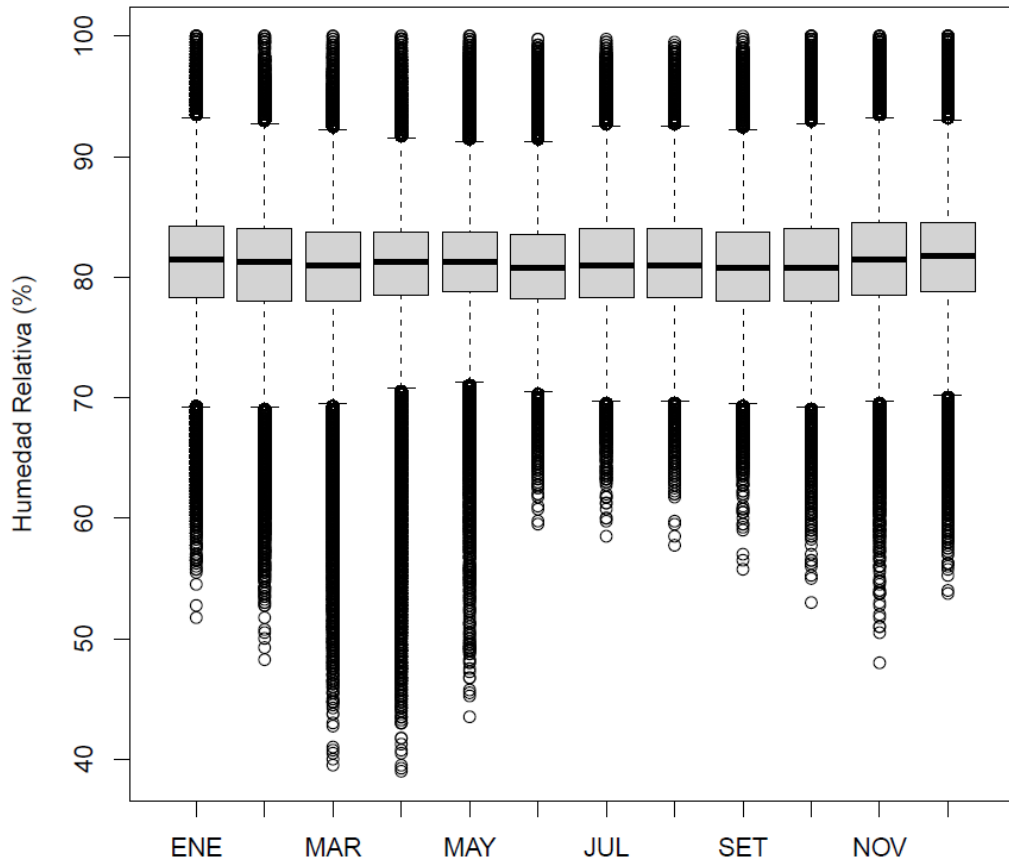


Figura 28. Diagrama de cajas de humedad relativa (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 15°N)

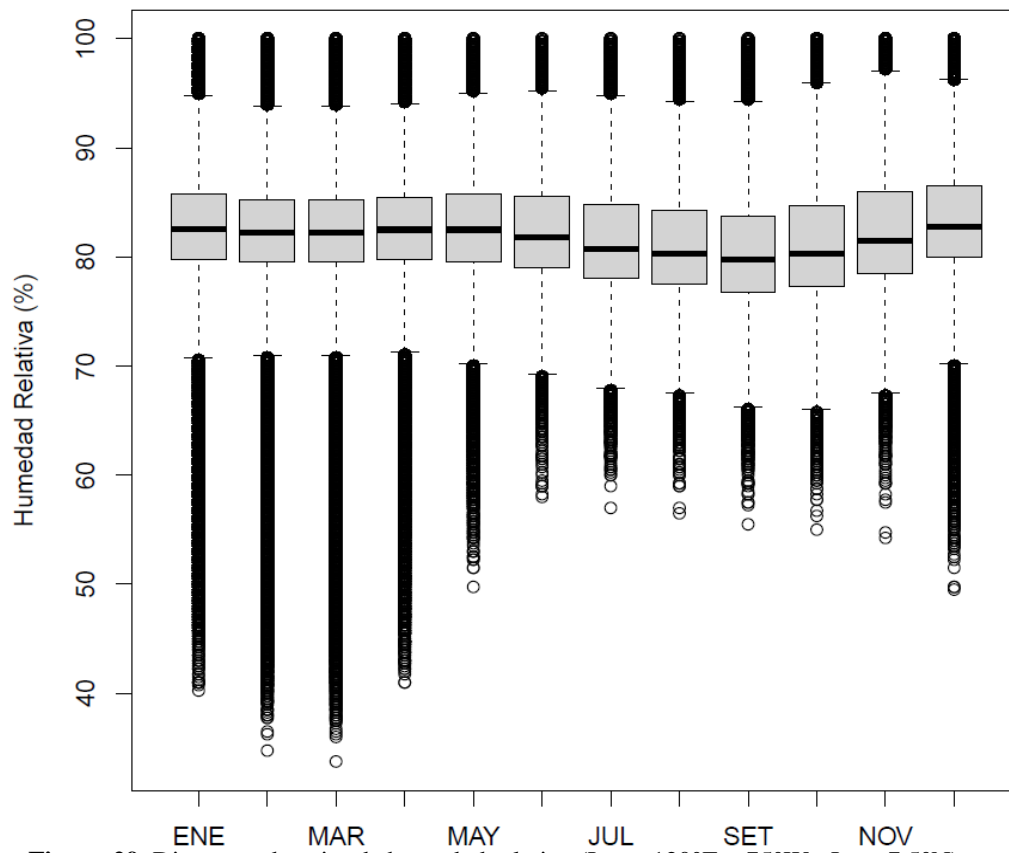


Figura 29. Diagrama de cajas de humedad relativa (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 7.5°N)

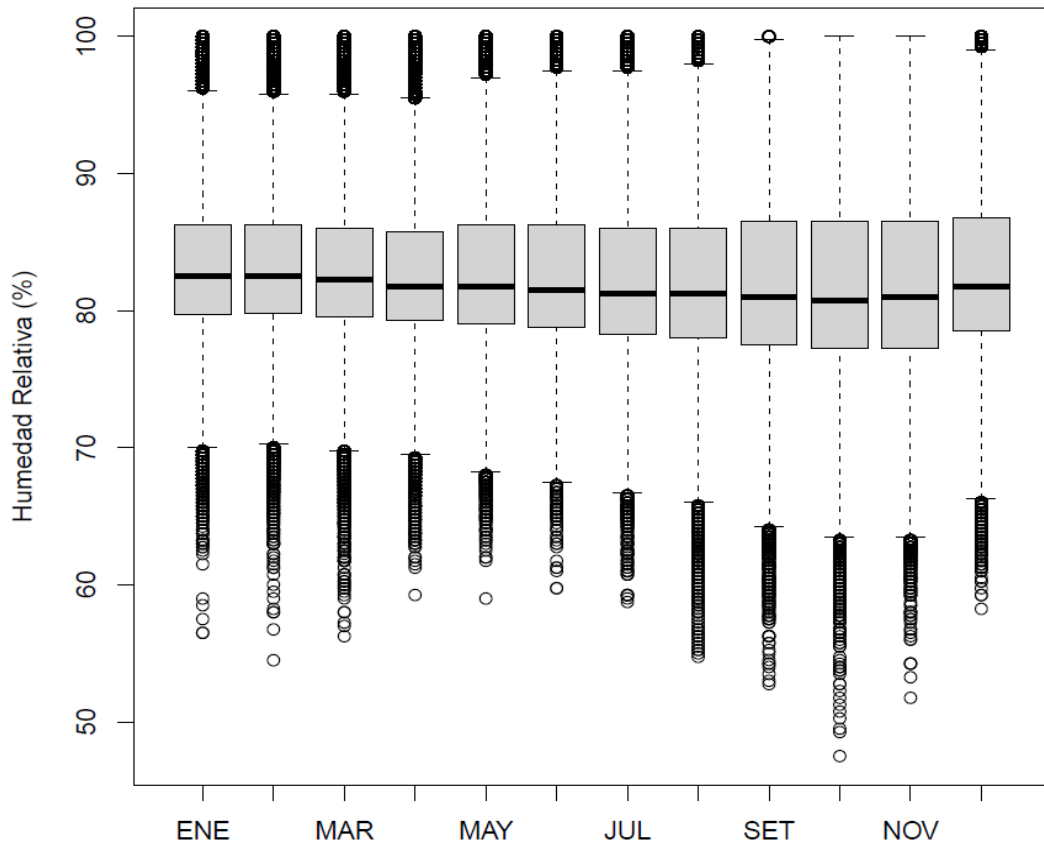


Figura 30. Diagrama de cajas de humedad relativa (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 0°N)

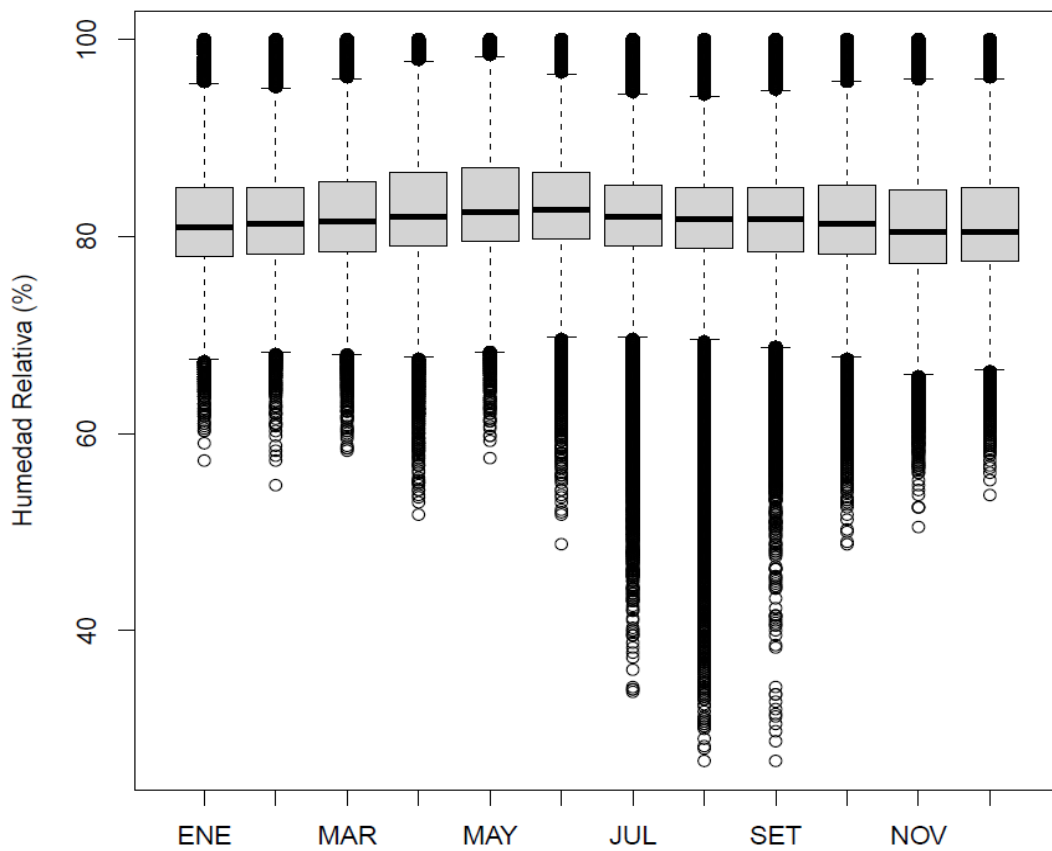


Figura 31. Diagrama de cajas de humedad relativa (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 7.5°S)

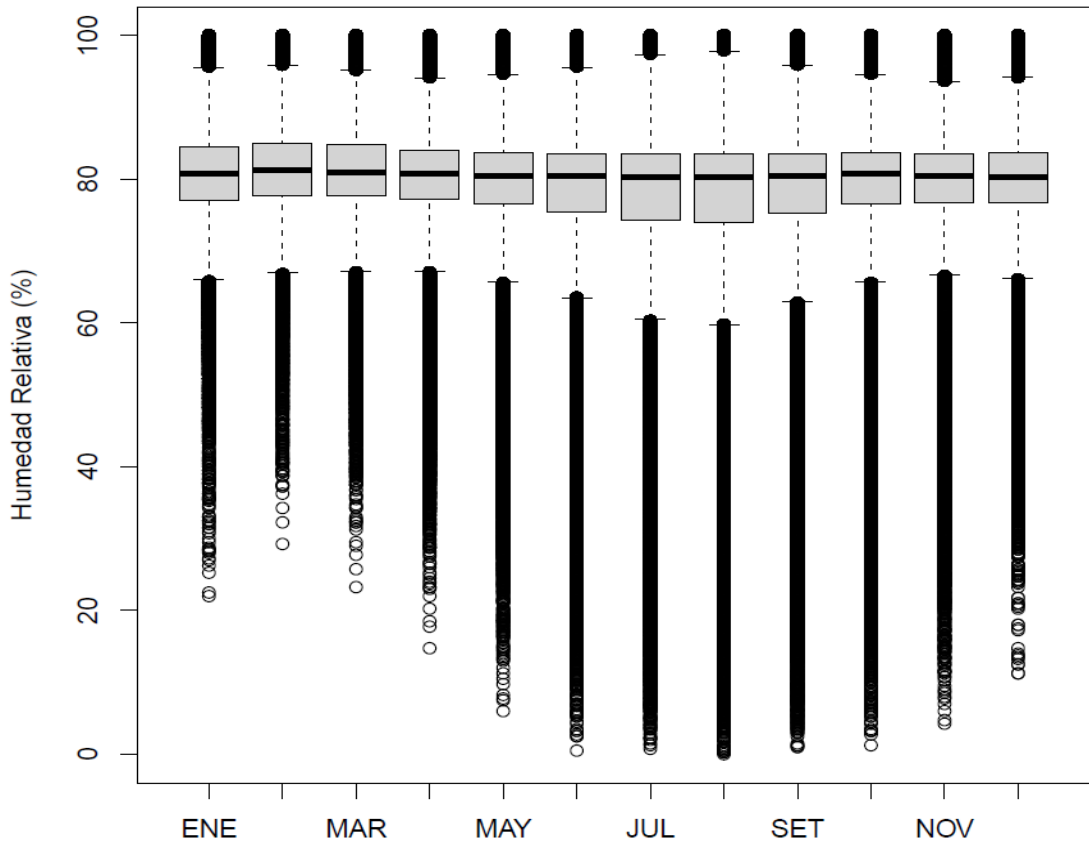


Figura 32. Diagrama de cajas de humedad relativa (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 15°S)

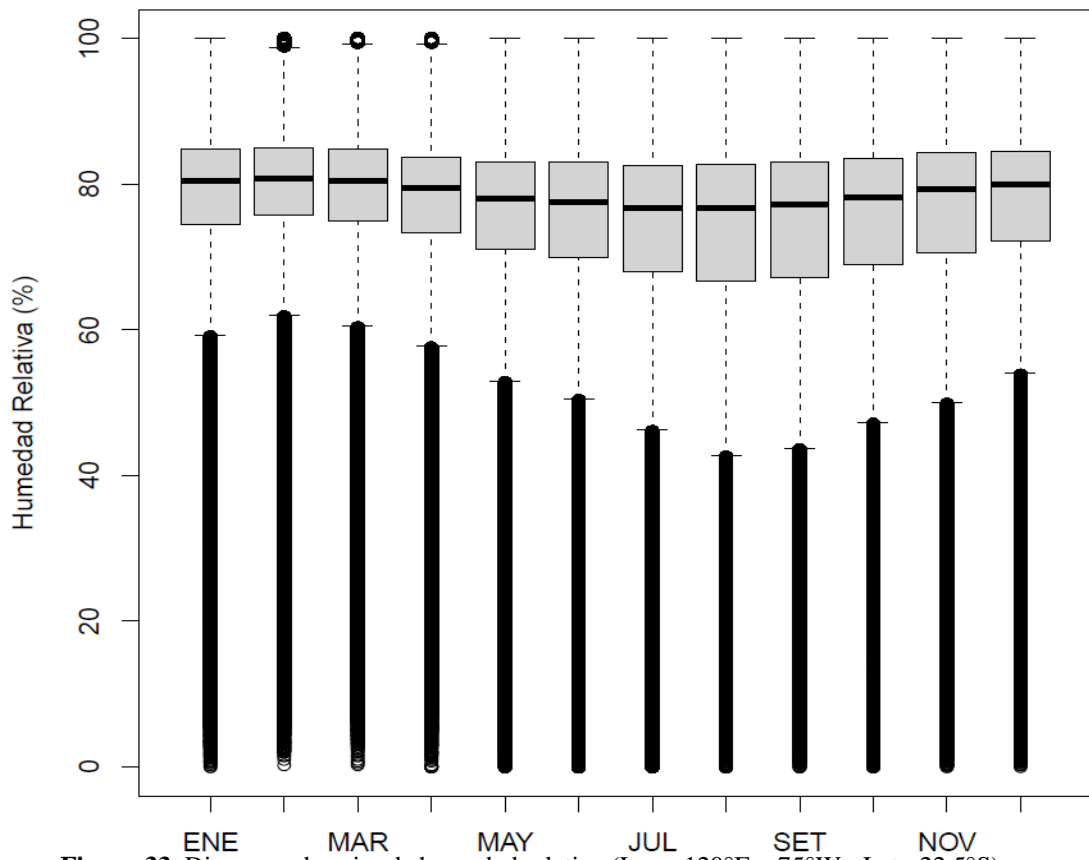


Figura 33. Diagrama de cajas de humedad relativa (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 22.5°S)

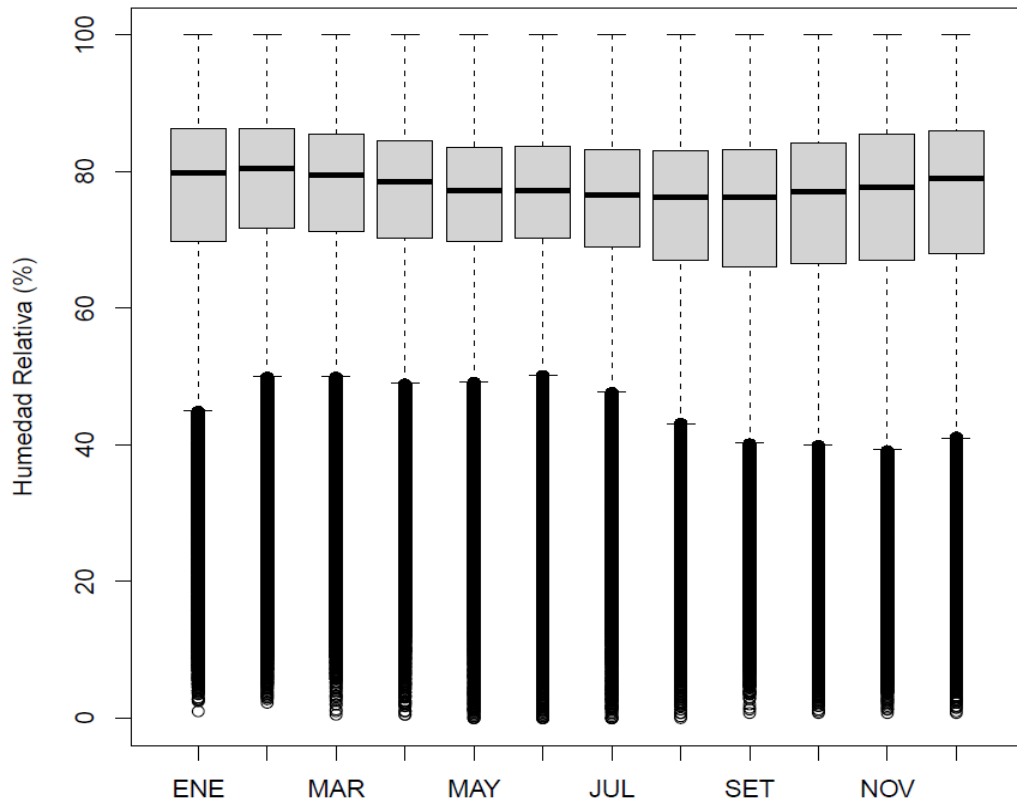


Figura 34. Diagrama de cajas de humedad relativa (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 30°S)

B. AGUA PRECIPITABLE (PWAT)

La distribución temporal del agua precipitable en los nodos de estudio muestra un comportamiento similar al de la variable meteorológica anterior, en latitudes altas los valores más altos se dieron entre los meses de julio a setiembre producto de la estacionalidad, mientras que en latitudes bajas se dieron entre los meses de diciembre a marzo, esto afirma que el mayor contenido del agua precipitable se da entre los meses de verano mientras que los más bajos en los meses de invierno.

Para las latitudes del hemisferio norte, se observa en la Figura 35, el comportamiento temporal a una latitud de 30°N, entre los meses de julio a setiembre existe mayor concentración de valores altos, de igual forma los valores extremos se dieron en esos meses, mientras que, en los meses de invierno austral, los valores medios fueron próximos al 20 kg/m². En la Figura 36, se muestra el comportamiento para la latitud de 22.5°N, similar a la latitud superior, los mayores valores concentrados se dieron en los meses de julio a setiembre coincidiendo con el verano austral, sin embargo, los valores se incrementaron a comparación de la latitud 30°N. En la Figura 37 corresponde a la latitud de 15°N, se observa un comportamiento senoidal con mayor concentración de valores altos entre los meses de agosto y setiembre, los valores extremos persisten tanto como mínimos y máximos con

mayor énfasis en los meses de invierno boreal. En la Figura 38, para la latitud de 7.5°N , el comportamiento es más lineal a comparación de las demás latitudes del hemisferio norte, mostrando de igual forma los valores extremos en todos los meses del año.

Para la latitud del Ecuador (ver Figura 39), se muestra un cambio en la tendencia de las cajas de agua precipitable, existe mayor concentración entre los meses de diciembre a marzo, mientras que la dispersión aumenta entre los meses de setiembre a noviembre, los valores medios para esta latitud están próximos entre 40 a 50 kg/m^2 .

Para las latitudes del hemisferio sur, en la latitud de 7.5°N , se observa (ver Figura 40) que los valores están más concentrados hacia los meses de verano austral, mientras los más bajos entre los meses de agosto y setiembre, con respecto a los valores extremos se identificó mayor concentración de valores extremos mínimos en los meses de marzo a junio. En la latitud de 15°S (ver Figura 41), la tendencia senoidal se vuelve más pronunciada para el hemisferio sur, con valores mayores en los meses de diciembre a marzo y menores entre julio y agosto, también se observó la reducción de los valores extremos máximos durante todos los meses del año. Para la latitud de 22.5°S (ver Figura 42), muestra un comportamiento similar al de la latitud anterior mencionada, los valores decrecen conforme se aleja del Ecuador. En la latitud de 30°S (ver Figura 43), existe un decrecimiento en cuanto a los valores conservando la tendencia senoidal propia del hemisferio sur, los valores extremos mínimos son reducidos en cuanto a su concentración, mientras que los valores máximos se ven más reflejados durante todos los meses del año, pero con valores menores próximos a los 60 kg/m^2 .

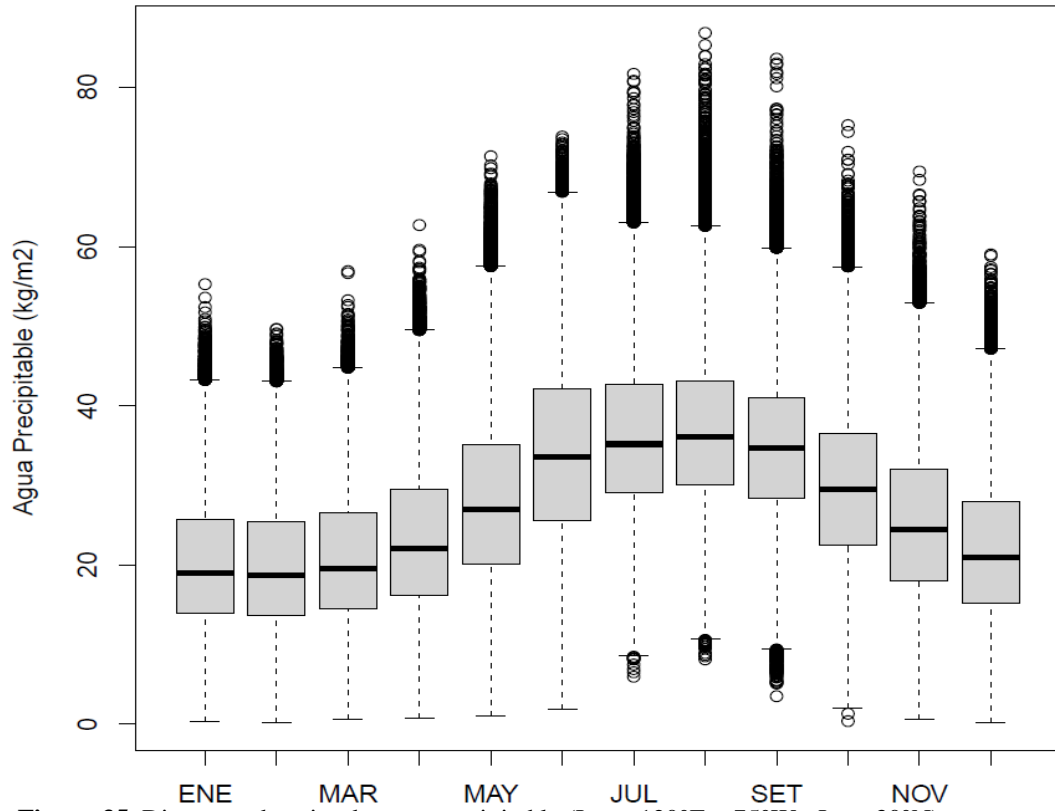


Figura 35. Diagrama de cajas de agua precipitable (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 30°N)

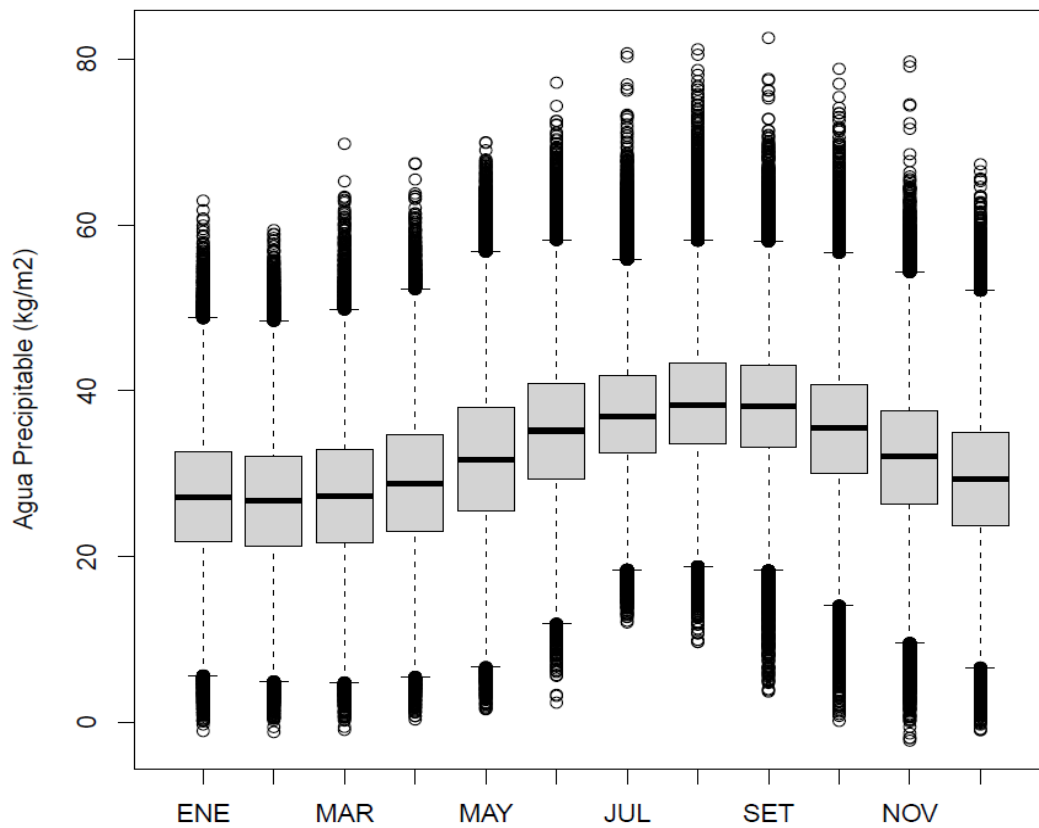


Figura 36. Diagrama de cajas de agua precipitable (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 22.5°N)

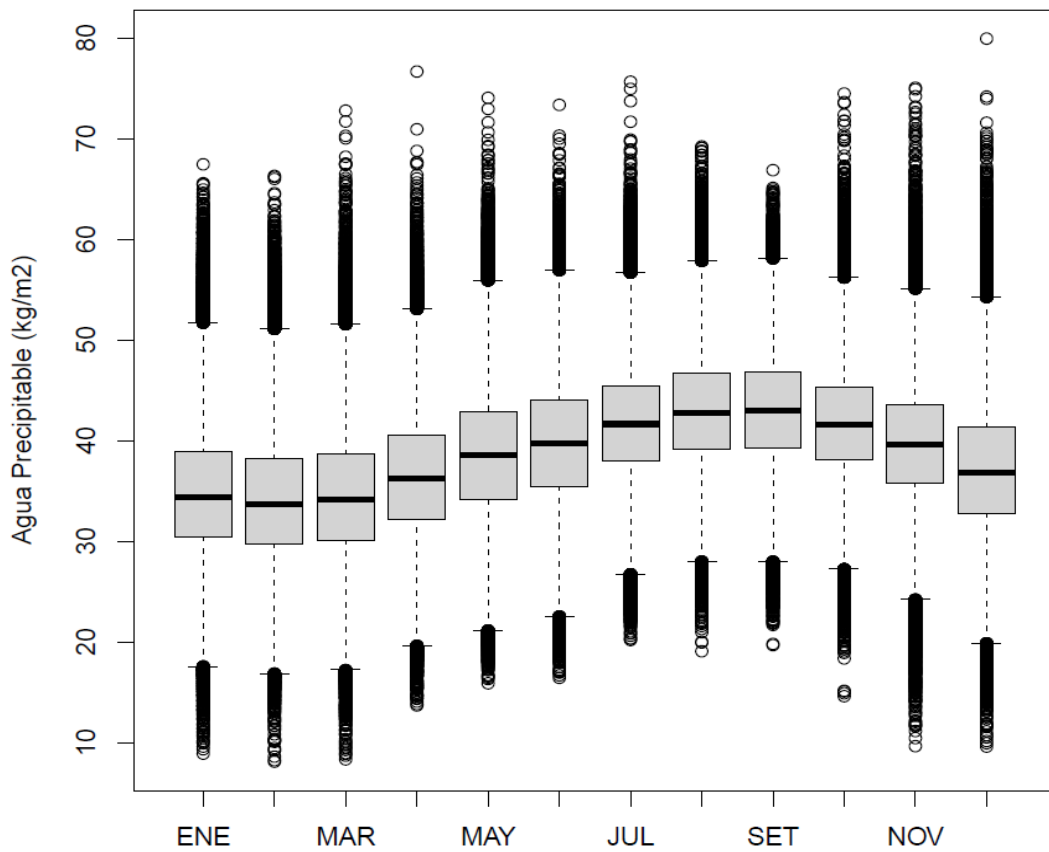


Figura 37. Diagrama de cajas de agua precipitable (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 15°N)

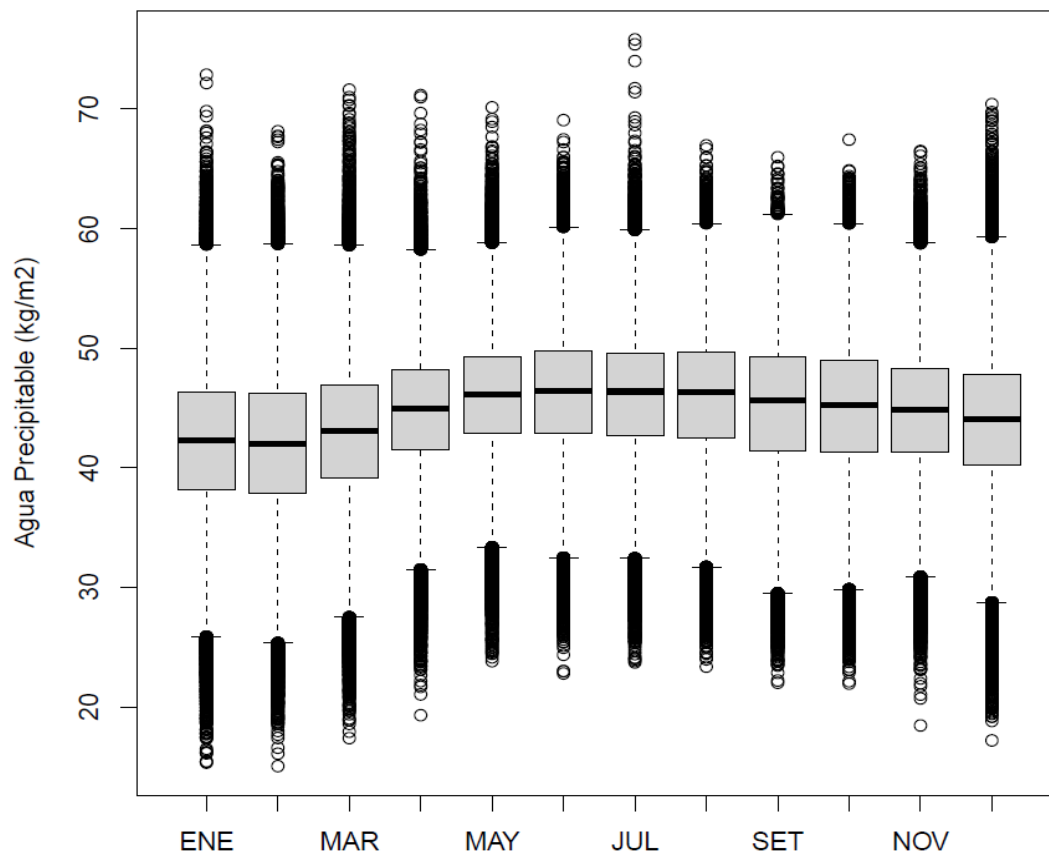


Figura 38. Diagrama de cajas de agua precipitable (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 7.5°N)

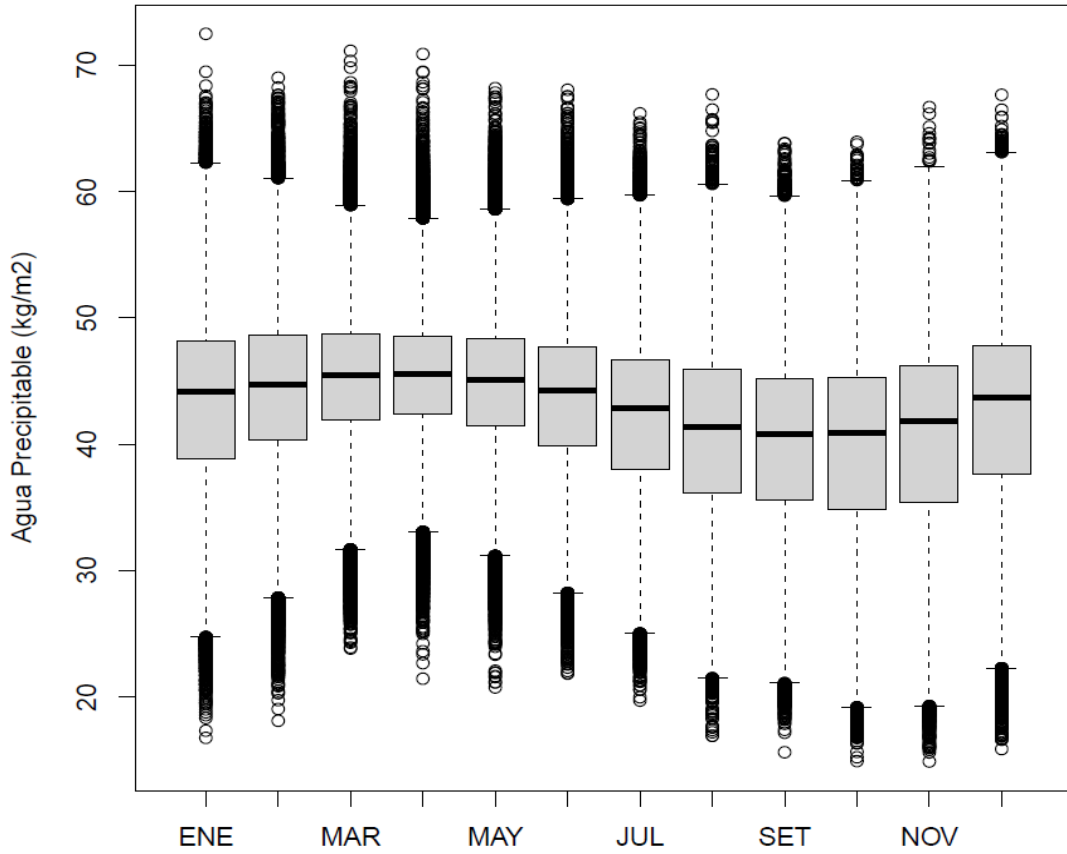


Figura 39. Diagrama de cajas de agua precipitable (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 0°N)

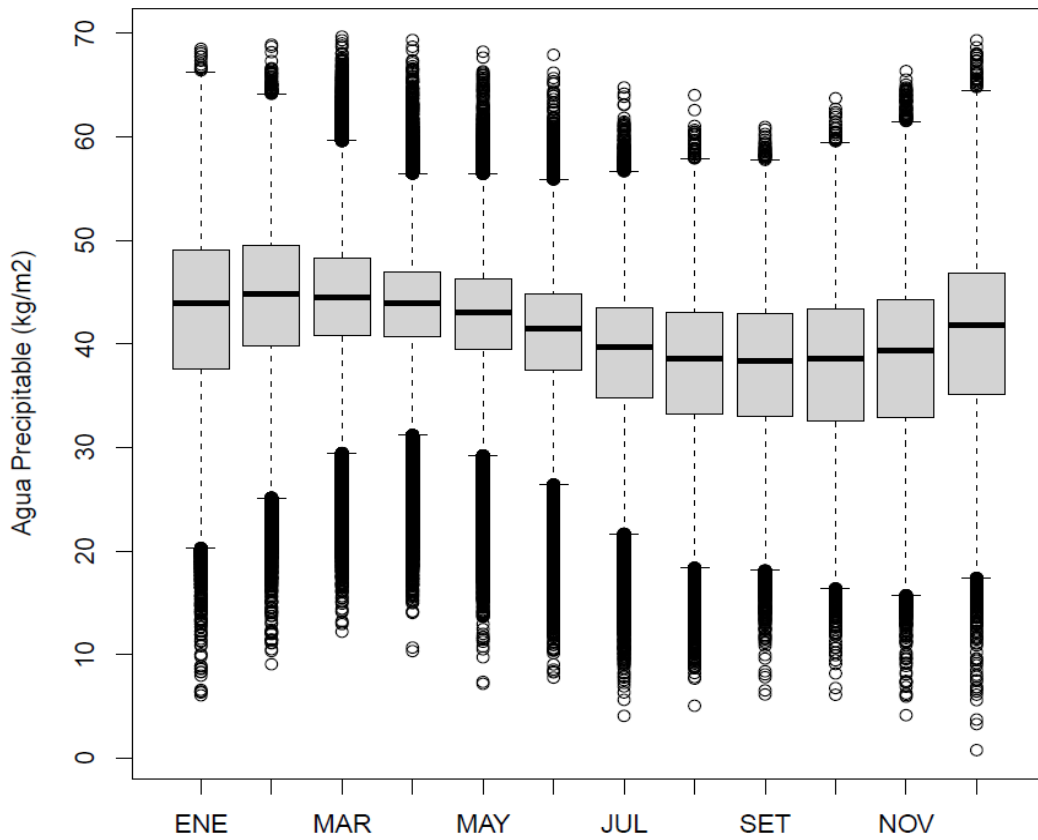


Figura 40. Diagrama de cajas de agua precipitable (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 7.5°S)

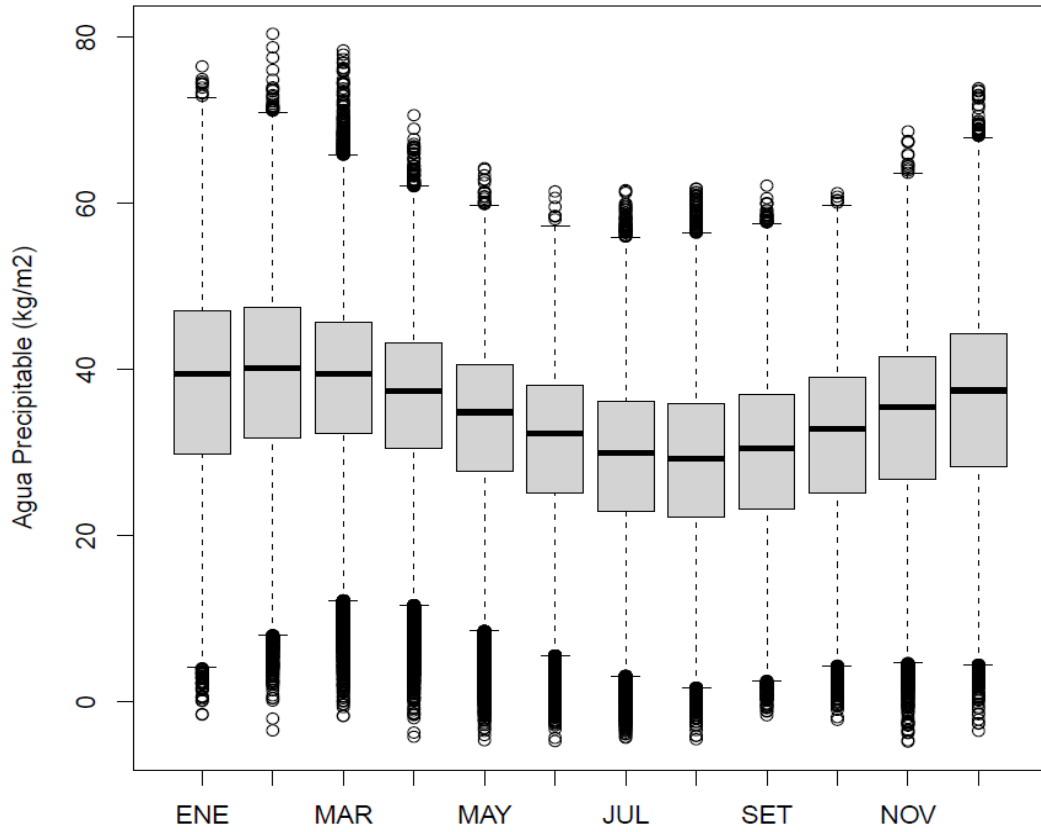


Figura 41. Diagrama de cajas de agua precipitable (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 15°S)

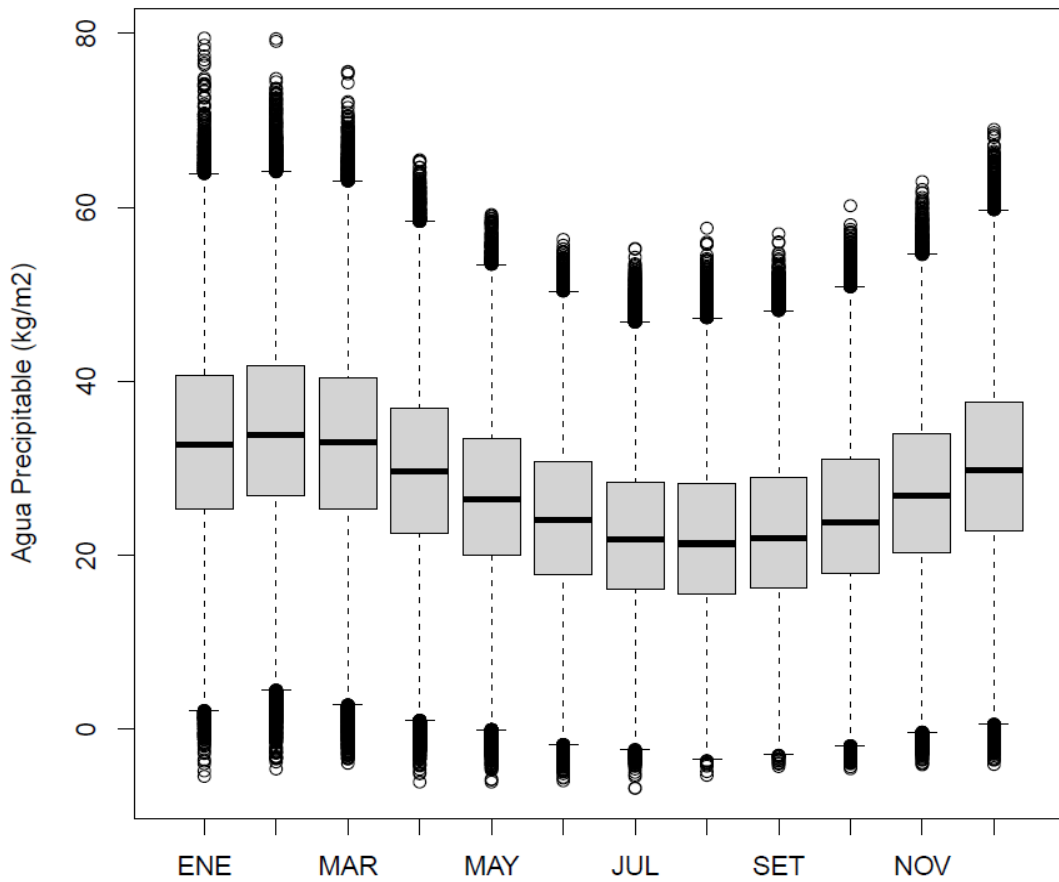


Figura 42. Diagrama de cajas de agua precipitable (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 22.5°S)

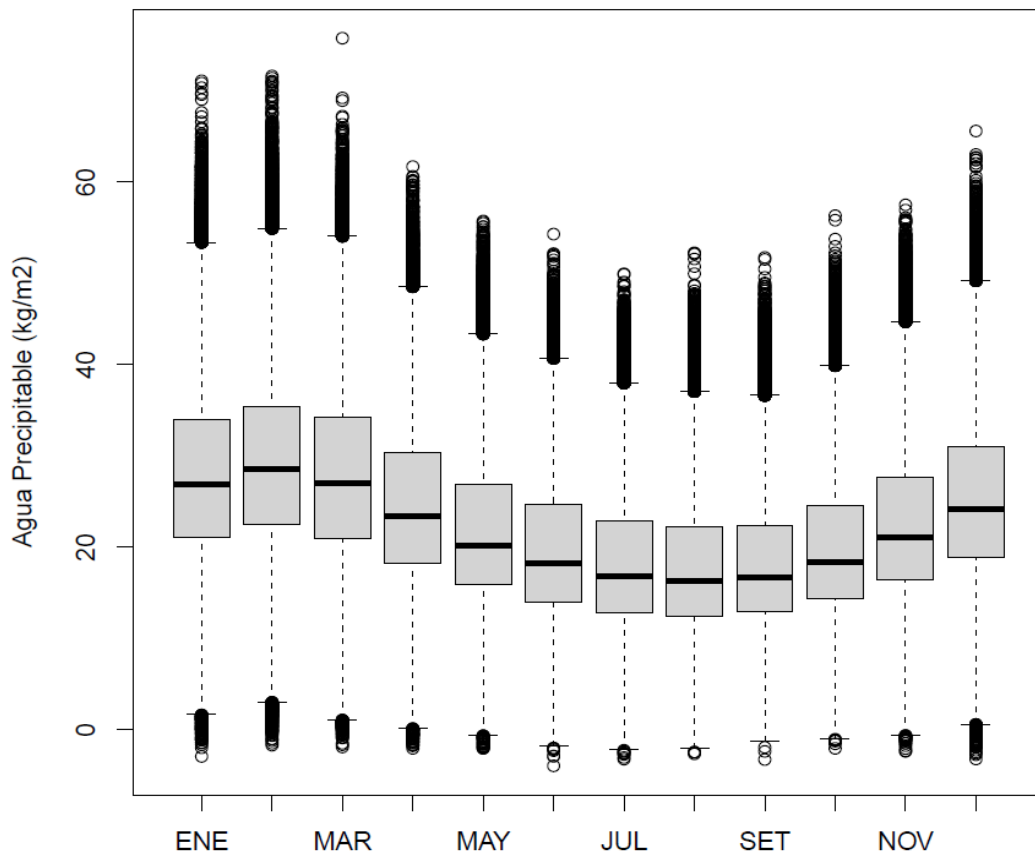


Figura 43. Diagrama de cajas de agua precipitable (Lon.: 120°E – 75°W - Lat.: 30°S)

4.1.2. Prueba de estacionariedad de las variables meteorológicas de estudio

Para la evaluación de la estacionariedad de las series temporales de los nodos de estudio, se escogió la prueba estadística Dickey Fuller Aumentado (ADF), lo cual se hallaron los valores estadísticos para la muestra de datos de cada serie por nodo de estudio (ver tablas 4 y 5), para su posterior planteamiento de prueba de hipótesis para determinar si la serie es estacionaria o no a un grado de significación de 5%. En donde:

Ho: Hay una raíz unitaria para la serie del nodo de estudio.

Ha: No hay una raíz unitaria para la serie del nodo de estudio. La serie es estacionaria.

Para la determinación de la estacionariedad de la serie se debe rechazar la hipótesis nula (Ho) y aceptar la hipótesis alterna (Ha), por ello el estadístico calculado debe ser menor o igual al estadístico tabulado para un nivel de confianza de 95% y un valor p menor a 0.05.

El valor p indica la probabilidad de obtener al azar, una diferencia extrema de lo observado, asumiéndose que no haya una diferencia real en la población de las que provienen las muestras. Para casos de estudio, por convención es usual establecer el valor p de 0.05 (Molina, 2017). Esto quiere decir, que si el valor p es menor del 0.05 es suficientemente

improbable que se deba al azar para poder rechazar la hipótesis nula y, por ende, afirmar que la diferencia sea real. En cambio, si el valor p es mayor del 0.05, no existiría la confianza para poder negar que dicha diferencia observada sea producto del azar.

En la Tabla 4 y Tabla 5 se muestra los valores calculados de la prueba ADF (T_c) para la muestra de datos de humedad relativa y agua precipitable correspondientemente en el periodo de estudio por cada nodo. En todos los nodos se demuestra que el valor estadístico calculado es menor al valor estadístico tabulado ($T_o = -3.341$), ante ello se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna para todos los nodos de estudio a un nivel de significación de 5% y un valor p menor a 0.0001 demostrando que todas las series de los nodos de estudio son estacionarias y son confiables para el pronóstico a largo plazo del evento ENSO “El Niño” para ambas variables meteorológicas de estudio.

Tabla 4: Prueba de ADF para la determinación de estacionariedad de la variable de humedad relativa

Longitud	Latitud	Región	Tc	To	valor p
120°E	30°N	No Niño	-17.610	-3.341	< 0.0001
120°E	22.5°N	No Niño	-22.389	-3.341	< 0.0001
120°E	15°N	No Niño	-18.161	-3.341	< 0.0001
120°E	07.5°N	No Niño	-15.647	-3.341	< 0.0001
120°E	0°N	No Niño	-11.878	-3.341	< 0.0001
120°E	07.5°S	No Niño	-17.909	-3.341	< 0.0001
120°E	15°S	No Niño	-13.207	-3.341	< 0.0001
120°E	22.5°S	No Niño	-22.134	-3.341	< 0.0001
120°E	30°S	No Niño	-13.299	-3.341	< 0.0001
127.5°E	30°N	No Niño	-17.303	-3.341	< 0.0001
127.5°E	22.5°N	No Niño	-21.497	-3.341	< 0.0001
127.5°E	15°N	No Niño	-19.061	-3.341	< 0.0001
127.5°E	07.5°N	No Niño	-13.318	-3.341	< 0.0001
127.5°E	0°N	No Niño	-17.622	-3.341	< 0.0001
127.5°E	07.5°S	No Niño	-18.047	-3.341	< 0.0001
127.5°E	15°S	No Niño	-11.910	-3.341	< 0.0001
127.5°E	22.5°S	No Niño	-16.581	-3.341	< 0.0001
127.5°E	30°S	No Niño	-17.248	-3.341	< 0.0001
135°E	30°N	No Niño	-13.221	-3.341	< 0.0001
135°E	22.5°N	No Niño	-21.354	-3.341	< 0.0001
135°E	15°N	No Niño	-18.472	-3.341	< 0.0001
135°E	07.5°N	No Niño	-13.326	-3.341	< 0.0001
135°E	0°N	No Niño	-15.062	-3.341	< 0.0001
135°E	07.5°S	No Niño	-13.066	-3.341	< 0.0001
135°E	15°S	No Niño	-11.326	-3.341	< 0.0001
135°E	22.5°S	No Niño	-17.433	-3.341	< 0.0001
135°E	30°S	No Niño	-14.453	-3.341	< 0.0001
142.5°E	30°N	No Niño	-13.658	-3.341	< 0.0001
142.5°E	22.5°N	No Niño	-20.346	-3.341	< 0.0001
142.5°E	15°N	No Niño	-18.895	-3.341	< 0.0001
142.5°E	07.5°N	No Niño	-13.746	-3.341	< 0.0001
142.5°E	0°N	No Niño	-16.473	-3.341	< 0.0001
142.5°E	07.5°S	No Niño	-15.036	-3.341	< 0.0001
142.5°E	15°S	No Niño	-10.530	-3.341	< 0.0001
142.5°E	22.5°S	No Niño	-14.689	-3.341	< 0.0001
142.5°E	30°S	No Niño	-13.481	-3.341	< 0.0001
150°E	30°N	No Niño	-13.624	-3.341	< 0.0001
150°E	22.5°N	No Niño	-20.702	-3.341	< 0.0001
150°E	15°N	No Niño	-17.748	-3.341	< 0.0001
150°E	07.5°N	No Niño	-12.876	-3.341	< 0.0001
150°E	0°N	No Niño	-16.181	-3.341	< 0.0001

Continuación...

Longitud	Latitud	Región	Tc	To	valor p
150°E	07.5°S	No Niño	-16.884	-3.341	< 0.0001
150°E	15°S	No Niño	-20.293	-3.341	< 0.0001
150°E	22.5°S	No Niño	-15.047	-3.341	< 0.0001
150°E	30°S	No Niño	-16.360	-3.341	< 0.0001
157.5°E	30°N	No Niño	-13.484	-3.341	< 0.0001
157.5°E	22.5°N	No Niño	-20.856	-3.341	< 0.0001
157.5°E	15°N	No Niño	-16.774	-3.341	< 0.0001
157.5°E	07.5°N	No Niño	-13.448	-3.341	< 0.0001
157.5°E	0°N	No Niño	-16.576	-3.341	< 0.0001
157.5°E	07.5°S	No Niño	-14.094	-3.341	< 0.0001
157.5°E	15°S	No Niño	-21.998	-3.341	< 0.0001
157.5°E	22.5°S	No Niño	-17.595	-3.341	< 0.0001
157.5°E	30°S	No Niño	-18.133	-3.341	< 0.0001
165°E	30°N	No Niño	-15.132	-3.341	< 0.0001
165°E	22.5°N	No Niño	-20.205	-3.341	< 0.0001
165°E	15°N	No Niño	-18.820	-3.341	< 0.0001
165°E	07.5°N	No Niño	-13.705	-3.341	< 0.0001
165°E	0°N	No Niño	-15.715	-3.341	< 0.0001
165°E	07.5°S	No Niño	-15.719	-3.341	< 0.0001
165°E	15°S	No Niño	-23.379	-3.341	< 0.0001
165°E	22.5°S	No Niño	-18.736	-3.341	< 0.0001
165°E	30°S	No Niño	-20.417	-3.341	< 0.0001
172.5°E	30°N	No Niño	-16.857	-3.341	< 0.0001
172.5°E	22.5°N	No Niño	-19.737	-3.341	< 0.0001
172.5°E	15°N	No Niño	-18.615	-3.341	< 0.0001
172.5°E	07.5°N	No Niño	-14.012	-3.341	< 0.0001
172.5°E	0°N	No Niño	-15.469	-3.341	< 0.0001
172.5°E	07.5°S	No Niño	-16.401	-3.341	< 0.0001
172.5°E	15°S	No Niño	-21.328	-3.341	< 0.0001
172.5°E	22.5°S	No Niño	-19.296	-3.341	< 0.0001
172.5°E	30°S	No Niño	-21.177	-3.341	< 0.0001
180°W	30°N	No Niño	-20.262	-3.341	< 0.0001
180°W	22.5°N	No Niño	-20.561	-3.341	< 0.0001
180°W	15°N	No Niño	-19.368	-3.341	< 0.0001
180°W	07.5°N	No Niño	-13.453	-3.341	< 0.0001
180°W	0°N	No Niño	-14.472	-3.341	< 0.0001
180°W	07.5°S	No Niño	-17.052	-3.341	< 0.0001
180°W	15°S	No Niño	-20.370	-3.341	< 0.0001
180°W	22.5°S	No Niño	-19.808	-3.341	< 0.0001
180°W	30°S	No Niño	-22.035	-3.341	< 0.0001
172.5°W	30°N	No Niño	-20.251	-3.341	< 0.0001
172.5°W	22.5°N	No Niño	-21.367	-3.341	< 0.0001

Continuación...

Longitud	Latitud	Región	Tc	To	valor p
172.5°W	15°N	No Niño	-17.672	-3.341	< 0.0001
172.5°W	07.5°N	No Niño	-14.152	-3.341	< 0.0001
172.5°W	0°N	No Niño	-13.924	-3.341	< 0.0001
172.5°W	07.5°S	No Niño	-15.720	-3.341	< 0.0001
172.5°W	15°S	No Niño	-18.151	-3.341	< 0.0001
172.5°W	22.5°S	No Niño	-20.133	-3.341	< 0.0001
172.5°W	30°S	No Niño	-22.339	-3.341	< 0.0001
165°W	30°N	No Niño	-21.520	-3.341	< 0.0001
165°W	22.5°N	No Niño	-20.960	-3.341	< 0.0001
165°W	15°N	No Niño	-21.622	-3.341	< 0.0001
165°W	07.5°N	No Niño	-14.505	-3.341	< 0.0001
165°W	0°N	Niño	-14.530	-3.341	< 0.0001
165°W	07.5°S	No Niño	-13.988	-3.341	< 0.0001
165°W	15°S	No Niño	-17.022	-3.341	< 0.0001
165°W	22.5°S	No Niño	-19.893	-3.341	< 0.0001
165°W	30°S	No Niño	-20.876	-3.341	< 0.0001
157.5°W	30°N	No Niño	-20.482	-3.341	< 0.0001
157.5°W	22.5°N	No Niño	-18.191	-3.341	< 0.0001
157.5°W	15°N	No Niño	-23.571	-3.341	< 0.0001
157.5°W	07.5°N	No Niño	-16.053	-3.341	< 0.0001
157.5°W	0°N	Niño	-14.916	-3.341	< 0.0001
157.5°W	07.5°S	No Niño	-14.452	-3.341	< 0.0001
157.5°W	15°S	No Niño	-16.719	-3.341	< 0.0001
157.5°W	22.5°S	No Niño	-19.971	-3.341	< 0.0001
157.5°W	30°S	No Niño	-21.705	-3.341	< 0.0001
150°W	30°N	No Niño	-23.476	-3.341	< 0.0001
150°W	22.5°N	No Niño	-21.364	-3.341	< 0.0001
150°W	15°N	No Niño	-22.009	-3.341	< 0.0001
150°W	07.5°N	No Niño	-15.830	-3.341	< 0.0001
150°W	0°N	Niño	-15.856	-3.341	< 0.0001
150°W	07.5°S	No Niño	-14.180	-3.341	< 0.0001
150°W	15°S	No Niño	-16.591	-3.341	< 0.0001
150°W	22.5°S	No Niño	-19.703	-3.341	< 0.0001
150°W	30°S	No Niño	-19.966	-3.341	< 0.0001
142.5°W	30°N	No Niño	-25.099	-3.341	< 0.0001
142.5°W	22.5°N	No Niño	-23.162	-3.341	< 0.0001
142.5°W	15°N	No Niño	-22.515	-3.341	< 0.0001
142.5°W	07.5°N	No Niño	-14.909	-3.341	< 0.0001
142.5°W	0°N	Niño	-16.192	-3.341	< 0.0001
142.5°W	07.5°S	No Niño	-15.527	-3.341	< 0.0001
142.5°W	15°S	No Niño	-15.857	-3.341	< 0.0001
142.5°W	22.5°S	No Niño	-20.729	-3.341	< 0.0001

Continuación...

Longitud	Latitud	Región	Tc	To	valor p
142.5°W	30°S	No Niño	-20.211	-3.341	< 0.0001
135°W	30°N	No Niño	-20.040	-3.341	< 0.0001
135°W	22.5°N	No Niño	-21.248	-3.341	< 0.0001
135°W	15°N	No Niño	-22.873	-3.341	< 0.0001
135°W	07.5°N	No Niño	-13.609	-3.341	< 0.0001
135°W	0°N	Niño	-17.751	-3.341	< 0.0001
135°W	07.5°S	No Niño	-16.211	-3.341	< 0.0001
135°W	15°S	No Niño	-16.995	-3.341	< 0.0001
135°W	22.5°S	No Niño	-21.304	-3.341	< 0.0001
135°W	30°S	No Niño	-22.598	-3.341	< 0.0001
127.5°W	30°N	No Niño	-18.192	-3.341	< 0.0001
127.5°W	22.5°N	No Niño	-21.142	-3.341	< 0.0001
127.5°W	15°N	No Niño	-22.421	-3.341	< 0.0001
127.5°W	07.5°N	No Niño	-13.251	-3.341	< 0.0001
127.5°W	0°N	Niño	-18.304	-3.341	< 0.0001
127.5°W	07.5°S	Niño	-16.079	-3.341	< 0.0001
127.5°W	15°S	No Niño	-21.305	-3.341	< 0.0001
127.5°W	22.5°S	No Niño	-22.181	-3.341	< 0.0001
127.5°W	30°S	No Niño	-23.000	-3.341	< 0.0001
120°W	30°N	No Niño	-11.010	-3.341	< 0.0001
120°W	22.5°N	No Niño	-20.509	-3.341	< 0.0001
120°W	15°N	No Niño	-21.001	-3.341	< 0.0001
120°W	07.5°N	No Niño	-13.319	-3.341	< 0.0001
120°W	0°N	Niño	-16.737	-3.341	< 0.0001
120°W	07.5°S	No Niño	-16.583	-3.341	< 0.0001
120°W	15°S	No Niño	-22.652	-3.341	< 0.0001
120°W	22.5°S	No Niño	-23.951	-3.341	< 0.0001
120°W	30°S	No Niño	-24.845	-3.341	< 0.0001
112.5°W	30°N	No Niño	-19.513	-3.341	< 0.0001
112.5°W	22.5°N	No Niño	-15.228	-3.341	< 0.0001
112.5°W	15°N	No Niño	-19.551	-3.341	< 0.0001
112.5°W	07.5°N	No Niño	-16.340	-3.341	< 0.0001
112.5°W	0°N	Niño	-15.386	-3.341	< 0.0001
112.5°W	07.5°S	No Niño	-18.320	-3.341	< 0.0001
112.5°W	15°S	No Niño	-20.358	-3.341	< 0.0001
112.5°W	22.5°S	No Niño	-24.861	-3.341	< 0.0001
112.5°W	30°S	No Niño	-25.453	-3.341	< 0.0001
105°W	30°N	No Niño	-14.999	-3.341	< 0.0001
105°W	22.5°N	No Niño	-11.266	-3.341	< 0.0001
105°W	15°N	No Niño	-18.981	-3.341	< 0.0001
105°W	07.5°N	No Niño	-17.936	-3.341	< 0.0001
105°W	0°N	Niño	-13.382	-3.341	< 0.0001

Continuación...

Longitud	Latitud	Región	Tc	To	valor p
105°W	07.5°S	No Niño	-18.741	-3.341	< 0.0001
105°W	15°S	No Niño	-19.178	-3.341	< 0.0001
105°W	22.5°S	No Niño	-25.708	-3.341	< 0.0001
105°W	30°S	No Niño	-25.248	-3.341	< 0.0001
97.5°W	30°N	No Niño	-22.406	-3.341	< 0.0001
97.5°W	22.5°N	No Niño	-21.583	-3.341	< 0.0001
97.5°W	15°N	No Niño	-15.919	-3.341	< 0.0001
97.5°W	07.5°N	No Niño	-14.841	-3.341	< 0.0001
97.5°W	0°N	Niño	-11.828	-3.341	< 0.0001
97.5°W	07.5°S	No Niño	-20.088	-3.341	< 0.0001
97.5°W	15°S	No Niño	-20.320	-3.341	< 0.0001
97.5°W	22.5°S	No Niño	-22.616	-3.341	< 0.0001
97.5°W	30°S	No Niño	-25.238	-3.341	< 0.0001
90°W	30°N	No Niño	-22.249	-3.341	< 0.0001
90°W	22.5°N	No Niño	-19.331	-3.341	< 0.0001
90°W	15°N	No Niño	-12.339	-3.341	< 0.0001
90°W	07.5°N	No Niño	-15.965	-3.341	< 0.0001
90°W	0°N	Niño	-10.689	-3.341	< 0.0001
90°W	07.5°S	No Niño	-19.675	-3.341	< 0.0001
90°W	15°S	No Niño	-17.844	-3.341	< 0.0001
90°W	22.5°S	No Niño	-22.151	-3.341	< 0.0001
90°W	30°S	No Niño	-24.716	-3.341	< 0.0001
82.5°W	30°N	No Niño	-15.079	-3.341	< 0.0001
82.5°W	22.5°N	No Niño	-17.587	-3.341	< 0.0001
82.5°W	15°N	No Niño	-21.168	-3.341	< 0.0001
82.5°W	07.5°N	No Niño	-12.851	-3.341	< 0.0001
82.5°W	0°N	Niño	-12.455	-3.341	< 0.0001
82.5°W	07.5°S	Niño	-13.274	-3.341	< 0.0001
82.5°W	15°S	No Niño	-18.135	-3.341	< 0.0001
82.5°W	22.5°S	No Niño	-15.565	-3.341	< 0.0001
82.5°W	30°S	No Niño	-23.720	-3.341	< 0.0001
75°W	30°N	No Niño	-22.087	-3.341	< 0.0001
75°W	22.5°N	No Niño	-20.540	-3.341	< 0.0001
75°W	15°N	No Niño	-13.504	-3.341	< 0.0001
75°W	07.5°N	No Niño	-15.730	-3.341	< 0.0001
75°W	0°N	No Niño	-13.804	-3.341	< 0.0001
75°W	07.5°S	No Niño	-11.821	-3.341	< 0.0001
75°W	15°S	No Niño	-9.884	-3.341	< 0.0001
75°W	22.5°S	No Niño	-12.812	-3.341	< 0.0001
75°W	30°S	No Niño	-11.092	-3.341	< 0.0001

Tabla 5: Prueba de ADF para la determinación de estacionariedad de la variable de agua precipitable

Longitud	Latitud	Región	Tc	To	valor p
120°E	30°N	No Niño	-10.083	-3.341	< 0.0001
120°E	22.5°N	No Niño	-11.193	-3.341	< 0.0001
120°E	15°N	No Niño	-12.791	-3.341	< 0.0001
120°E	07.5°N	No Niño	-16.973	-3.341	< 0.0001
120°E	0°N	No Niño	-15.496	-3.341	< 0.0001
120°E	07.5°S	No Niño	-12.773	-3.341	< 0.0001
120°E	15°S	No Niño	-13.572	-3.341	< 0.0001
120°E	22.5°S	No Niño	-13.346	-3.341	< 0.0001
120°E	30°S	No Niño	-13.622	-3.341	< 0.0001
127.5°E	30°N	No Niño	-10.548	-3.341	< 0.0001
127.5°E	22.5°N	No Niño	-13.885	-3.341	< 0.0001
127.5°E	15°N	No Niño	-15.295	-3.341	< 0.0001
127.5°E	07.5°N	No Niño	-18.321	-3.341	< 0.0001
127.5°E	0°N	No Niño	-14.819	-3.341	< 0.0001
127.5°E	07.5°S	No Niño	-13.063	-3.341	< 0.0001
127.5°E	15°S	No Niño	-11.471	-3.341	< 0.0001
127.5°E	22.5°S	No Niño	-14.705	-3.341	< 0.0001
127.5°E	30°S	No Niño	-13.616	-3.341	< 0.0001
135°E	30°N	No Niño	-10.144	-3.341	< 0.0001
135°E	22.5°N	No Niño	-14.201	-3.341	< 0.0001
135°E	15°N	No Niño	-15.644	-3.341	< 0.0001
135°E	07.5°N	No Niño	-16.229	-3.341	< 0.0001
135°E	0°N	No Niño	-17.848	-3.341	< 0.0001
135°E	07.5°S	No Niño	-14.78	-3.341	< 0.0001
135°E	15°S	No Niño	-11.837	-3.341	< 0.0001
135°E	22.5°S	No Niño	-14.639	-3.341	< 0.0001
135°E	30°S	No Niño	-14.281	-3.341	< 0.0001
142.5°E	30°N	No Niño	-10.274	-3.341	< 0.0001
142.5°E	22.5°N	No Niño	-14.588	-3.341	< 0.0001
142.5°E	15°N	No Niño	-14.373	-3.341	< 0.0001
142.5°E	07.5°N	No Niño	-17.689	-3.341	< 0.0001
142.5°E	0°N	No Niño	-17.998	-3.341	< 0.0001
142.5°E	07.5°S	No Niño	-17.588	-3.341	< 0.0001
142.5°E	15°S	No Niño	-12.091	-3.341	< 0.0001
142.5°E	22.5°S	No Niño	-12.904	-3.341	< 0.0001
142.5°E	30°S	No Niño	-13.966	-3.341	< 0.0001
150°E	30°N	No Niño	-10.615	-3.341	< 0.0001
150°E	22.5°N	No Niño	-14.404	-3.341	< 0.0001
150°E	15°N	No Niño	-16.467	-3.341	< 0.0001
150°E	07.5°N	No Niño	-16.114	-3.341	< 0.0001
150°E	0°N	No Niño	-17.529	-3.341	< 0.0001

Continuación...

Longitud	Latitud	Región	Tc	To	valor p
150°E	07.5°S	No Niño	-16.447	-3.341	< 0.0001
150°E	15°S	No Niño	-14.276	-3.341	< 0.0001
150°E	22.5°S	No Niño	-12.236	-3.341	< 0.0001
150°E	30°S	No Niño	-11.549	-3.341	< 0.0001
157.5°E	30°N	No Niño	-11.019	-3.341	< 0.0001
157.5°E	22.5°N	No Niño	-14.902	-3.341	< 0.0001
157.5°E	15°N	No Niño	-15.539	-3.341	< 0.0001
157.5°E	07.5°N	No Niño	-16.332	-3.341	< 0.0001
157.5°E	0°N	No Niño	-18.243	-3.341	< 0.0001
157.5°E	07.5°S	No Niño	-18.575	-3.341	< 0.0001
157.5°E	15°S	No Niño	-15.802	-3.341	< 0.0001
157.5°E	22.5°S	No Niño	-12.965	-3.341	< 0.0001
157.5°E	30°S	No Niño	-12.309	-3.341	< 0.0001
165°E	30°N	No Niño	-12.042	-3.341	< 0.0001
165°E	22.5°N	No Niño	-14.812	-3.341	< 0.0001
165°E	15°N	No Niño	-15.453	-3.341	< 0.0001
165°E	07.5°N	No Niño	-15.901	-3.341	< 0.0001
165°E	0°N	No Niño	-16.236	-3.341	< 0.0001
165°E	07.5°S	No Niño	-17.955	-3.341	< 0.0001
165°E	15°S	No Niño	-15.943	-3.341	< 0.0001
165°E	22.5°S	No Niño	-12.752	-3.341	< 0.0001
165°E	30°S	No Niño	-14.024	-3.341	< 0.0001
172.5°E	30°N	No Niño	-12.957	-3.341	< 0.0001
172.5°E	22.5°N	No Niño	-14.148	-3.341	< 0.0001
172.5°E	15°N	No Niño	-16.128	-3.341	< 0.0001
172.5°E	07.5°N	No Niño	-17.844	-3.341	< 0.0001
172.5°E	0°N	No Niño	-13.974	-3.341	< 0.0001
172.5°E	07.5°S	No Niño	-16.801	-3.341	< 0.0001
172.5°E	15°S	No Niño	-15.476	-3.341	< 0.0001
172.5°E	22.5°S	No Niño	-13.477	-3.341	< 0.0001
172.5°E	30°S	No Niño	-14.438	-3.341	< 0.0001
180°W	30°N	No Niño	-13.082	-3.341	< 0.0001
180°W	22.5°N	No Niño	-13.961	-3.341	< 0.0001
180°W	15°N	No Niño	-16.632	-3.341	< 0.0001
180°W	07.5°N	No Niño	-18.343	-3.341	< 0.0001
180°W	0°N	No Niño	-13.463	-3.341	< 0.0001
180°W	07.5°S	No Niño	-14.958	-3.341	< 0.0001
180°W	15°S	No Niño	-15.263	-3.341	< 0.0001
180°W	22.5°S	No Niño	-14.065	-3.341	< 0.0001
180°W	30°S	No Niño	-14.661	-3.341	< 0.0001
172.5°W	30°N	No Niño	-13.436	-3.341	< 0.0001
172.5°W	22.5°N	No Niño	-14.503	-3.341	< 0.0001

Continuación...

Longitud	Latitud	Región	Tc	To	valor p
172.5°W	15°N	No Niño	-16.813	-3.341	< 0.0001
172.5°W	07.5°N	No Niño	-18.704	-3.341	< 0.0001
172.5°W	0°N	No Niño	-12.544	-3.341	< 0.0001
172.5°W	07.5°S	No Niño	-14.677	-3.341	< 0.0001
172.5°W	15°S	No Niño	-14.893	-3.341	< 0.0001
172.5°W	22.5°S	No Niño	-13.558	-3.341	< 0.0001
172.5°W	30°S	No Niño	-14.107	-3.341	< 0.0001
165°W	30°N	No Niño	-14.397	-3.341	< 0.0001
165°W	22.5°N	No Niño	-14.55	-3.341	< 0.0001
165°W	15°N	No Niño	-17.589	-3.341	< 0.0001
165°W	07.5°N	No Niño	-18.716	-3.341	< 0.0001
165°W	0°N	Niño	-11.893	-3.341	< 0.0001
165°W	07.5°S	No Niño	-14.489	-3.341	< 0.0001
165°W	15°S	No Niño	-16.06	-3.341	< 0.0001
165°W	22.5°S	No Niño	-13.838	-3.341	< 0.0001
165°W	30°S	No Niño	-14.316	-3.341	< 0.0001
157.5°W	30°N	No Niño	-14.964	-3.341	< 0.0001
157.5°W	22.5°N	No Niño	-14.664	-3.341	< 0.0001
157.5°W	15°N	No Niño	-18.433	-3.341	< 0.0001
157.5°W	07.5°N	No Niño	-18.866	-3.341	< 0.0001
157.5°W	0°N	Niño	-11.504	-3.341	< 0.0001
157.5°W	07.5°S	No Niño	-14.741	-3.341	< 0.0001
157.5°W	15°S	No Niño	-14.729	-3.341	< 0.0001
157.5°W	22.5°S	No Niño	-13.783	-3.341	< 0.0001
157.5°W	30°S	No Niño	-14.265	-3.341	< 0.0001
150°W	30°N	No Niño	-16.501	-3.341	< 0.0001
150°W	22.5°N	No Niño	-17.151	-3.341	< 0.0001
150°W	15°N	No Niño	-17.811	-3.341	< 0.0001
150°W	07.5°N	No Niño	-18.444	-3.341	< 0.0001
150°W	0°N	Niño	-10.767	-3.341	< 0.0001
150°W	07.5°S	No Niño	-13.9	-3.341	< 0.0001
150°W	15°S	No Niño	-14.435	-3.341	< 0.0001
150°W	22.5°S	No Niño	-14.123	-3.341	< 0.0001
150°W	30°S	No Niño	-14.214	-3.341	< 0.0001
142.5°W	30°N	No Niño	-18.336	-3.341	< 0.0001
142.5°W	22.5°N	No Niño	-18.608	-3.341	< 0.0001
142.5°W	15°N	No Niño	-17.133	-3.341	< 0.0001
142.5°W	07.5°N	No Niño	-18.421	-3.341	< 0.0001
142.5°W	0°N	Niño	-9.964	-3.341	< 0.0001
142.5°W	07.5°S	No Niño	-12.759	-3.341	< 0.0001
142.5°W	15°S	No Niño	-15.859	-3.341	< 0.0001
142.5°W	22.5°S	No Niño	-15.216	-3.341	< 0.0001

Continuación...

Longitud	Latitud	Región	Tc	To	valor p
142.5°W	30°S	No Niño	-14.143	-3.341	< 0.0001
135°W	30°N	No Niño	-20.023	-3.341	< 0.0001
135°W	22.5°N	No Niño	-18.185	-3.341	< 0.0001
135°W	15°N	No Niño	-16.34	-3.341	< 0.0001
135°W	07.5°N	No Niño	-18.512	-3.341	< 0.0001
135°W	0°N	Niño	-9.84	-3.341	< 0.0001
135°W	07.5°S	No Niño	-12.491	-3.341	< 0.0001
135°W	15°S	No Niño	-15.504	-3.341	< 0.0001
135°W	22.5°S	No Niño	-16.597	-3.341	< 0.0001
135°W	30°S	No Niño	-15.284	-3.341	< 0.0001
127.5°W	30°N	No Niño	-20.133	-3.341	< 0.0001
127.5°W	22.5°N	No Niño	-15.8	-3.341	< 0.0001
127.5°W	15°N	No Niño	-15.426	-3.341	< 0.0001
127.5°W	07.5°N	No Niño	-17.541	-3.341	< 0.0001
127.5°W	0°N	Niño	-10.072	-3.341	< 0.0001
127.5°W	07.5°S	Niño	-11.83	-3.341	< 0.0001
127.5°W	15°S	No Niño	-15.243	-3.341	< 0.0001
127.5°W	22.5°S	No Niño	-18.366	-3.341	< 0.0001
127.5°W	30°S	No Niño	-16.891	-3.341	< 0.0001
120°W	30°N	No Niño	-15.728	-3.341	< 0.0001
120°W	22.5°N	No Niño	-13.414	-3.341	< 0.0001
120°W	15°N	No Niño	-14.288	-3.341	< 0.0001
120°W	07.5°N	No Niño	-17.393	-3.341	< 0.0001
120°W	0°N	Niño	-10.558	-3.341	< 0.0001
120°W	07.5°S	No Niño	-11.498	-3.341	< 0.0001
120°W	15°S	No Niño	-15.803	-3.341	< 0.0001
120°W	22.5°S	No Niño	-17.627	-3.341	< 0.0001
120°W	30°S	No Niño	-17.507	-3.341	< 0.0001
112.5°W	30°N	No Niño	-12.708	-3.341	< 0.0001
112.5°W	22.5°N	No Niño	-11.583	-3.341	< 0.0001
112.5°W	15°N	No Niño	-13.485	-3.341	< 0.0001
112.5°W	07.5°N	No Niño	-15.804	-3.341	< 0.0001
112.5°W	0°N	Niño	-11.166	-3.341	< 0.0001
112.5°W	07.5°S	No Niño	-10.96	-3.341	< 0.0001
112.5°W	15°S	No Niño	-15.435	-3.341	< 0.0001
112.5°W	22.5°S	No Niño	-16.445	-3.341	< 0.0001
112.5°W	30°S	No Niño	-17.496	-3.341	< 0.0001
105°W	30°N	No Niño	-10.726	-3.341	< 0.0001
105°W	22.5°N	No Niño	-11.112	-3.341	< 0.0001
105°W	15°N	No Niño	-12.803	-3.341	< 0.0001
105°W	07.5°N	No Niño	-13.689	-3.341	< 0.0001
105°W	0°N	Niño	-11.306	-3.341	< 0.0001

Continuación...

Longitud	Latitud	Región	Tc	To	valor p
105°W	07.5°S	No Niño	-10.722	-3.341	< 0.0001
105°W	15°S	No Niño	-14.606	-3.341	< 0.0001
105°W	22.5°S	No Niño	-16.255	-3.341	< 0.0001
105°W	30°S	No Niño	-16.947	-3.341	< 0.0001
97.5°W	30°N	No Niño	-10.846	-3.341	< 0.0001
97.5°W	22.5°N	No Niño	-14.49	-3.341	< 0.0001
97.5°W	15°N	No Niño	-11.805	-3.341	< 0.0001
97.5°W	07.5°N	No Niño	-11.762	-3.341	< 0.0001
97.5°W	0°N	Niño	-11.76	-3.341	< 0.0001
97.5°W	07.5°S	No Niño	-11.029	-3.341	< 0.0001
97.5°W	15°S	No Niño	-13.406	-3.341	< 0.0001
97.5°W	22.5°S	No Niño	-15.387	-3.341	< 0.0001
97.5°W	30°S	No Niño	-17.504	-3.341	< 0.0001
90°W	30°N	No Niño	-11.027	-3.341	< 0.0001
90°W	22.5°N	No Niño	-13.021	-3.341	< 0.0001
90°W	15°N	No Niño	-13.559	-3.341	< 0.0001
90°W	07.5°N	No Niño	-11.167	-3.341	< 0.0001
90°W	0°N	Niño	-12.559	-3.341	< 0.0001
90°W	07.5°S	No Niño	-11.834	-3.341	< 0.0001
90°W	15°S	No Niño	-13.256	-3.341	< 0.0001
90°W	22.5°S	No Niño	-14.68	-3.341	< 0.0001
90°W	30°S	No Niño	-17.198	-3.341	< 0.0001
82.5°W	30°N	No Niño	-10.566	-3.341	< 0.0001
82.5°W	22.5°N	No Niño	-12.659	-3.341	< 0.0001
82.5°W	15°N	No Niño	-12.758	-3.341	< 0.0001
82.5°W	07.5°N	No Niño	-12.641	-3.341	< 0.0001
82.5°W	0°N	Niño	-15.009	-3.341	< 0.0001
82.5°W	07.5°S	Niño	-14.447	-3.341	< 0.0001
82.5°W	15°S	No Niño	-12.834	-3.341	< 0.0001
82.5°W	22.5°S	No Niño	-14.657	-3.341	< 0.0001
82.5°W	30°S	No Niño	-17.589	-3.341	< 0.0001
75°W	30°N	No Niño	-11.624	-3.341	< 0.0001
75°W	22.5°N	No Niño	-13.786	-3.341	< 0.0001
75°W	15°N	No Niño	-13.18	-3.341	< 0.0001
75°W	07.5°N	No Niño	-18.064	-3.341	< 0.0001
75°W	0°N	No Niño	-16.44	-3.341	< 0.0001
75°W	07.5°S	No Niño	-13.333	-3.341	< 0.0001
75°W	15°S	No Niño	-13.527	-3.341	< 0.0001
75°W	22.5°S	No Niño	-14.605	-3.341	< 0.0001
75°W	30°S	No Niño	-18.747	-3.341	< 0.0001

4.2. RESULTADOS DEL PRONÓSTICO SEGÚN LA OBTENCIÓN DE LAS FUERZAS ENLACES DESEADAS DE LAS CORRELACIONES CRUZADAS DE LAS ANOMALÍAS DIARIAS DE LAS VARIABLES ATMOSFÉRICAS DE ESTUDIO ENTRE NODOS UBICADOS EN LA REGIÓN DE “EL NIÑO” Y EXTERIORES, PERO PERTENCIENTES AL OCÉANO PACÍFICO TROPICAL

Los resultados anteriores de la prueba de estacionariedad de las variables meteorológicas de estudio comprobaron que no existe una raíz unitaria en la serie temporal del periodo de estudio en ningún nodo para ambas variables, por lo que se prueba la estacionariedad en todos los nodos de estudio tanto en humedad relativa y agua precipitable.

Se calcularon las anomalías diarias para cada variable en cada nodo de estudio en base a la climatología suavizada diaria (1981-2010) para el cálculo de las correlaciones cruzadas en nodos pertenecientes en la región de “El Niño” y exteriores, su procedimiento para la obtención se detalla en el Anexo 4. A continuación se describen los resultados obtenidos de la fuerza enlace deseada de las anomalías diarias de las variables meteorológicas de estudio.

4.2.1. Resultados de las fuerzas enlaces deseadas de las anomalías de las variables meteorológicas de estudio

Las fuerzas enlaces deseadas halladas en el periodo de estudio (1952-2019) por cada décimo día “t” producto de la combinación de nodos ubicados en la región “Niño” y exteriores se muestran en las figuras 44 y 45.

En la Figura 44 se muestra para la humedad relativa, en la que los valores oscilan entre 3.319 a 3.875 con una tendencia ligeramente creciente, en el periodo de prueba correspondiente del 1952 al 1980 existe mayor dispersión de los valores obtenidos a comparación de los años posteriores al 2000 donde se observa más concentración y por ende menor varianza.

En la Figura 45, para la variable de agua precipitable, los valores oscilan entre 2.641 a 3.710 presentando mayor dispersión en todo el periodo de estudio a comparación de la humedad relativa, puesto que este último es una variable cuyos valores son de intervalo limitado.

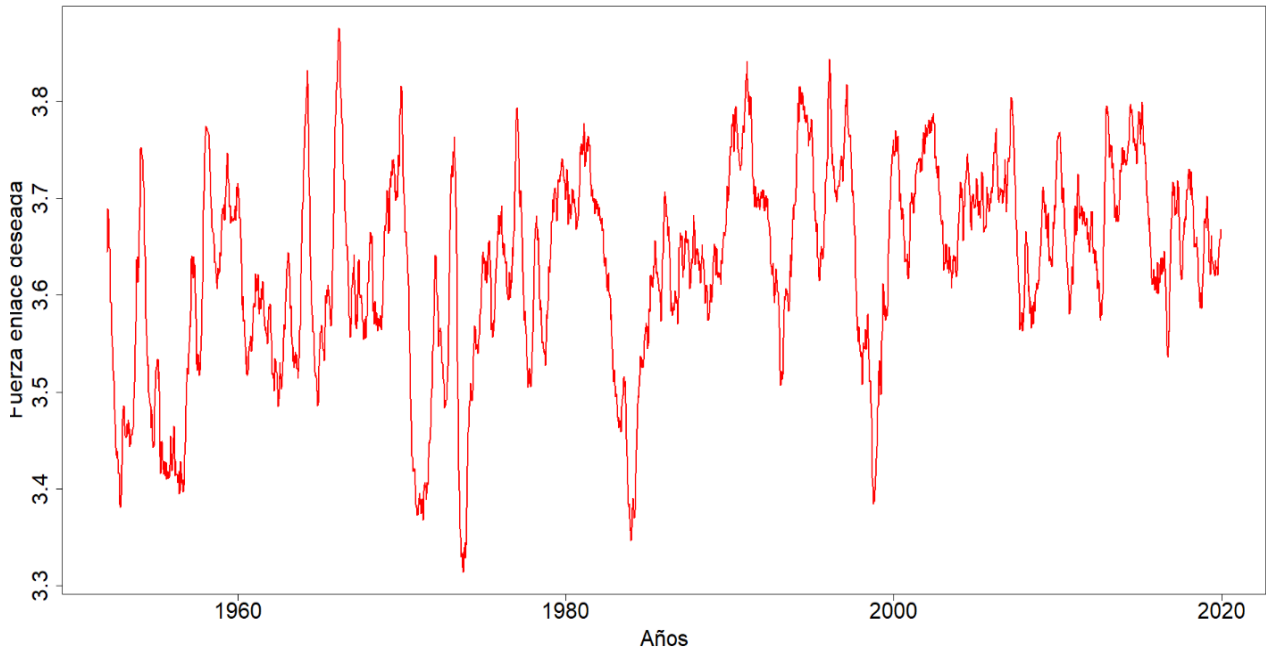


Figura 44. Fuerzas enlaces deseadas de humedad relativa (1952-2019)

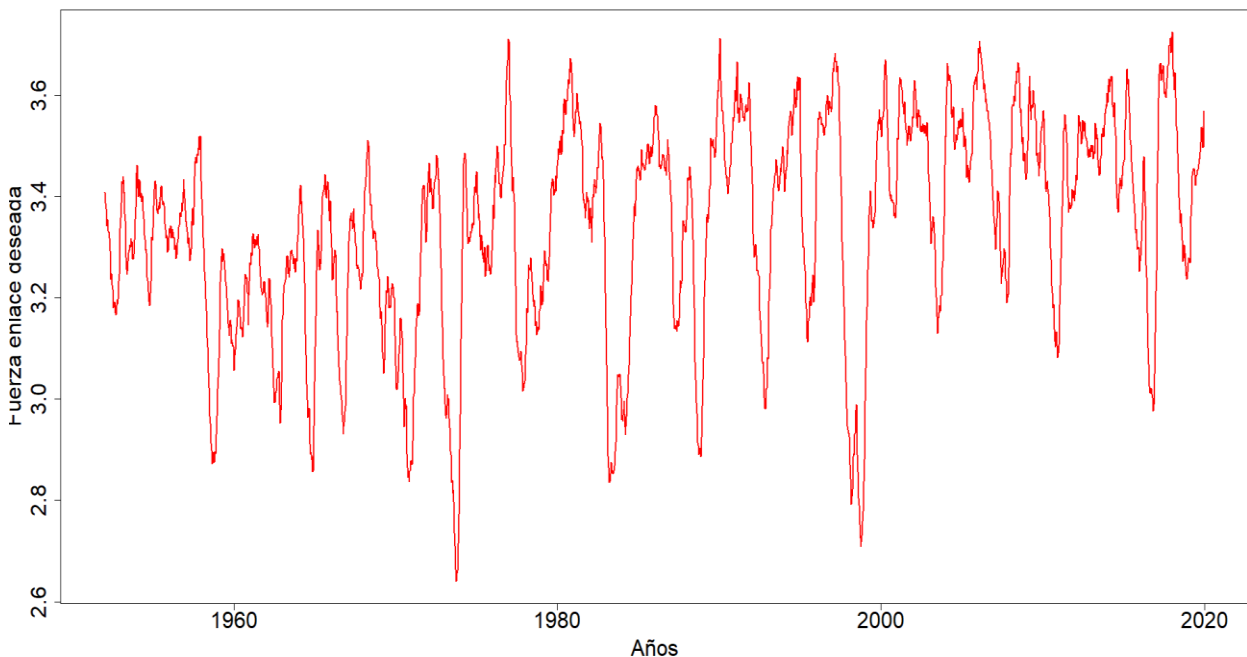


Figura 45. Fuerzas enlaces deseadas de agua precipitable (1952 - 2019)

4.2.2. Determinación del umbral de pronóstico del evento ENSO “El Niño”

Para la determinación del umbral de pronóstico ENSO “El Niño” se separó el periodo de estudio en 2 fases, uno que corresponde a la fase de prueba de pronóstico (1953-1980) y la otra fase de validación del pronóstico ENSO (1981-2020).

Las fuerzas enlaces deseadas obtenidas para cada variable de estudio fueron puestos a prueba de calibración con el fin de hallar el mejor umbral de pronóstico para la fase de prueba,

posterior fueron validadas estadísticamente detallados en la metodología de la investigación y en el Anexo 6.

Para la humedad relativa, las fuerzas enlaces deseadas en el periodo de prueba se muestran en la Figura 46 mediante un diagrama de cajas, donde el valor mínimo resultó 3.314, el primer cuartil 3.522, el segundo cuartil 3.590, la media 3.589, el tercer cuartil 3.671 y el valor máximo 3.875, no presenta valores atípicos puesto que hay menor dispersión de los valores obtenidos.

En la Tabla 6 se muestra la validación estadística de la prueba del pronóstico con los umbrales calibrados con dos decimales desde el valor mínimo 3.32 hasta el valor máximo 3.87 por cada centésima, donde la tasa de acierto presenta una tendencia descendente mientras aumenta el valor del umbral por escoger, sin embargo la tasa de acierto muestra el mismo comportamiento descendente (ver Figura 47), desde los valores 3.32 al 3.52 fueron donde más se presentaron mayores aciertos y por otro lado entre los valores 3.32 al 3.48 también presentaron mayores tasas de falsas alarmas, lo cual la dispersión entre esos valores es relativamente mínimo. Entre los valores 3.49 al 3.52 la dispersión incrementa ligeramente, pero en el valor 3.53 la dispersión vuelve a disminuir por un año que se pronosticó, pero no se observó, para los valores del 3.54 al 3.56 la dispersión vuelve a incrementarse ligeramente pero no supera a los umbrales 3.49 al 3.52. Para los valores desde 3.57 al 3.61 la dispersión es mayor con un valor obtenido (0.283), posterior a ello se puede observar una disminución en cuanto a la dispersión, para el valor 3.62 desciende notablemente, en caso de los valores 3.63 y 3.64 la dispersión nuevamente tiende a subir, pero no supera el valor máximo obtenido, de misma forma hasta el valor 3.68. Para los valores del 3.69 al 3.74 la dispersión se vuelve negativa, la tasa de acierto es menor que la tasa de falsa alarma por lo que de ninguna manera se tiene que escoger estos valores para la fase de pronóstico, finalmente entre los valores 3.75 al 3.87 la dispersión es próximo a la nulidad con solamente 1 año de acierto, sin embargo la tasa de falsa alarma muestra valores nulos que indica un óptimo pronóstico pero las tasas de aciertos no fueron obtenidos con valores óptimos de la misma manera. Ante ello los umbrales cuyos valores 3.57 al 3.61 mostraron mayor dispersión, por lo que se determinó que el valor 3.60 (valor estándar) sea el umbral de pronóstico para la fase de validación de pronóstico del evento ENSO “El NIÑO” de la variable humedad relativa.

En caso del agua precipitable, de igual forma las fuerzas enlaces son mostradas mediante el diagrama de cajas en la Figura 48, donde el valor mínimo resultó 2.641, el primer cuartil 3.159, el segundo cuartil 3.278, la media 3.278, el tercer cuartil 3.376 y el valor máximo 3.710, presenta valores atípicos mínimos por la mayor dispersión de los valores de fuerzas enlaces deseadas que se obtuvieron.

En la Tabla 7 se muestra la validación estadística de la prueba del pronóstico con los umbrales calibrados con dos decimales desde el valor de 2.65 al 3.69 por cada centésima, donde tanto la tasa de acierto como la tasa de falsa alarma muestra un comportamiento ascendente y luego descendente (ver Figura 49), diferente a lo que se obtuvo con la humedad relativa. Desde los valores de 2.65 al 3.02 presenta una tasa de acierto relativamente alto, sin embargo la falsa alarma también se obtuvo con la misma tendencia por lo que la dispersión no es tan alto, para los valores de 3.03 al 3.10 incrementa la tasa de falsa alarma por lo que se ve reducido la dispersión, para los valores de 3.11 al 3.15 y 3.19 al 3.23 presenta una mayor tasa de acierto de todos los umbrales calibrados (0.818) con nueve años de acierto de once, sin embargo la tasa de falsa alarma se mantiene con la tendencia de los valores anteriormente señalados, para los valores 3.16 al 3.18 la tasa de acierto se mantiene con el valor alto y la tasa de falsa alarma decrece ligeramente por lo que la dispersión aumenta, para los valores de 3.24 al 3.27 la tasa de acierto disminuye, de la misma forma la dispersión, en los valores de 3.28 al 3.33 la tasa de acierto decrece hasta 0.636, sin embargo para los valores de 3.34 al 3.37 la tasa de falsa alarma decrece considerablemente por lo que la dispersión muestra valores más altos de todos los umbrales calibrados, para los valores del 3.38 al 3.51 tanto la tasa de acierto como la tasa de falsa alarma son próximos, y en los valores de 3.52 al 3.69 las tasa de acierto y falsa alarma son nulos. Dado los valores de los umbrales calibrados mostrados, se determinó escoger el valor 3.35 (valor estándar) sea el umbral de pronóstico para la fase de validación de pronóstico en cuanto al agua precipitable.

Diagrama de cajas de las fuerzas enlaces-Humedad Relativa

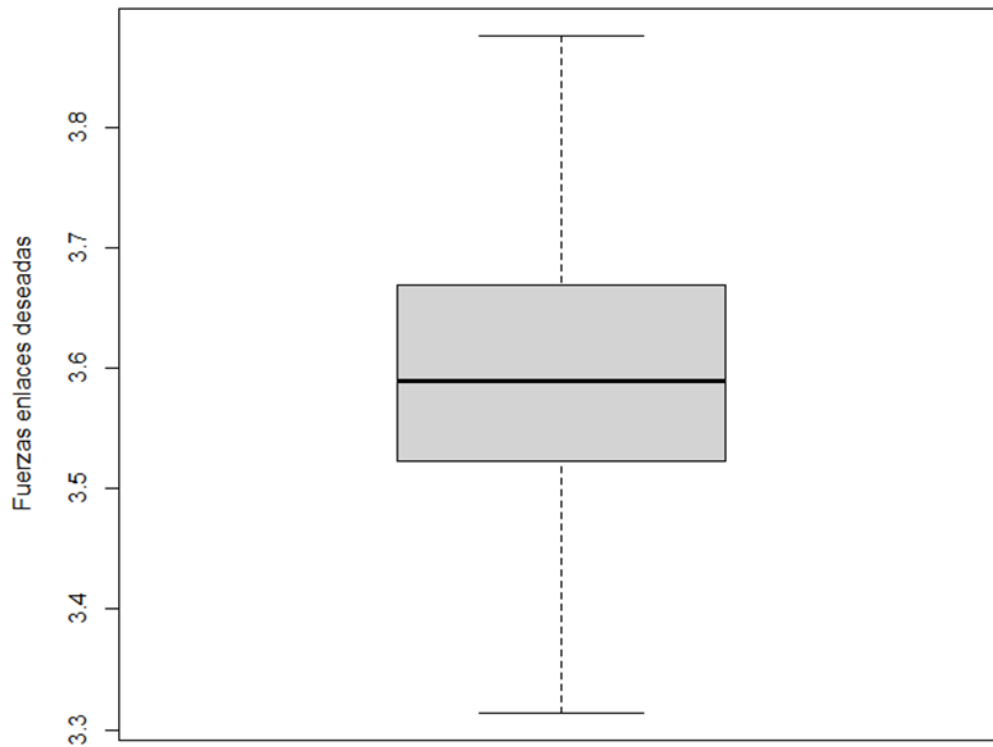


Figura 46. Diagrama de cajas de la determinación del umbral de pronóstico de las fuerzas enlaces deseadas de la variable humedad relativa

Valor mínimo = 3.314

Primer cuartil = 3.522

Segundo cuartil = 3.590

Media = 3.589

Tercer cuartil = 3.671

Valor máximo = 3.875

Tabla 6: Valores de tasas de acierto y falsas alarmas según la calibración del umbral de pronóstico de la variable humedad relativa

Umbral	FASE DE PRUEBA (1953-1980)				Tasa de acierto	Falsa Alarma	Dispersión
	a	b	c	d			
3.32	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
3.33	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
3.34	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
3.35	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
3.36	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
3.37	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
3.38	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
3.39	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
3.40	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
3.41	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
3.42	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
3.43	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
3.44	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
3.45	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
3.46	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
3.47	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
3.48	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
3.49	8	8	3	9	0.727	0.471	0.257
3.50	8	8	3	9	0.727	0.471	0.257
3.51	8	8	3	9	0.727	0.471	0.257
3.52	8	8	3	9	0.727	0.471	0.257
3.53	7	8	4	9	0.636	0.471	0.166
3.54	7	7	4	10	0.636	0.412	0.225
3.55	7	7	4	10	0.636	0.412	0.225
3.56	7	7	4	10	0.636	0.412	0.225
3.57	7	6	4	11	0.636	0.353	0.283
3.58	7	6	4	11	0.636	0.353	0.283
3.59	7	6	4	11	0.636	0.353	0.283
3.60	7	6	4	11	0.636	0.353	0.283
3.61	7	6	4	11	0.636	0.353	0.283
3.62	5	6	6	11	0.455	0.353	0.102
3.63	6	5	5	12	0.545	0.294	0.251
3.64	6	5	5	12	0.545	0.294	0.251
3.65	4	2	7	15	0.364	0.118	0.246
3.66	4	2	7	15	0.364	0.118	0.246
3.67	3	2	8	15	0.273	0.118	0.155
3.68	3	2	8	15	0.273	0.118	0.155
3.69	1	2	10	15	0.091	0.118	-0.027
3.70	0	3	11	14	0.000	0.176	-0.176

Continuación...

FASE DE PRUEBA (1953-1980)							
Umbral	a	b	c	d	Tasa de acierto	Falsa Alarma	Dispersión
3.71	0	3	11	14	0.000	0.176	-0.176
3.72	0	2	11	15	0.000	0.118	-0.118
3.73	0	2	11	15	0.000	0.118	-0.118
3.74	0	2	11	15	0.000	0.118	-0.118
3.75	0	0	11	17	0.000	0.000	0.000
3.76	0	0	11	17	0.000	0.000	0.000
3.77	0	0	11	17	0.000	0.000	0.000
3.78	0	0	11	17	0.000	0.000	0.000
3.79	1	0	10	17	0.091	0.000	0.091
3.80	1	0	10	17	0.091	0.000	0.091
3.81	1	0	10	17	0.091	0.000	0.091
3.82	1	0	10	17	0.091	0.000	0.091
3.83	1	0	10	17	0.091	0.000	0.091
3.84	0	0	11	17	0.000	0.000	0.000
3.85	0	0	11	17	0.000	0.000	0.000
3.86	0	0	11	17	0.000	0.000	0.000
3.87	0	0	11	17	0.000	0.000	0.000

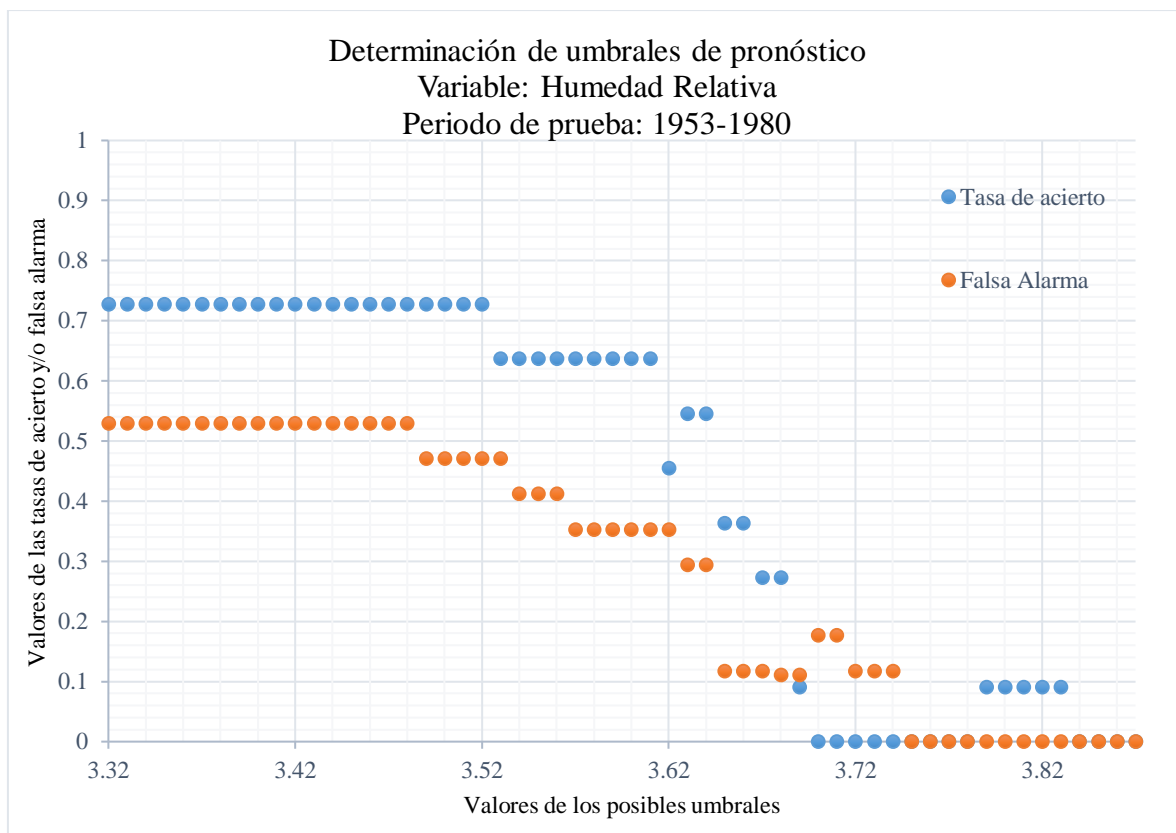


Figura 47. Dispersión de las tasas de acierto y falsa alarma según el umbral de pronóstico escogido de la variable humedad relativa

Diagrama de cajas de las fuerzas enlaces-Agua Precipitable

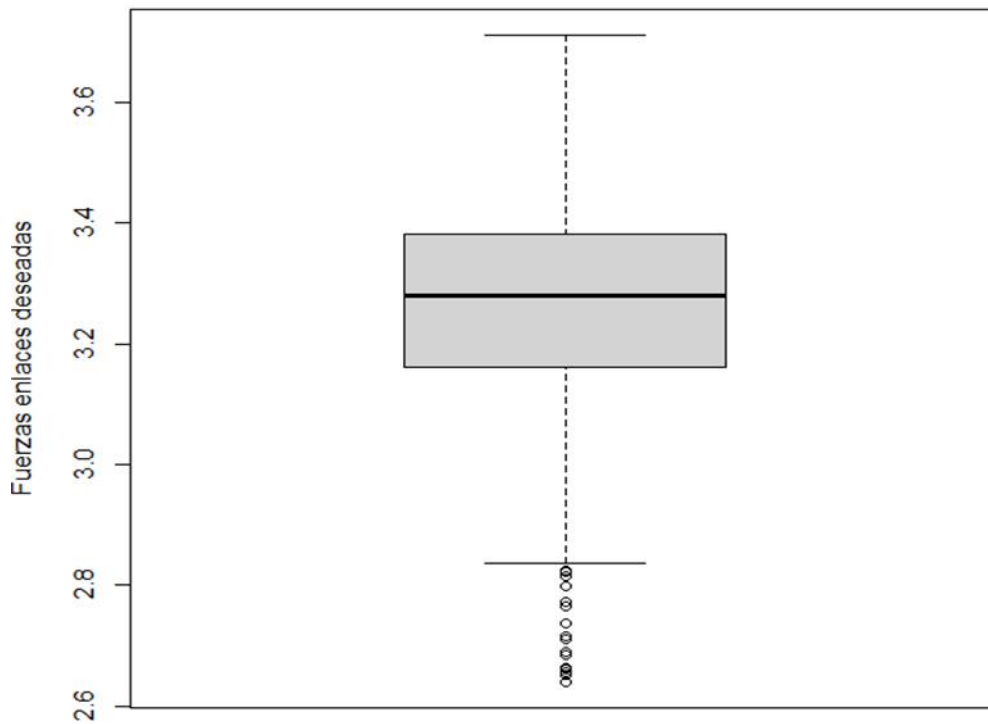


Figura 48. Diagrama de cajas de la determinación del umbral de pronóstico de las fuerzas enlaces deseadas de la variable agua precipitable

Valor mínimo = 2.641

Primer cuartil = 3.159

Segundo cuartil = 3.278

Media = 3.253

Tercer cuartil = 3.376

Valor máximo = 3.710

Tabla 7: Valores de tasas de acierto y falsas alarmas según la calibración del umbral de pronóstico de la variable agua precipitable

Umbral	FASE DE PRUEBA (1953-1980)				Tasa de acierto	Falsa Alarma	Dispersión
	a	b	c	d			
2.65	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.66	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.67	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.68	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.69	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.70	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.71	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.72	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.73	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.74	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.75	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.76	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.77	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.78	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.79	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.80	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.81	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.82	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.83	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.84	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.85	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.86	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.87	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.88	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.89	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.90	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.91	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.92	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.93	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.94	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.95	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.96	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.97	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.98	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
2.99	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
3.00	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
3.01	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198

Continuación...

Umbral	FASE DE PRUEBA (1953-1980)						
	a	b	c	d	Tasa de acierto	Falsa Alarma	Dispersión
3.02	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
3.03	8	10	3	7	0.727	0.588	0.139
3.04	8	10	3	7	0.727	0.588	0.139
3.05	8	10	3	7	0.727	0.588	0.139
3.06	8	10	3	7	0.727	0.588	0.139
3.07	8	10	3	7	0.727	0.588	0.139
3.08	8	10	3	7	0.727	0.588	0.139
3.09	8	10	3	7	0.727	0.588	0.139
3.10	8	10	3	7	0.727	0.588	0.139
3.11	9	10	2	7	0.818	0.588	0.230
3.12	9	10	2	7	0.818	0.588	0.230
3.13	9	10	2	7	0.818	0.588	0.230
3.14	9	10	2	7	0.818	0.588	0.230
3.15	9	10	2	7	0.818	0.588	0.230
3.16	9	9	2	8	0.818	0.529	0.289
3.17	9	9	2	8	0.818	0.529	0.289
3.18	9	9	2	8	0.818	0.529	0.289
3.19	9	10	2	7	0.818	0.588	0.230
3.20	9	10	2	7	0.818	0.588	0.230
3.21	9	10	2	7	0.818	0.588	0.230
3.22	9	10	2	7	0.818	0.588	0.230
3.23	9	10	2	7	0.818	0.588	0.230
3.24	8	10	3	7	0.727	0.588	0.139
3.25	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
3.26	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
3.27	8	9	3	8	0.727	0.529	0.198
3.28	7	9	4	8	0.636	0.529	0.107
3.29	7	8	4	9	0.636	0.471	0.166
3.30	7	7	4	10	0.636	0.412	0.225
3.31	7	7	4	10	0.636	0.412	0.225
3.32	7	7	4	10	0.636	0.412	0.225
3.33	7	6	4	11	0.636	0.353	0.283
3.34	7	5	4	12	0.636	0.294	0.342
3.35	7	5	4	12	0.636	0.294	0.342
3.36	7	5	4	12	0.636	0.294	0.342
3.37	7	5	4	12	0.636	0.294	0.342
3.38	5	5	6	12	0.455	0.294	0.160
3.39	5	5	6	12	0.455	0.294	0.160
3.40	5	4	6	13	0.455	0.235	0.219
3.41	5	4	6	13	0.455	0.235	0.219

Continuación...

Umbral	FASE DE PRUEBA (1953-1980)						
	a	b	c	d	Tasa de acierto	Falsa Alarma	Dispersión
3.42	5	4	6	13	0.455	0.235	0.219
3.43	4	4	7	13	0.364	0.235	0.128
3.44	3	2	8	15	0.273	0.118	0.155
3.45	2	2	9	15	0.182	0.118	0.064
3.46	2	2	9	15	0.182	0.118	0.064
3.47	2	1	9	16	0.182	0.059	0.123
3.48	2	1	9	16	0.182	0.059	0.123
3.49	2	0	9	17	0.182	0.000	0.182
3.50	1	0	10	17	0.091	0.000	0.091
3.51	1	0	10	17	0.091	0.000	0.091
3.52	0	0	11	17	0.000	0.000	0.000
3.53	0	0	11	17	0.000	0.000	0.000
3.54	0	0	11	17	0.000	0.000	0.000
3.55	0	0	11	17	0.000	0.000	0.000
3.56	0	0	11	17	0.000	0.000	0.000
3.57	0	0	11	17	0.000	0.000	0.000
3.58	0	0	11	17	0.000	0.000	0.000
3.59	0	0	11	17	0.000	0.000	0.000
3.60	0	0	11	17	0.000	0.000	0.000
3.61	0	0	11	17	0.000	0.000	0.000
3.62	0	0	11	17	0.000	0.000	0.000
3.63	0	0	11	17	0.000	0.000	0.000
3.64	0	0	11	17	0.000	0.000	0.000
3.65	0	0	11	17	0.000	0.000	0.000
3.66	0	0	11	17	0.000	0.000	0.000
3.67	0	0	11	17	0.000	0.000	0.000
3.68	0	0	11	17	0.000	0.000	0.000
3.69	0	0	11	17	0.000	0.000	0.000

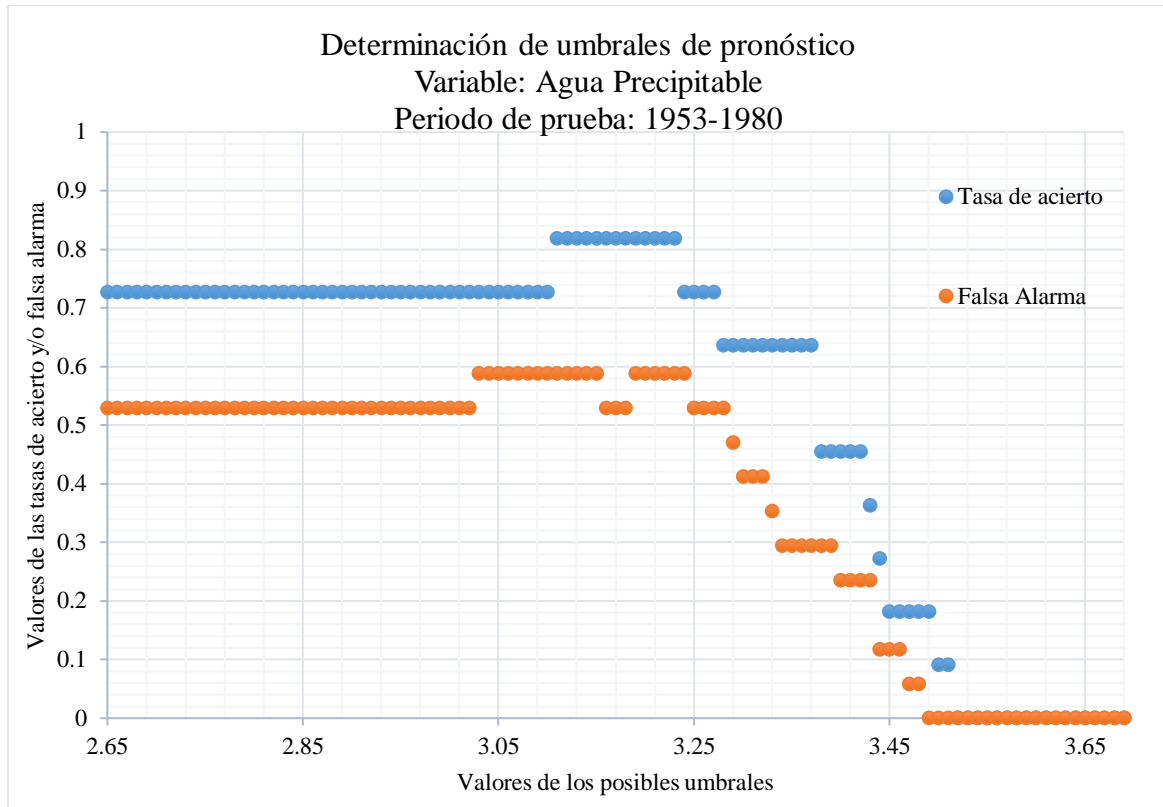


Figura 49. Dispersión de las tasas de acierto y falsa alarma según el umbral de pronóstico escogido de la variable agua precipitable

4.2.3. Resultados del pronóstico del evento ENSO “EL NIÑO”

Con el umbral escogido para el pronóstico del evento ENSO “El Niño” para ambas variables meteorológicas, se procedió a comprobar en la fase de la validación del pronóstico qué tan confiable se obtuvo, en las figuras 50 y 51 se muestra la variabilidad de las fuerzas enlaces deseadas de la humedad relativa con respecto a los eventos Niño ocurridos mediante el índice ONI 3.4 tanto para la fase de prueba como la fase de la validación del pronóstico respectivamente, de la misma forma en las figuras 52 y 53 se puede apreciar pero con la variable de agua precipitable.

Desde la figura 54 al 121 se muestra los resultados del pronóstico del evento ENSO “El Niño” por cada año de pronóstico, en la columna izquierda se observa los resultados de las fuerzas enlaces deseadas tanto de humedad relativa (HR) y agua precipitable (PWAT) desde enero hasta diciembre por cada décimo día t del año anterior del pronóstico, en el sector superior derecho se encuentran los valores de los índices ONI coloreados de rojo en caso se haya presentado un evento ENSO “El Niño” cuya intensidad, inicio y observación se describe en la fila inferior de los valores, sin color en caso de una fase neutra y de color azul, “La Niña”. En la parte central se exhibe detalladamente el comportamiento de las fuerzas

enlaces deseadas ante el posible inicio de un evento ENSO “El Niño” tanto de humedad relativa como agua precipitable para el año anterior y el año de pronóstico, en la parte inferior se describe las cantidades de alertas en caso del pronóstico emitido y las categorías de los resultados de las validaciones de los pronósticos que posteriormente se detalla.

Para el año 1953 se presentó un evento “El Niño” de intensidad débil desde febrero hasta el mismo mes del próximo año con valores de ONI oscilando entre 0.6 a 0.8, las fuerzas enlaces deseadas en humedad relativas alertaron desde octubre de 1951 hasta marzo de 1952, sin embargo, no se consideró debido a que la alerta no empezó desde el inicio de año y en agua precipitable, la fuerza enlace deseada alertaron desde anterioridad por lo que tampoco se consideró.

En el año 1954 se presentó la fase fría del ENSO a partir de mayo, en humedad relativa se obtuvieron alertas dentro de la fase cálida del ENSO en el año anterior por lo que la alerta pasó desapercibida, en cambio en agua precipitable se alertó desde enero hasta abril por lo que no sucedió el evento esperado.

En el año 1955 continuó la fase fría del ENSO y las alertas para ambas variables coincidieron con los últimos meses del “Niño” de 1953-54 por lo que no se tuvieron en cuenta.

En el año 1956 las fuerzas enlaces deseadas en el año anterior en humedad relativa se encontraron debajo del umbral, por ende, no se alertó y en agua precipitable ligeramente estuvo sobre el umbral desde enero a octubre del año pasado.

En el año 1957 se suscitó un evento “El Niño” de intensidad fuerte, las fuerzas enlaces deseadas en humedad relativa continuaron debajo de su umbral de pronóstico por lo que no se alertó, en cambio en agua precipitable se obtuvo una sola alerta en el mes de febrero del año anterior validando efectivamente el pronóstico con 14 meses de anticipación.

Para el año 1958, las fuerzas enlaces deseadas para ambas variables mostraron alertas con 21 y 22 meses de anticipación para la humedad relativa y agua precipitable respectivamente.

En el año 1959, el evento “El Niño” culminaba en los primeros meses del año, las fuerzas enlaces deseadas del año pasado para ambas variables coincidieron con el evento en desarrollo por lo que no hubo alerta.

En el año 1960 estuvo dominada por la fase neutra del ENSO, en caso de la humedad relativa las fuerzas enlaces deseadas aun persistían sobre el umbral durante el término el “Niño”

1958-59 y en agua precipitable la fuerza enlace deseada no superaba el umbral, en ambos casos no se reportó alerta.

En el año 1961 de igual forma se encontró en la fase neutra del ENSO, para ambas variables no se emitieron alertas, en humedad relativa la fuerza enlace deseada aún se encontraba por encima del umbral con tendencia descendente mientras que el agua precipitable no superó el umbral de pronóstico.

En el año 1962 persiste las condiciones neutras en el Pacífico central oriental, un año antes las fuerzas enlaces deseadas de la humedad relativa superaron ligeramente en tres ocasiones por lo que se emitieron alertas y en agua precipitable resultaron próximos al umbral sin superar este último.

Para el año 1963, se da inicio a un evento “El Niño” a partir de junio de ese año, las fuerzas enlaces deseadas en humedad relativa alertaron finalizando el año anterior, por lo que el pronóstico se redujo a corto plazo con 6 meses de anticipación y en agua precipitable, las fuerzas enlaces deseadas continuaron debajo del umbral de pronóstico.

En el año 1964, el evento “El Niño” culminó en el mes de febrero para luego dar inicio a la fase Niña a partir del mes de mayo. Las fuerzas enlaces deseadas en humedad relativa ya habían superado a fines del año 1962, en los primeros días del año aún continuaba por encima del umbral por lo que generó alerta mostrando una tendencia descendente, para el agua precipitable las fuerzas enlaces deseadas se mantuvieron por debajo del umbral hasta el último décimo día del año anterior por lo que aún estaba en la fase cálida de “El Niño” la alerta no se consideró.

En el año 1965, a partir del mes de mayo se da inicio a un evento “El Niño” de intensidad fuerte, las fuerzas enlaces deseadas en ambas variables coinciden con el evento del 1963-64 en los primeros meses del año anterior, sin embargo, estos no fueron considerados como alerta.

En el año 1966, el evento “El Niño” de 1965-66 finalizó en el mes de abril y las fuerzas enlaces deseadas coincidieron durante la fase inicial de dicho evento por lo que no se consideró las alertas que se emitieron.

En el año 1967 estuvo dominado por la fase neutra del ENSO, las fuerzas enlaces deseadas en humedad relativa continuaron por encima del umbral, pero coincidieron con la fase terminal del evento de “El Niño” 1965-66 por lo que las alertas pasaron por desapercibido,

mientras que en agua precipitable estas fuerzas no superaron el umbral durante el año anterior del pronóstico.

En el año 1968, se dio inicio a un evento “El Niño” de intensidad moderado a partir del mes de octubre, las fuerzas enlaces deseadas en humedad relativa y agua precipitable superaron el umbral desde enero y marzo respectivamente.

En el año 1969 estuvo comprendido por 2 eventos “El Niño”, uno que finalizó en el mes de mayo y otro que inició en el mes de agosto de intensidad débil. Con respecto a las fuerzas enlaces deseadas en ambas variables estuvieron por encima del umbral generando alerta en el mes de enero del año anterior de pronóstico.

En el año 1970, en el mes de julio se presentaron condiciones de la fase fría del ENSO, las fuerzas enlaces deseadas en humedad relativa estuvieron por encima del umbral de pronóstico coincidiendo con el evento de “El Niño” 1968-69 por lo que no se consideró la alerta, mientras que, en agua precipitable estas fuerzas se mantuvieron por debajo del umbral de pronóstico.

En el año 1971 ocurrieron situaciones similares al del año anterior en condiciones de la fase fría “La Niña”, nuevamente las fuerzas enlaces deseadas en humedad relativa coincidieron con el episodio terminal del evento “El Niño” 1969-70 por lo que no se consideró la alerta y en agua precipitable las fuerzas enlaces deseadas continuaron por debajo del umbral de pronóstico.

En el año 1972, se dio un evento “El Niño” de intensidad fuerte a partir del mes de mayo, las fuerzas enlaces deseadas en humedad relativa mostró una tendencia ascendente superando el umbral de pronóstico en el último décimo día del año de análisis por lo que la antelación del pronóstico fue corta, de igual forma en agua precipitable las fuerzas enlaces deseadas superaron el umbral con nueve meses de anticipación al evento de “El Niño”.

En el año 1973, el evento “El Niño” culminó en el mes de marzo, las fuerzas enlaces deseadas en el año anterior aún continuaron por encima del umbral de pronóstico tanto en húmedas relativa como en agua precipitable alertando ante un posible inicio del evento “El Niño”.

En el año 1974 estuvo comprendido por 2 fases frías del ENSO, las fuerzas enlaces deseadas en el año anterior en humedad relativa coincidieron con el término del evento “El Niño”

1972-73 por lo que las alertas no se consideraron y en agua precipitable no superaron el umbral de pronóstico.

En el año 1975 continuó con la fase de “La Niña” durante todo el año, las fuerzas enlaces deseadas en el año pasado en humedad relativa y agua precipitable mostraron una tendencia ascendente superando el umbral de pronóstico en noviembre y marzo respectivamente alertando de esta manera un posible inicio de un evento “El Niño”.

En el año 1976, en el mes de setiembre se inició un evento “El Niño” de intensidad débil. Las fuerzas enlaces deseadas en el año de análisis estuvieron por encima del umbral de pronóstico en ambas variables meteorológicas de estudio en el mes de enero que se activaron las alertas con veinte meses de anticipación al evento de “El Niño” 1976-77.

En el año 1977, sucedieron dos eventos “El Niño” uno que culminó en el mes de febrero y otro que inició en el mes de setiembre también de intensidad débil. El comportamiento de las fuerzas enlaces deseadas en ambas variables fueron similares alertando desde el inicio del año anterior por haber superado el umbral de pronóstico y no coincidir con un evento “El Niño” en desarrollo, de igual forma la anticipación fue de 20 meses para el evento “El Niño” 1977-78 como ocurrió con el anterior evento.

En el año 1978, culminó con el evento “El Niño” débil en el mes de enero, las fuerzas enlaces deseadas en el año anterior coincidieron con el término del evento de “El Niño” 1976-77 superando el umbral de pronóstico y mostrando una tendencia descendente en ambas variables.

En el año 1979, en el mes de octubre se presentaron condiciones cálidas del ENSO iniciando así un evento de intensidad débil. Con respecto a las fuerzas enlaces deseadas en el año anterior en humedad relativa estuvieron por encima del umbral de pronóstico coincidiendo con el término del evento de “El Niño” 1977-78, luego descendieron y al finalizar el año de análisis se activaron las alertas, caso contrario, en agua precipitable estas fuerzas no estuvieron por encima del umbral, por ende, las alertas no se activaron.

En el año 1980, en los dos primeros meses terminó el evento “El Niño” 1979-80, posterior a ello se presentaron condiciones neutras del ENSO. Las fuerzas enlaces deseadas en el año anterior tanto en humedad relativa como en agua precipitable estuvieron por encima del umbral de pronóstico en el mes de enero y agosto respectivamente por lo que se activaron las alertas ante no coincidir con evento “El Niño” en desarrollo.

Durante el año 1981 predominaron las condiciones neutras del ENSO, las fuerzas enlaces deseadas en el año anterior con respecto a humedad relativa y agua precipitable estuvieron por encima del umbral de pronóstico coincidiendo con la etapa terminal del evento “El Niño” 1979-80 por lo que las alarmas no se consideraron para el pronóstico.

En el año 1982 se presentaron condiciones más cálidas a partir del mes de abril dando inicio a un evento “El Niño” de intensidad muy fuerte. Las fuerzas enlaces deseadas en el año pasado se mantuvieron por encima del umbral de pronóstico tanto en humedad relativa como en agua precipitable alertando desde el inicio de año de análisis por lo que se alertó con 15 meses de anticipación este evento “El Niño”.

En el año 1983 continuó el evento “El Niño” hasta aproximadamente en el mes de junio, las fuerzas enlaces deseadas en el año pasado con respecto a humedad relativa persistieron sobre el valor del umbral de pronóstico con una tendencia descendente hacia el inicio del evento “El Niño” 1982-83 sin embargo las alertas se consideraron por el inicio del año de análisis, mientras que en agua precipitable la tendencia fue más ascendente para luego disminuir hacia el fin de año de análisis, de igual forma las alertas se consideraron por el décimo día haber estado sobre el umbral y la ausencia de un inicio de un evento “El Niño”.

En el año 1984 se presenció el inicio de un evento “La Niña” en el último trimestre del año. Las fuerzas enlaces deseadas tanto en humedad relativa como en agua precipitable en el año anterior estuvieron por debajo del umbral de pronóstico a pesar de la etapa de desarrollo y terminal del evento “El Niño” 1982-83 por lo que no se activaron las alertas de pronóstico.

En el año 1985 continuaron las condiciones frías del ENSO de la fase “La Niña” hasta el mes de agosto. Las fuerzas enlaces deseadas en ambas variables en el año pasado mostraron una tendencia ascendente, en humedad relativa se mantuvo debajo del umbral de pronóstico por lo que no se activó la alerta, caso contrario en agua precipitable hacia el mes de setiembre superó el umbral de pronóstico alertando ante un posible evento “El Niño”.

En los últimos cuatro meses del año 1986 se inició el evento “El Niño” de intensidad moderada. Las fuerzas enlaces deseadas en el año anterior en humedad relativa estuvieron ligeramente por encima del umbral de pronóstico a partir del mes de febrero por lo que se activaron las alertas anticipando el evento con 19 meses, por otro lado, para la variable de agua precipitable, estas fuerzas continuaron por encima del umbral durante todo el año de análisis, de esta manera las alertas se tomaron a partir del mes de enero con una anticipación de 20 meses al evento pronosticado.

Durante el año 1987 continuaron las condiciones cálidas del ENSO, las fuerzas enlaces deseadas en el año pasado con respecto a la humedad relativa mostraron un comportamiento descendente, sin embargo, a inicios del año de análisis estuvieron por encima del umbral de pronóstico por lo que se activaron las alertas, en caso del agua precipitable la tendencia de disminución fue menos acentuada sobre el umbral de pronóstico, de esta forma también se activaron las alertas.

En febrero del año 1988 culminó el evento “El Niño” moderado por más de un año de duración, posterior a ello se inició la fase fría del ENSO a partir del mes de mayo. Las fuerzas enlaces deseadas en humedad relativa y agua precipitable en el año pasado estuvieron por encima del umbral de pronóstico coincidiendo además con el desarrollo del evento “El Niño” 1987-88 por lo que las alertas pasaron por desapercibido.

En el año 1989 persistieron las condiciones frías del ENSO hasta el mes de mayo. Las fuerzas enlaces deseadas tanto en humedad relativa y agua precipitables estuvieron por encima del valor umbral coincidiendo con la fase terminal del evento de “El Niño” 1987-88 por lo que las alertas no se tomaron en cuenta.

En el año 1990 se presentaron condiciones neutras del ENSO, las fuerzas enlaces deseadas del año de análisis en ambas variables estuvieron por encima del umbral de pronóstico, en agua precipitable se tuvo una tendencia ascendente desde el mes de marzo mientras que en humedad relativa el comportamiento fue más irregular, sin embargo, se activaron las alarmas para los dos casos.

En el año 1991 ocurrió un evento “El Niño” de intensidad fuerte a partir del mes de mayo. Las fuerzas enlaces deseadas en humedad relativa y agua precipitable superaron el umbral de pronóstico a inicios del año de análisis por lo que se activaron las alarmas con 16 meses de anticipación.

El evento “El Niño” continuó hasta mediados del año 1992, las fuerzas enlaces deseadas del año anterior en humedad relativa y agua precipitable continuaron por encima del umbral de pronóstico, ambas con tendencia descendente, sin embargo, se tomaron en cuenta las alertas a inicios de año de análisis.

En el año 1993 se presentaron condiciones neutras del ENSO, las fuerzas enlaces deseadas del año anterior tanto en humedad relativa como agua precipitable tuvieron un

comportamiento descendente coincidiendo con el evento “El Niño” 1991-92 a principios del año por encima del umbral, por ende, las alertas no se tomaron en cuenta para el pronóstico.

En el año 1994 se dio inicio a un evento “El Niño” de intensidad moderada a partir del mes de setiembre. En cuanto a las fuerzas enlaces deseadas en humedad relativa y agua precipitable el año anterior tuvieron una tendencia ascendente hacia junio y marzo respectivamente superando el umbral de pronóstico, por lo que se activaron las alertas con más de un año de anticipación.

En el año 1995 culminó el evento “El Niño” hacia el primer trimestre del año, para luego dar inicio a una fase fría del ENSO a partir de agosto del mismo año. Las fuerzas enlaces deseadas en ambas variables estuvieron por encima del umbral de pronóstico durante el año anterior por lo que las alertas se activaron ante la ausencia de inicio de un evento “El Niño”.

En el primer trimestre del año 1996 culminó el evento “La Niña”, luego de ello se presentaron condiciones neutras hasta finalizar el año. Las fuerzas enlaces deseadas en el año anterior en humedad relativa y agua precipitable coincidieron con el evento “El Niño” 1994-95 a inicios del año de análisis superando el umbral de pronóstico por lo que las alertas no fueron tomadas en cuenta.

A partir del mes de mayo del año 1997 se dio inicio a uno de los eventos más fuertes de “El Niño” llegando a +2.4 de índice ONI al finalizar el año. Las fuerzas enlaces deseadas en humedad relativa y agua precipitable estuvieron por encima del umbral de pronóstico en el año anterior por lo que se activaron las alarmas con 16 meses de anticipación al evento.

Durante los 5 primeros meses del año 1998 continuó el evento “El Niño” para luego dar inicio en la segunda mitad del año con un evento “La Niña”. Las fuerzas enlaces deseadas en ambas variables mostraron un comportamiento descendente en el año anterior, sin embargo, a inicios de año se encontraban por cima del umbral de pronóstico por lo que las alertas se tomaron en cuenta.

Durante el año 1999 continuó el evento “La Niña”, las fuerzas enlaces deseadas en el año pasado estuvieron por debajo del umbral de pronóstico por lo que no se activaron las alertas de pronóstico.

En el año 2000, persistió el evento “La Niña”, sin embargo, las fuerzas enlaces deseadas un año anterior mostraron una tendencia ascendente para ambas variables superando el umbral

de pronóstico, por lo que se activaron las alertas en el mes de mayo del año de análisis para humedad relativa y en abril para agua precipitable.

A inicios del año 2001 culminó el evento “La Niña”, posterior a ello se presentaron condiciones neutras. Las fuerzas enlaces deseadas en ambas variables en el año anterior mostraron un comportamiento entre descendente a irregular, sin embargo, estas estuvieron por encima del umbral de pronóstico por lo que se activaron las alertas ante un posible inicio de un evento “El Niño”.

A mediados del año 2002, se dio inicio a un evento “El Niño” de intensidad fuerte. Las fuerzas enlaces deseadas en ambas variables superaron el umbral de pronóstico a inicios del año anterior por lo que se activaron las alertas con 17 meses de anticipación al evento.

El evento “El Niño” 2002-03 finalizó en los 2 primeros meses del año 2003, posterior a ello nuevamente se presentaron condiciones neutras del ENSO. Las fuerzas enlaces deseadas en ambas variables mostraron una tendencia descendente, sin embargo, a inicios del año anterior ya habían superado el umbral de pronóstico por lo que se activaron las alertas antes del inicio del evento “El Niño” 2002-03.

En el mes de julio del año 2004 se dio inicio a un evento “El Niño” de intensidad débil. Las fuerzas enlaces deseadas en humedad relativa y agua precipitable coincidieron con la fase terminal del evento “El Niño” 2002-03 por lo que las alertas no fueron tomadas en cuenta a pesar de haber superado el umbral de pronóstico.

En los 2 primeros meses del año 2005 culminó el evento “El Niño” 2004-05, luego de ello se presentaron condiciones neutras hasta el mes de noviembre para dar inicio a un evento “La Niña”. Las fuerzas enlaces deseadas en ambas variables estuvieron por encima del umbral de pronóstico durante el año anterior con una tendencia irregular por lo que se activaron las alarmas a inicios del año de análisis.

A partir del mes de setiembre del año 2006 se dio inicio a otro evento “El Niño” de intensidad débil. Las fuerzas enlaces deseadas en ambas variables durante el año pasado continuaron por encima del umbral de pronóstico, sin embargo, coincidieron con la fase terminal del evento “El Niño” 2004-05 por lo que las alertas no se tomaron en cuenta.

En el año 2007 se presentaron condiciones frías a partir del mes de julio dando inicio a un evento “La Niña”. Las fuerzas enlaces deseadas en ambas variables estuvieron por encima del umbral de pronóstico en el año anterior sin coincidir con un evento “El Niño” por lo que

se activaron las alarmas a inicios del año de análisis, en humedad relativa estas fuerzas tuvieron un comportamiento irregular, en cambio en agua precipitable fue una tendencia descendente.

En el año 2008 continuaron las condiciones frías del ENSO. Las fuerzas enlaces deseadas en el año anterior tanto en humedad relativa y agua precipitable superaron el umbral de pronóstico a inicios del año coincidiendo con la fase terminal del evento “El Niño” 2006-07 por lo que las alertas no se tomaron en cuenta.

A mediados del año 2009 se dio inicio a un evento “El Niño” de intensidad fuerte llegando a alcanzar valores de ONI hasta de +1.6. Las fuerzas enlaces deseadas en el año anterior en humedad relativa estuvieron oscilando ligeramente el umbral de pronóstico mientras que en agua precipitable se mantuvieron durante todo el año de análisis. En ambas variables las alertas se activaron a inicios del mes de enero del año de análisis por lo que la anticipación fue de 18 meses al evento.

En el primer trimestre del año 2010 culminó el evento “El Niño” 2009-10 para luego dar inicio a partir del mes de junio a un evento “La Niña”. Las fuerzas enlaces deseadas en ambas variables persistieron por encima del umbral de pronóstico durante todo el año anterior por lo que a inicios del año de análisis se activaron las alertas.

Durante el año 2011 continuaron las condiciones frías del ENSO. Las fuerzas enlaces deseadas coincidieron con la fase terminal del evento “El Niño” 2009-10, a pesar que estas superaron el umbral de pronóstico en ambas variables, las alertas no se consideraron.

A inicios del año 2012, el evento “La Niña” culminó en el primer trimestre para luego presentar condiciones neutras. Las fuerzas enlaces deseadas en el año anterior en cuanto a humedad relativa estuvieron por encima del umbral de pronóstico con un comportamiento regular, mientras que en agua precipitable superó el umbral a mediados del mes de marzo mostrando una tendencia ascendente, por ello se activaron las alertas para las dos variables.

Durante el año 2013 se presentaron condiciones neutras del ENSO. Las fuerzas enlaces deseadas continuaron por encima del umbral de pronóstico en el año anterior, por lo que se activaron las alertas sin la presencia de un evento “El Niño”.

A fines del año 2014, se dio inicio a un evento muy fuerte de “El Niño”. Las fuerzas enlaces deseadas en el año anterior en ambas variables persistieron sobre el umbral de pronóstico durante todo el año, de esta manera se activaron las alarmas con 22 meses de anticipación.

Durante el año 2015 continuó el evento “El Niño” llegando a alcanzar valores de +2.6 de índice ONI. Las fuerzas enlaces deseadas en el año anterior en ambas variables continuaron por encima del umbral de pronóstico por lo que también se activaron las alertas a inicios del año de análisis.

El evento “El Niño” culminó a inicios del año 2016, las fuerzas enlaces deseadas en ambas variables mostraron una tendencia descendente en el año anterior superando el umbral de pronóstico, sin embargo, coincidieron con el desarrollo del evento “El Niño” por lo que las alertas pasaron desapercibidas.

En el año 2017 se presentaron condiciones neutras del ENSO en el Pacífico central oriental. Las fuerzas enlaces deseadas en ambas variables superaron ligeramente el umbral de pronóstico el año anterior coincidiendo con la fase terminal del evento “El Niño” 2014-15-16 por lo que las alertas también pasaron por desapercibidas.

En el año 2018 se dio inicio a un evento “El Niño” a partir del mes de octubre. Las fuerzas enlaces deseadas en el año anterior en humedad relativa estuvieron por encima del umbral de pronóstico, en agua precipitable mostraron una tendencia ascendente superando el umbral a fines del mes de enero, en ambos casos se activaron las alertas con 21 meses de anticipación al evento mencionado.

A inicios del año 2019 continuó el evento “El Niño”, las fuerza enlaces deseadas en el año anterior en ambas variables mostraron una tendencia descendente, sin embargo, se tomaron en cuenta las alertas por haber superado el umbral de pronóstico y no haber un evento “El Niño” en desarrollo.

En los primeros meses hasta mediados del año 2020 predominaron las condiciones neutras del ENSO, posterior a ello se dio inicio a un evento “La Niña”. Las fuerzas enlaces deseadas en el año anterior en ambas variables superaron el umbral de pronóstico coincidiendo con el evento “El Niño” 2018-19, de esta manera las alertas no se tomaron en cuenta.

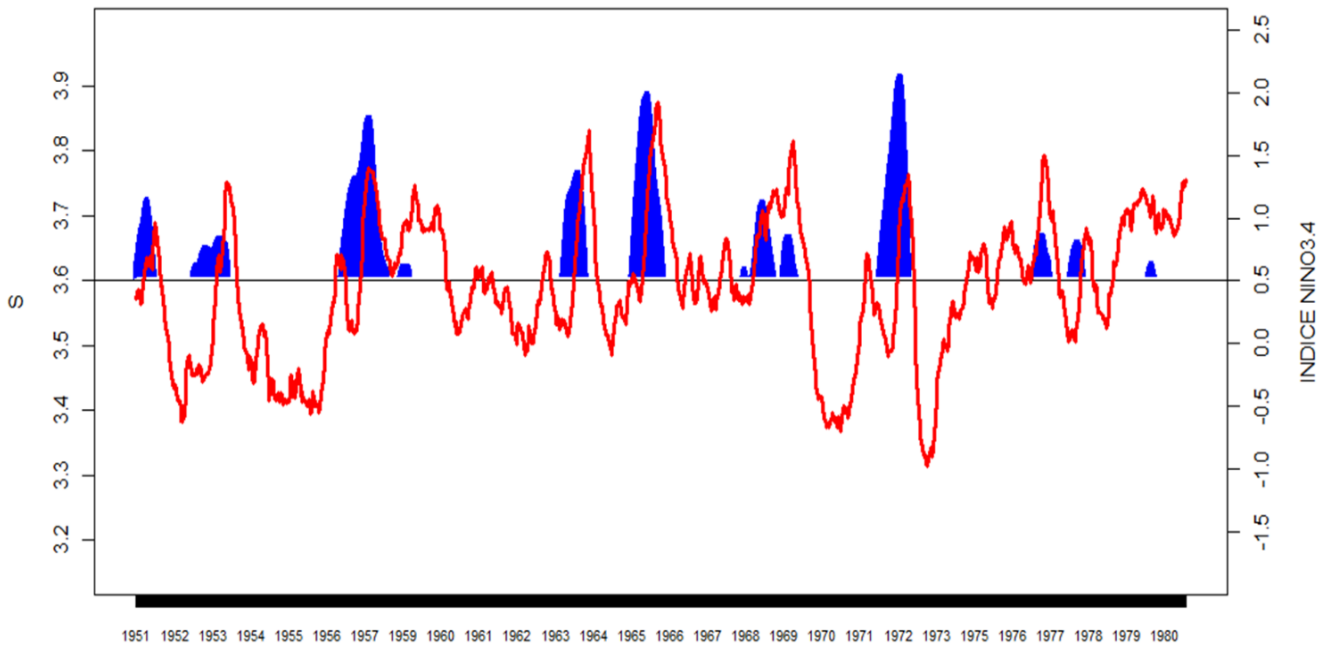


Figura 50. Serie temporal de las fuerzas enlaces deseadas de humedad relativa (color rojo) e índice Niño 3.4 (sombreado de color azul) con el umbral (línea negra horizontal) para el periodo de prueba (1953-1980)

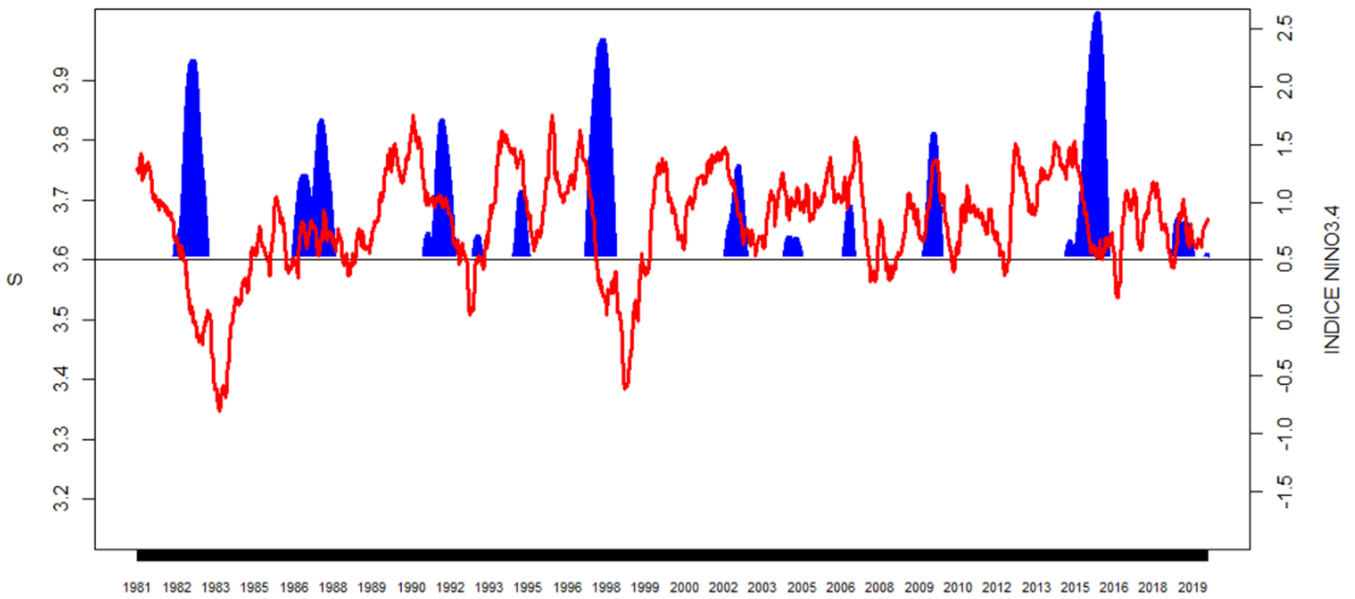


Figura 51. Serie temporal de las fuerzas enlaces deseadas de humedad relativa (color rojo) e índice Niño 3.4 (sombreado de color azul) con el umbral (línea negra horizontal) para el periodo de validación de pronóstico (1981-2020)

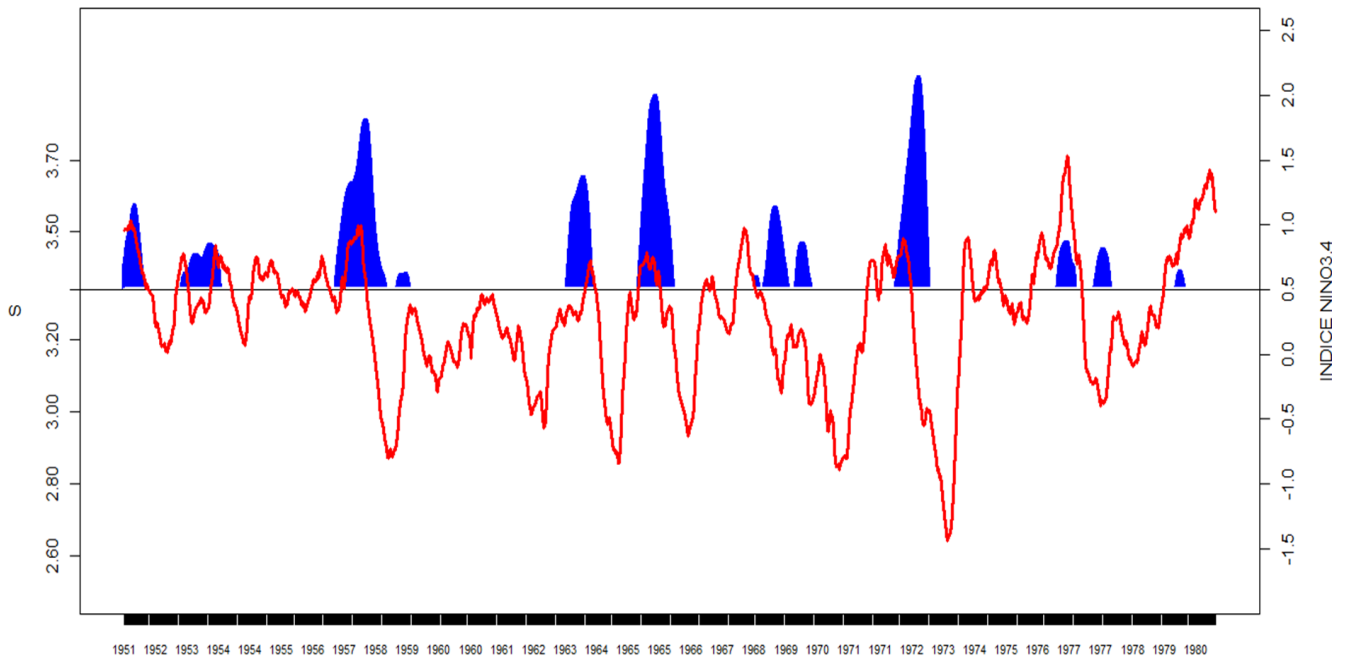


Figura 52. Serie temporal de las fuerzas enlaces deseadas de agua precipitable (color rojo) e índice Niño 3.4 (sombreado de color azul) con el umbral (línea negra horizontal) para el periodo de prueba (1953-1980)

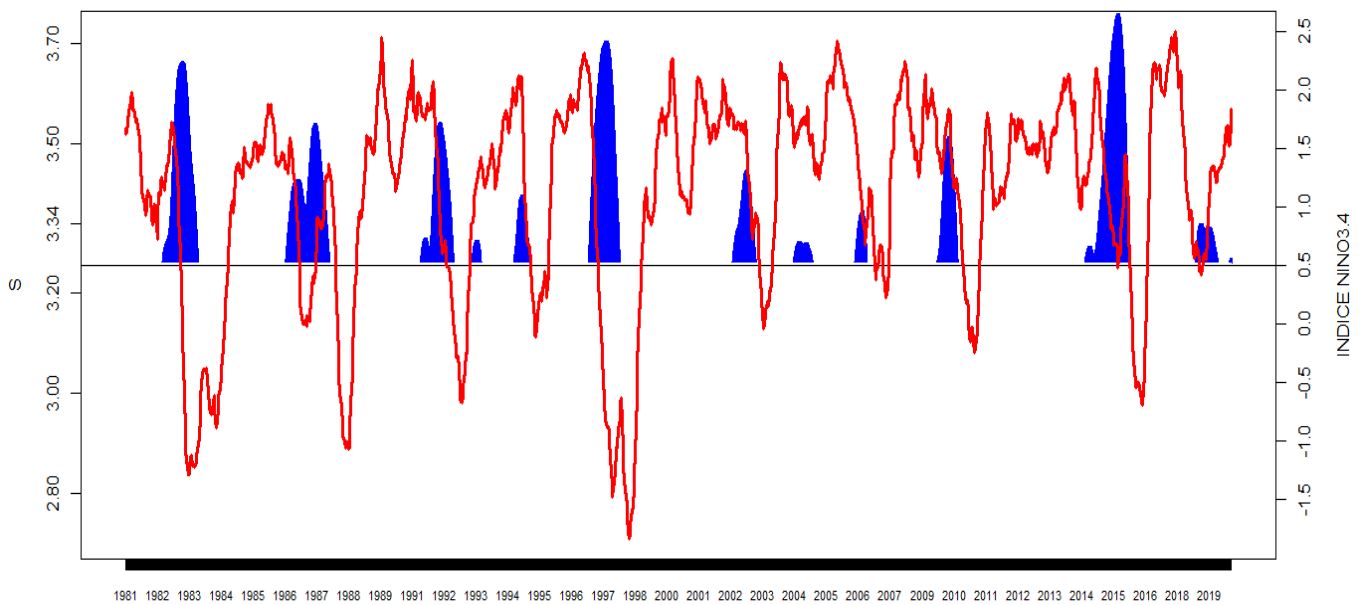


Figura 53. Serie temporal de las fuerzas enlaces deseadas de agua precipitable (color rojo) e índice Niño 3.4 (sombreado de color azul) con el umbral (línea negra horizontal) para el periodo de validación de pronóstico (1981-2020)

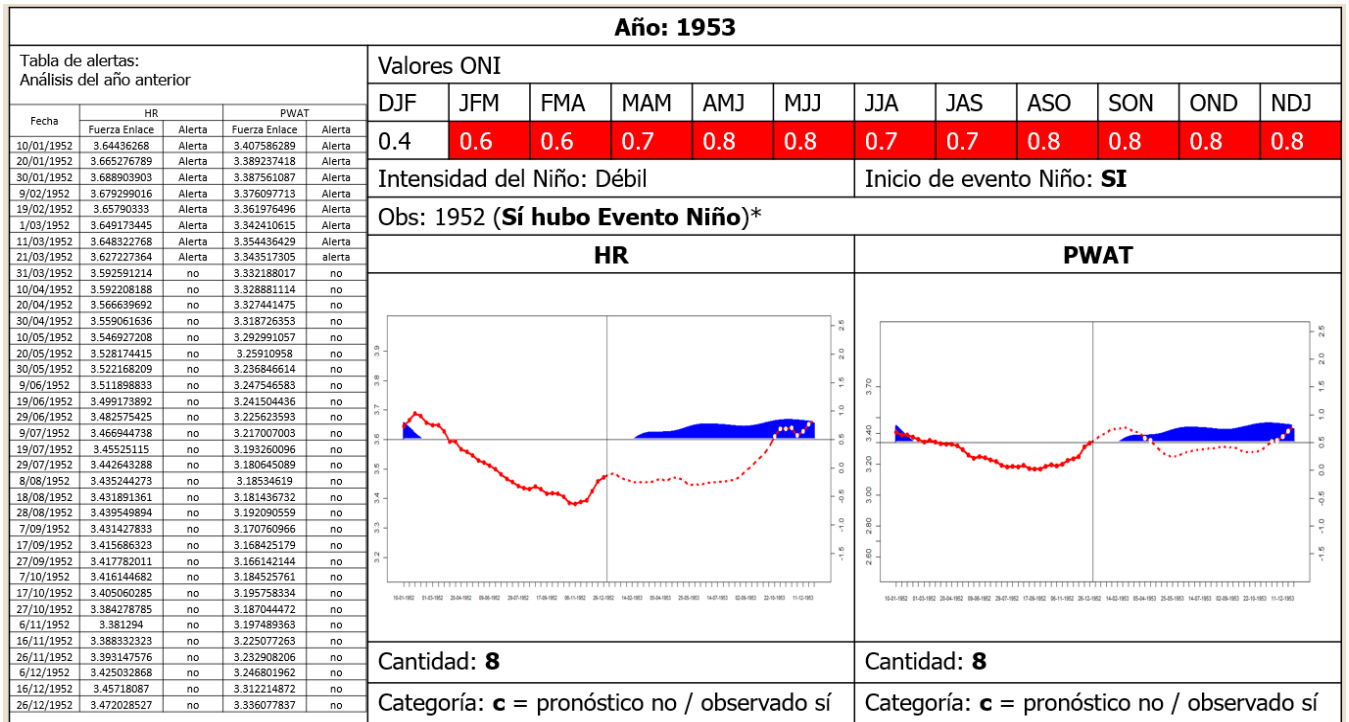


Figura 54. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1953

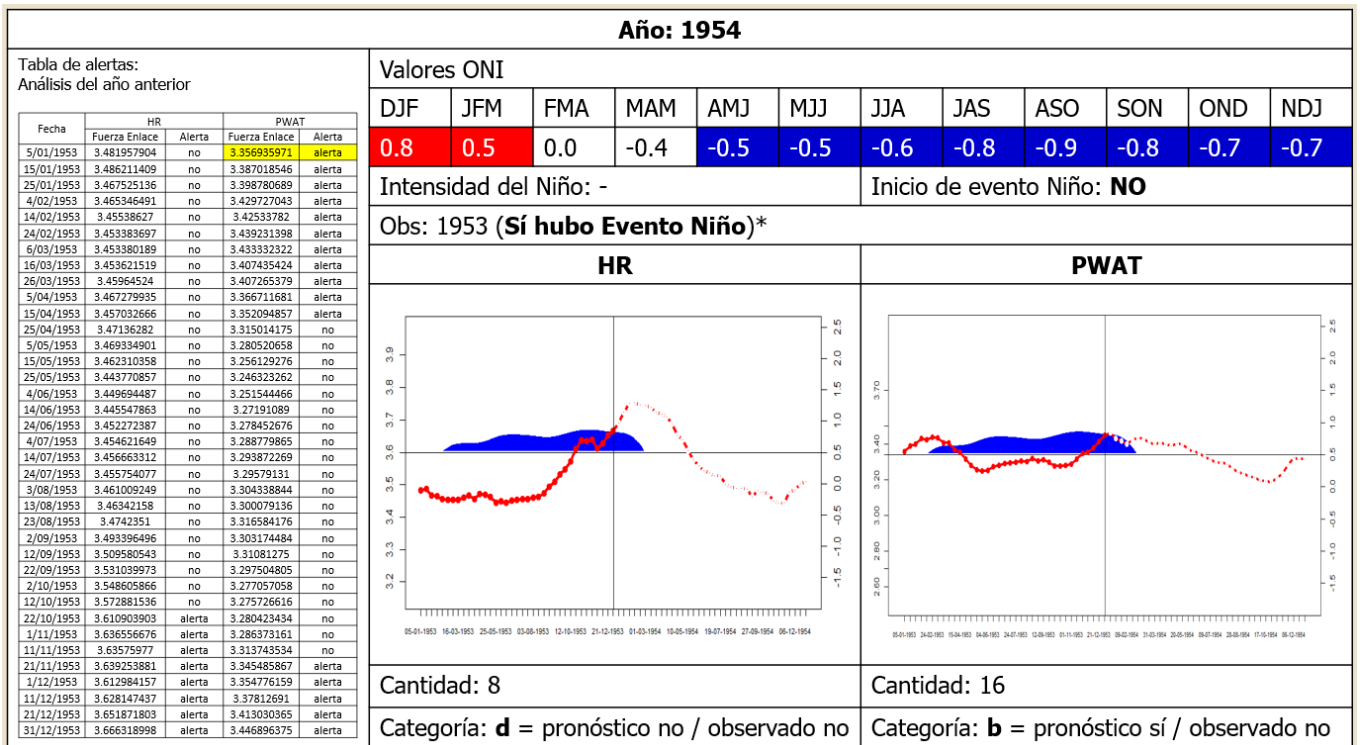


Figura 55. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1954

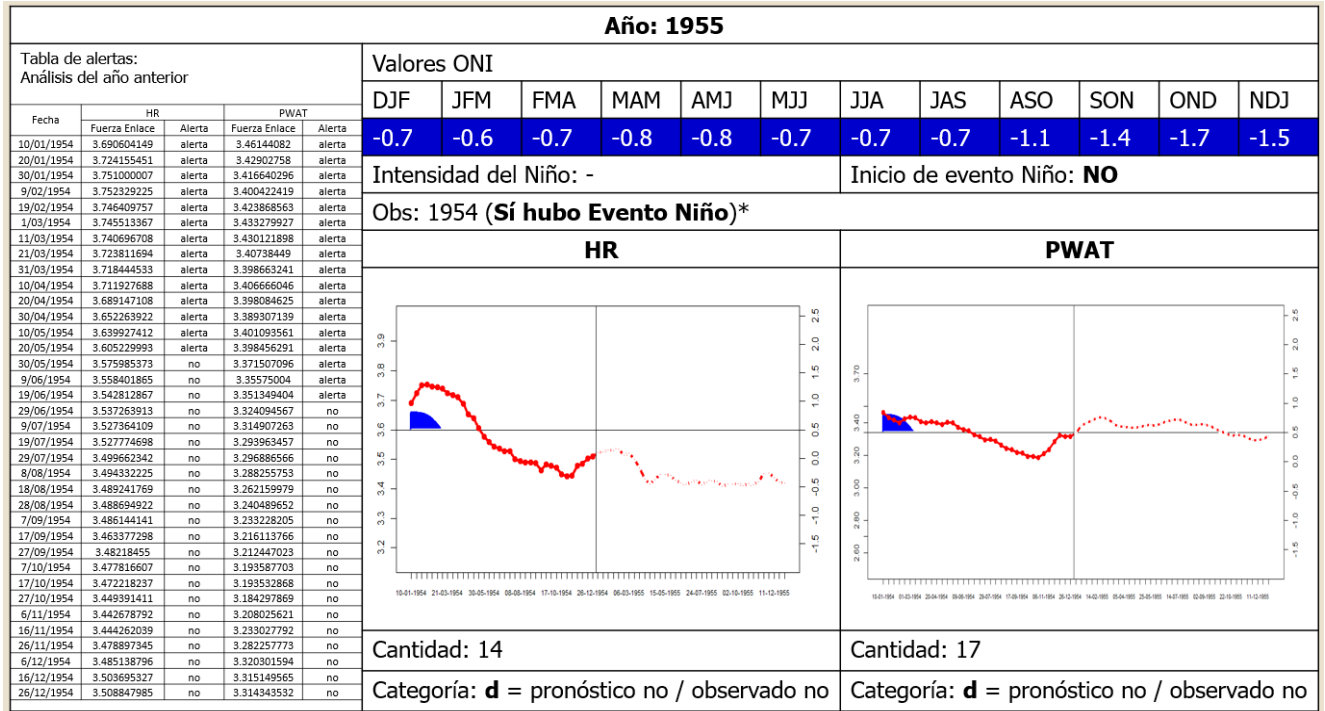


Figura 56. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1955

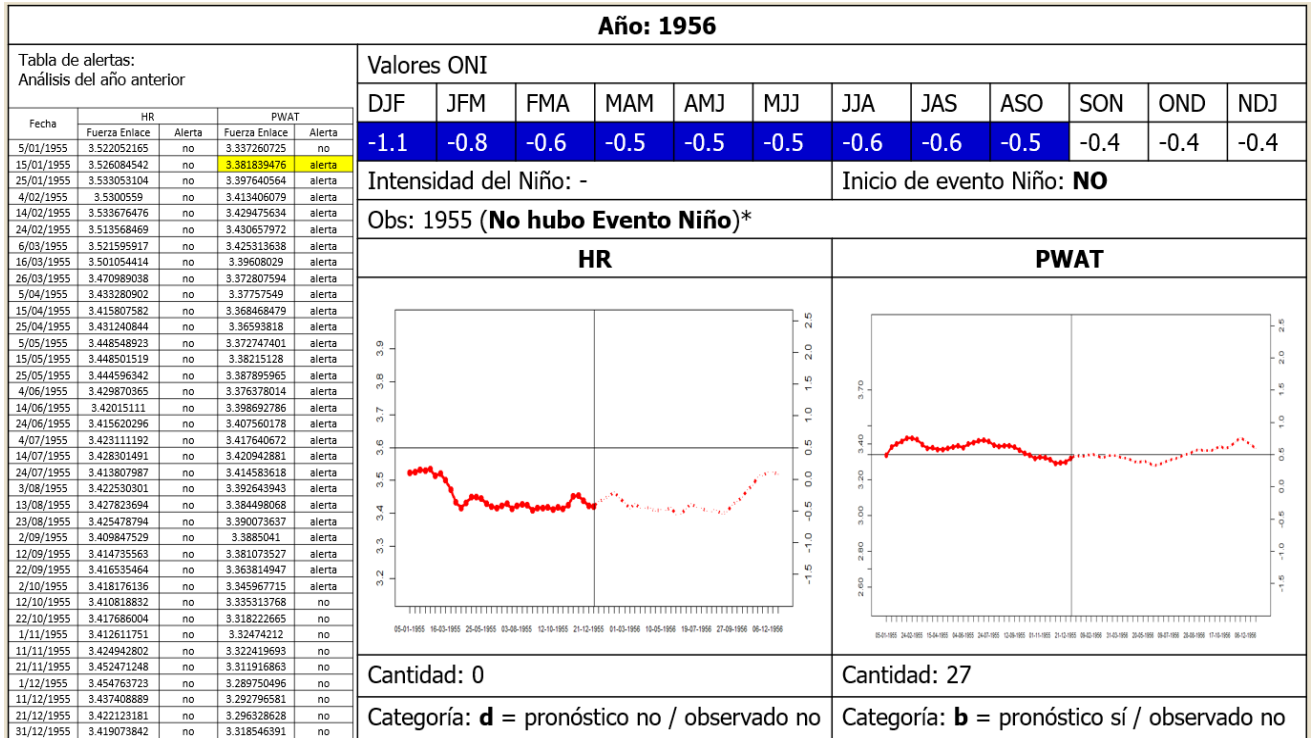


Figura 57. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1956

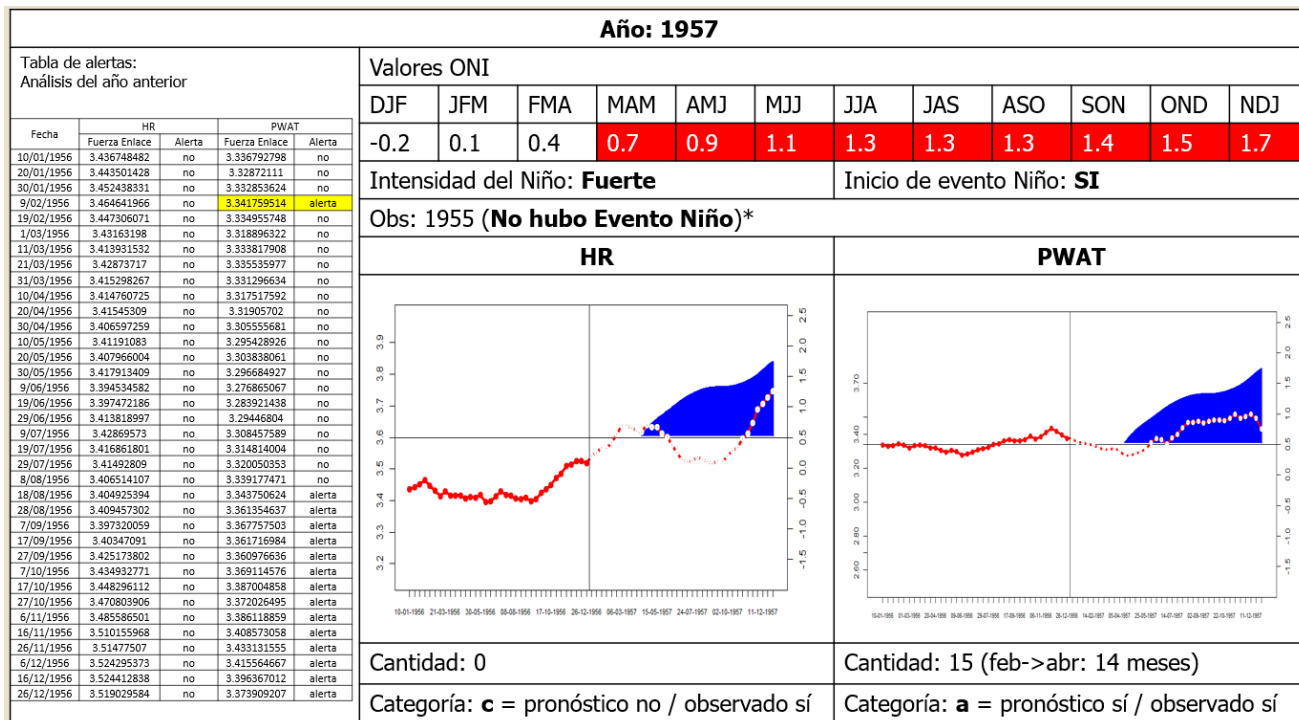


Figura 58. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1957

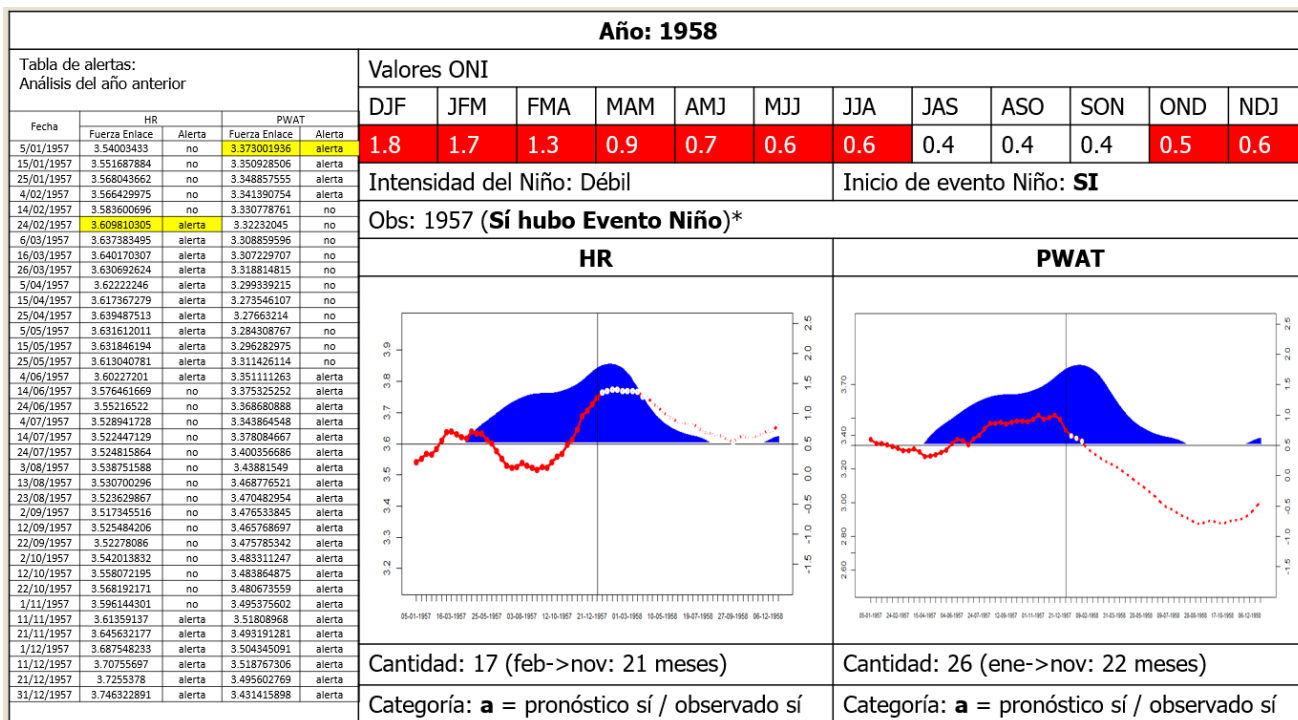


Figura 59. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1958

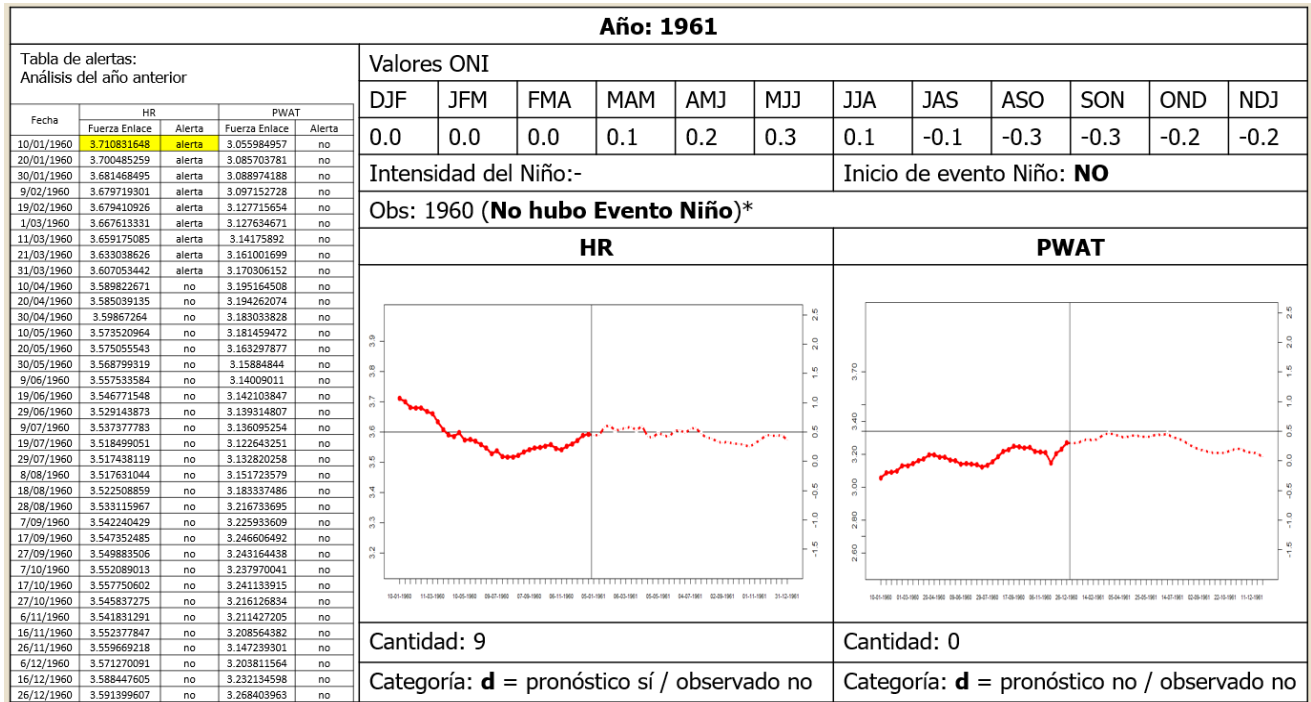


Figura 62. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1961

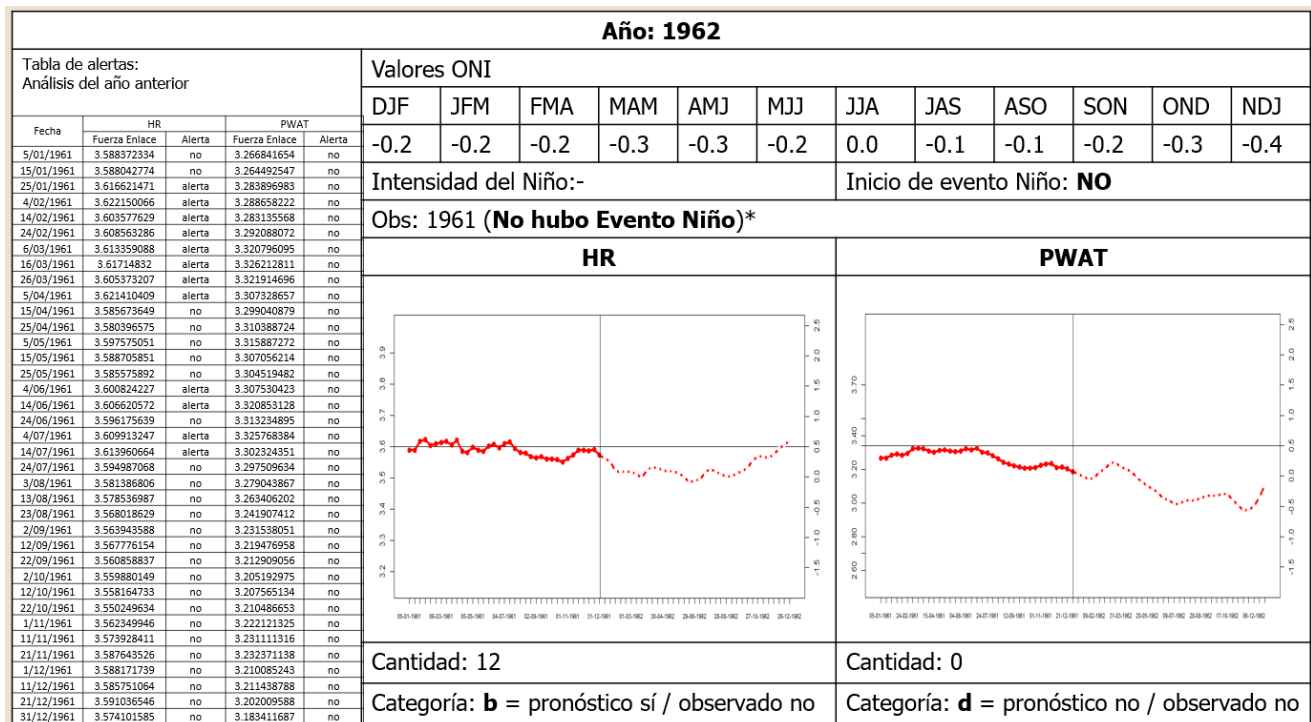


Figura 63. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1962

Año: 1963																
Tabla de alertas: Análisis del año anterior					Valores ONI											
Fecha	HR		PWAT		DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
	Fuerza Enlace	Alerta	Fuerza Enlace	Alerta	-0.4	-0.2	0.2	0.3	0.3	0.5	0.9	1.1	1.2	1.3	1.4	1.3
10/01/1962	3.56129257	no	3.17346089	no	Intensidad del Niño: Moderado						Inicio de evento Niño: SI					
Obs: 1962 (No hubo Evento Niño)*																
HR								PWAT								
Cantidad: 2 (dic->jun: 6 meses)								Cantidad: 0								
Categoría: a = pronóstico sí / observado sí								Categoría: c = pronóstico no / observado sí								

Figura 64. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1963

Año: 1964																
Tabla de alertas: Análisis del año anterior					Valores ONI											
Fecha	HR		PWAT		DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
	Fuerza Enlace	Alerta	Fuerza Enlace	Alerta	1.1	0.6	0.1	-0.3	-0.6	-0.6	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8
5/01/1963	3.627153232	alerta	3.156529638	no	Intensidad del Niño: -						Inicio de evento Niño: NO					
Obs: 1963 (Sí hubo Evento Niño)*																
HR								PWAT								
Cantidad: 14								Cantidad: 1								
Categoría: b = pronóstico sí / observado no								Categoría: d = pronóstico no / observado no								

Figura 65. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1964

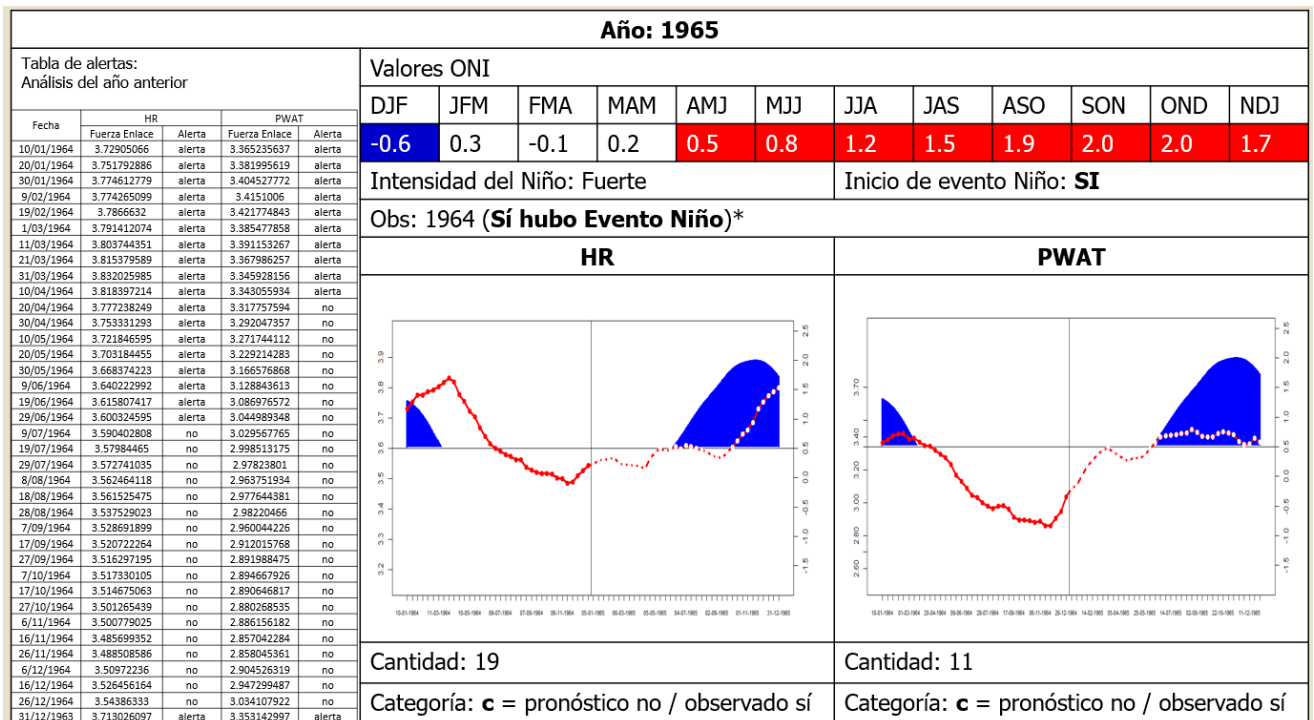


Figura 66. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1965

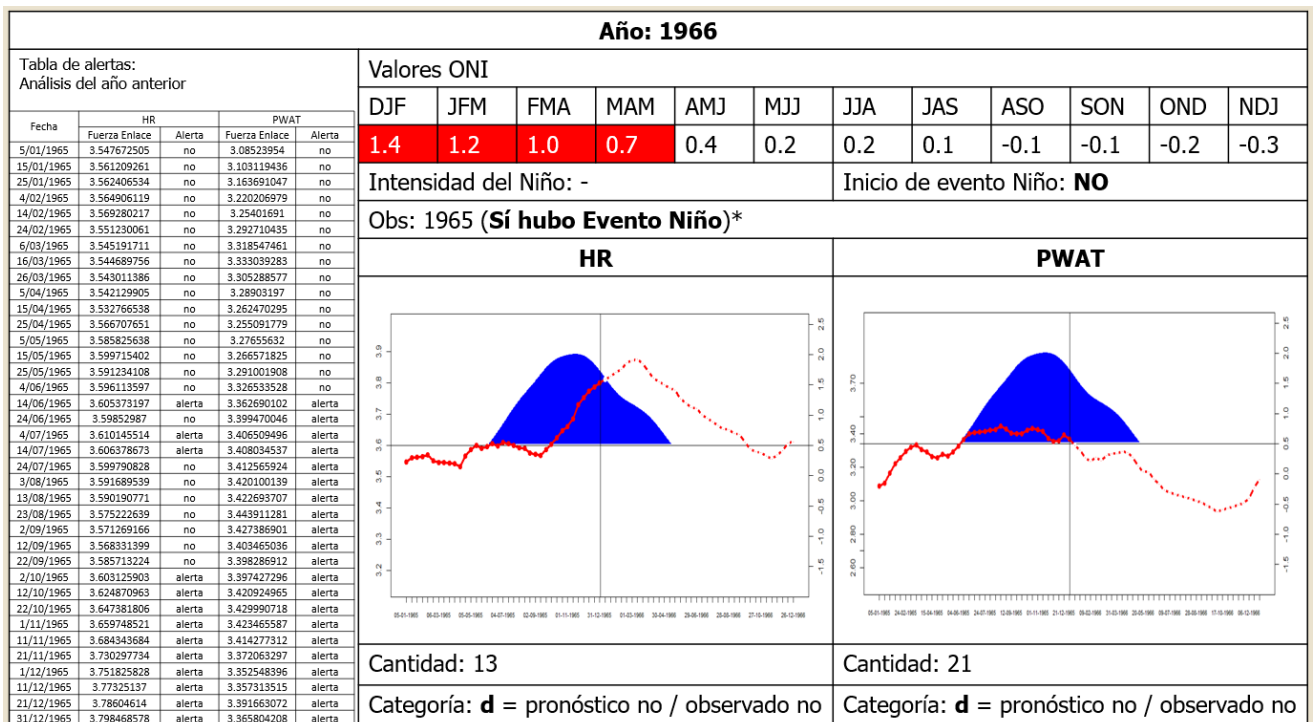


Figura 67. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1966

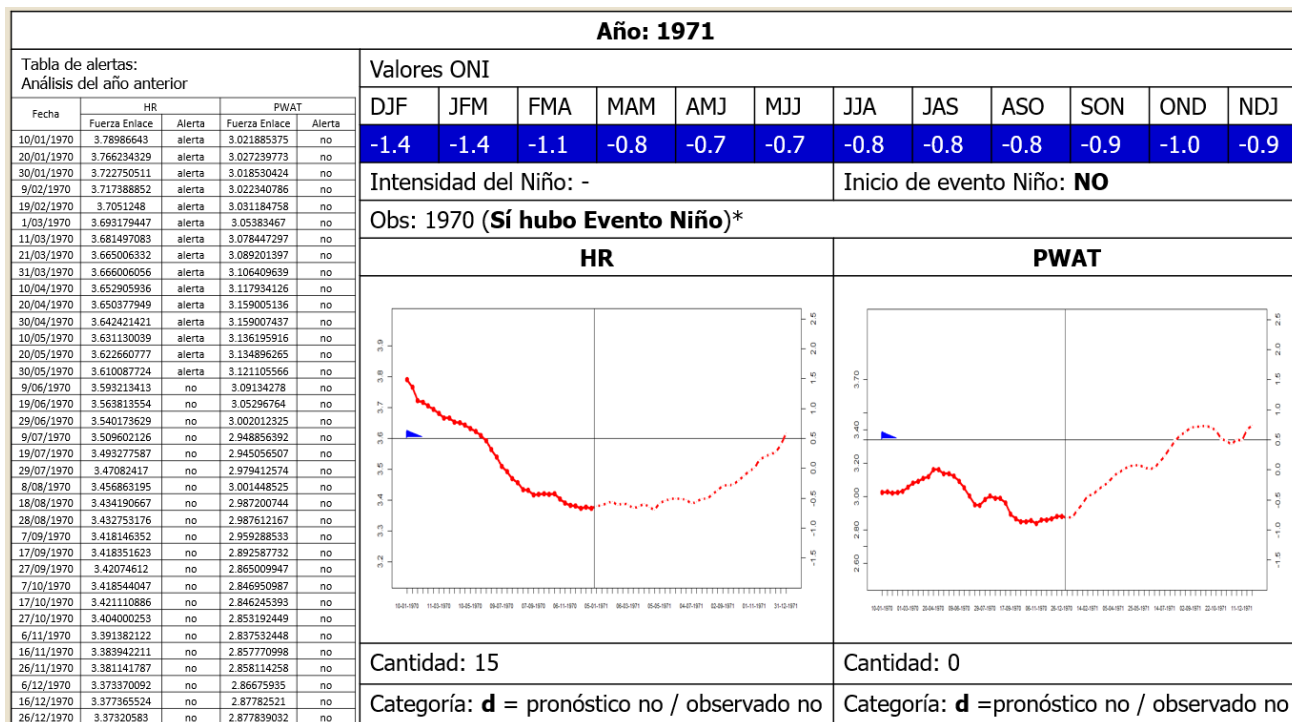


Figura 72. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1971

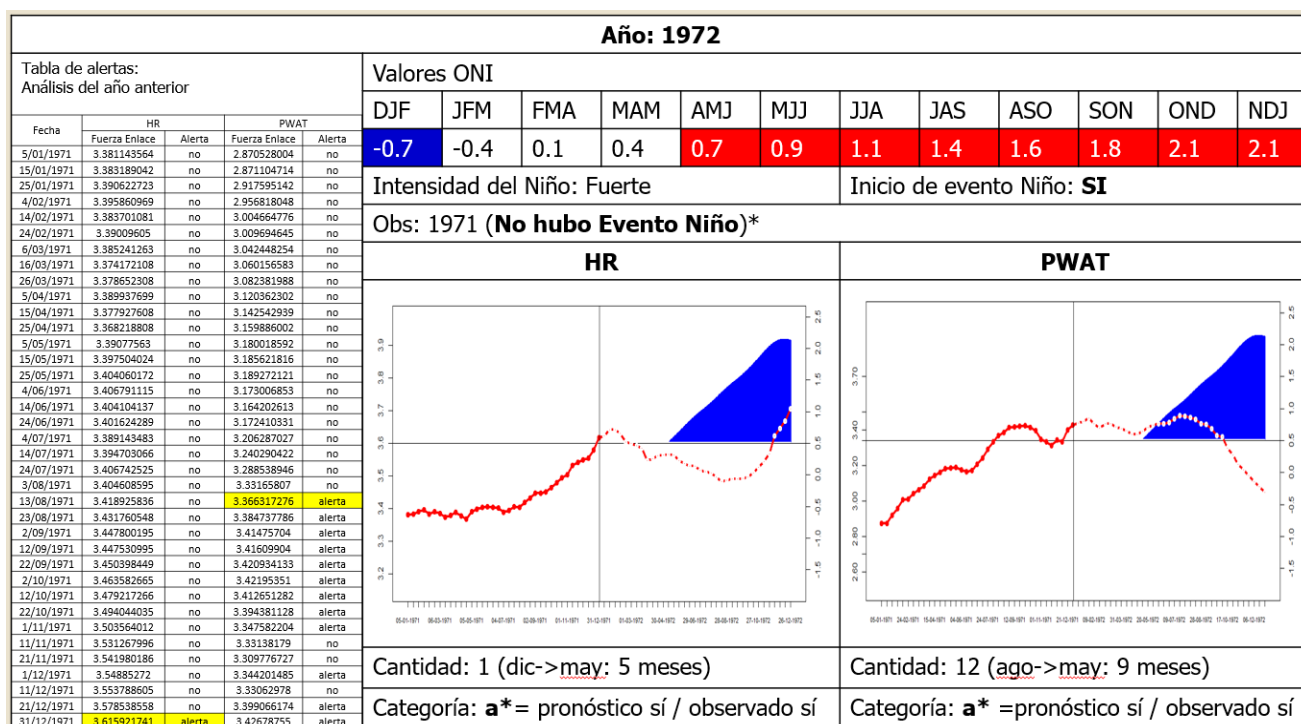


Figura 73. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1972

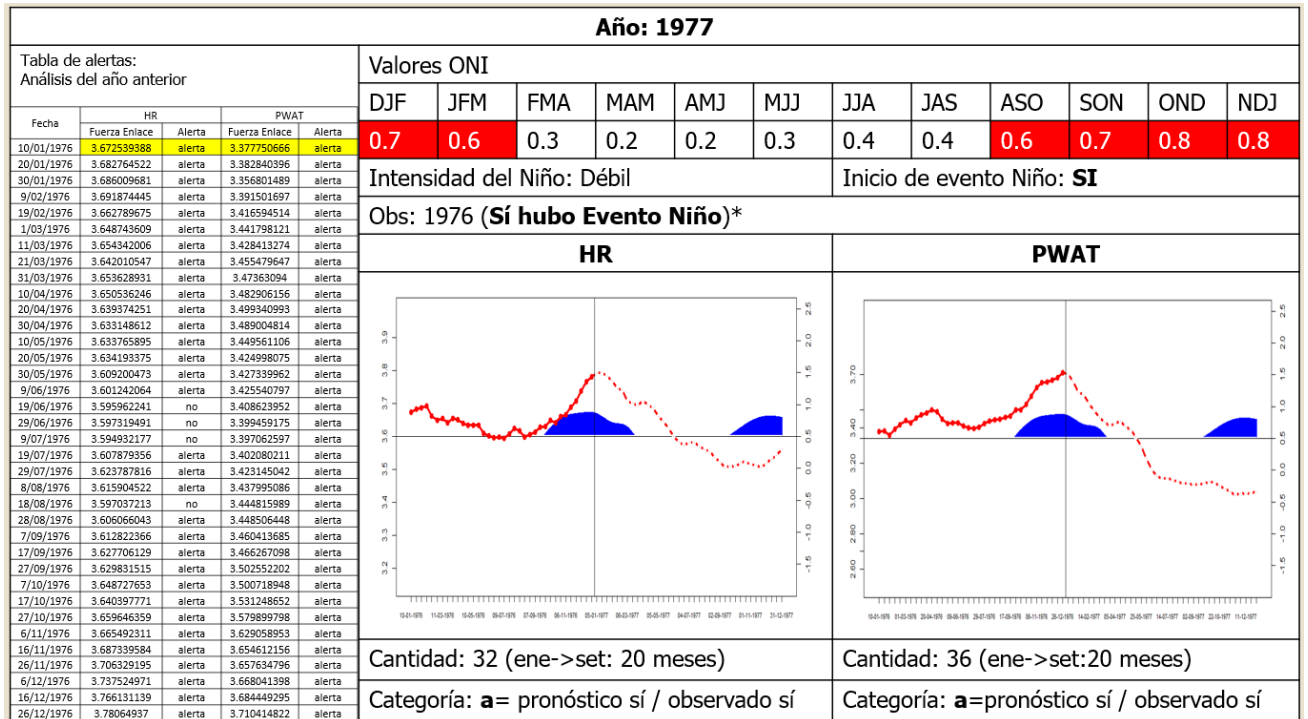


Figura 78. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1977

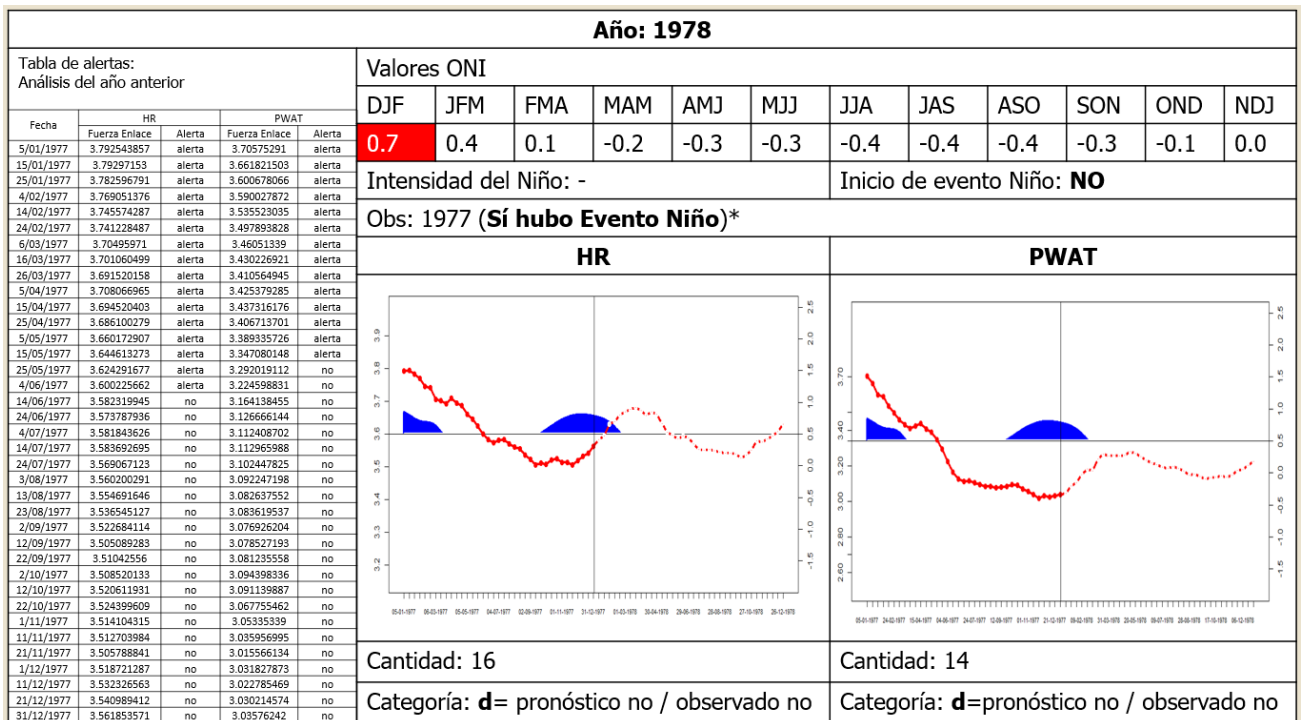


Figura 79. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1978

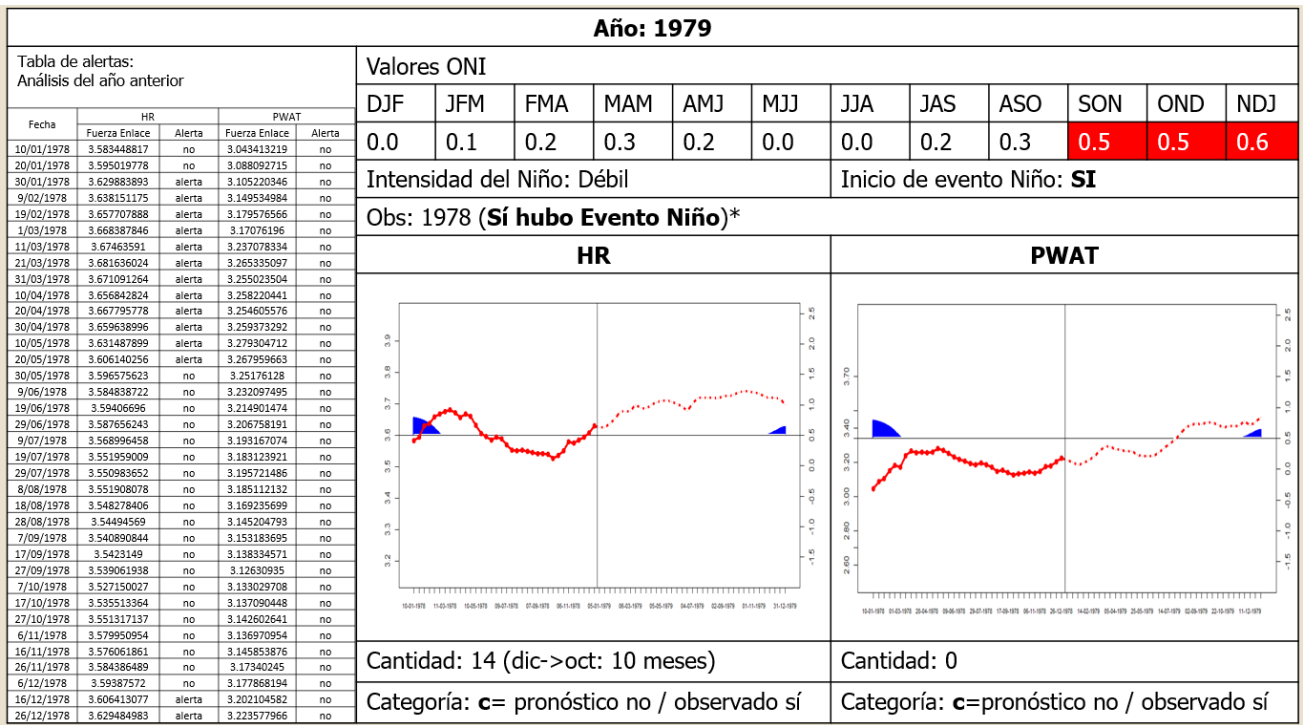


Figura 80. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1979

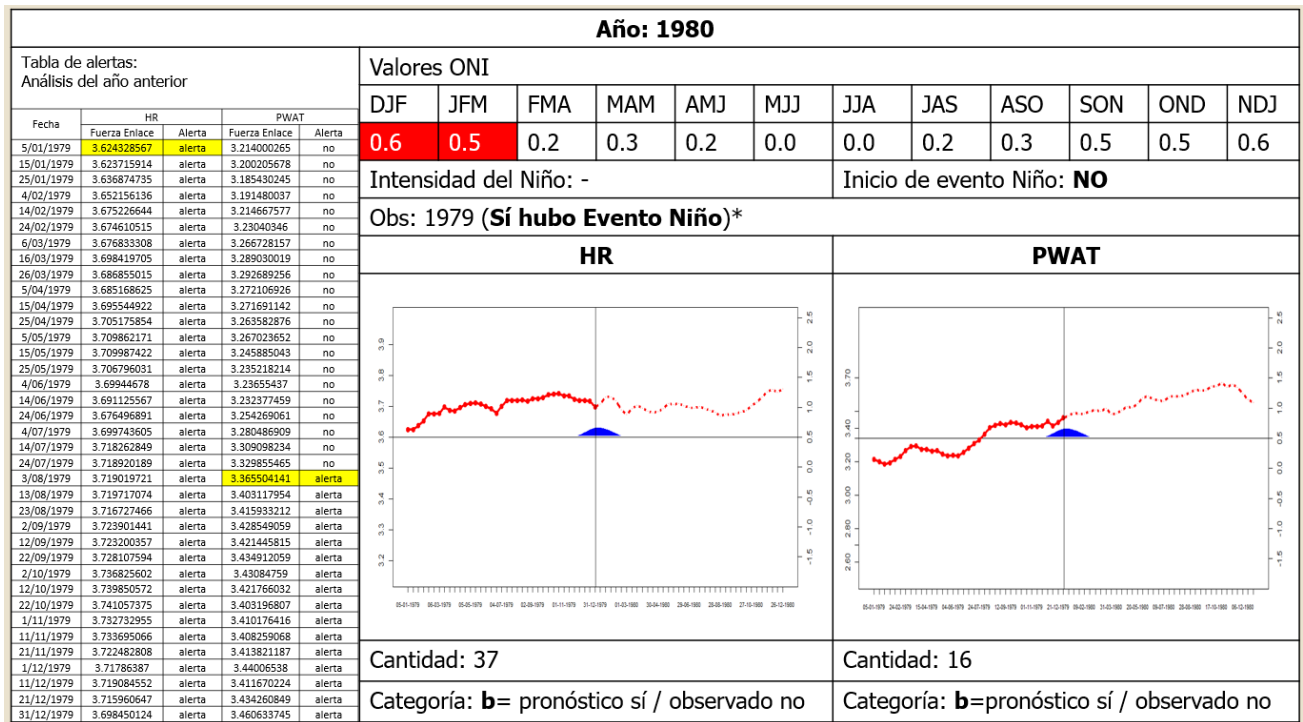


Figura 81. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1980

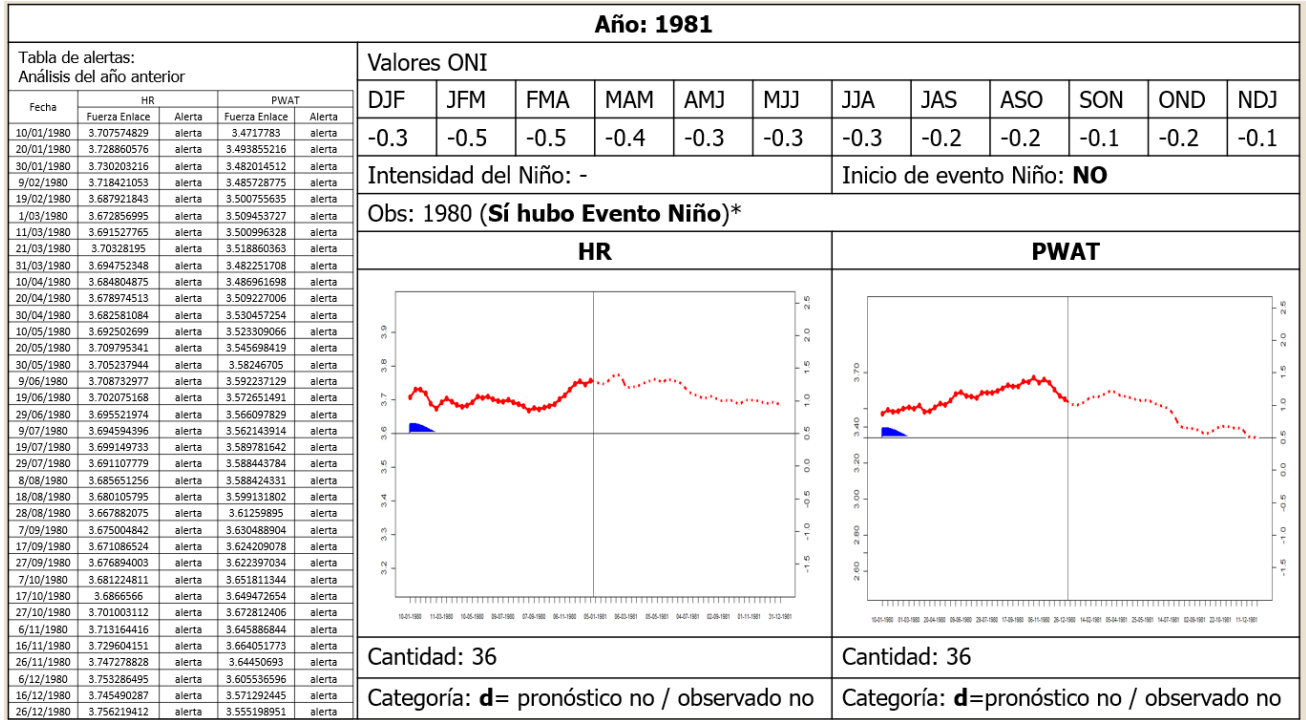


Figura 82. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1981

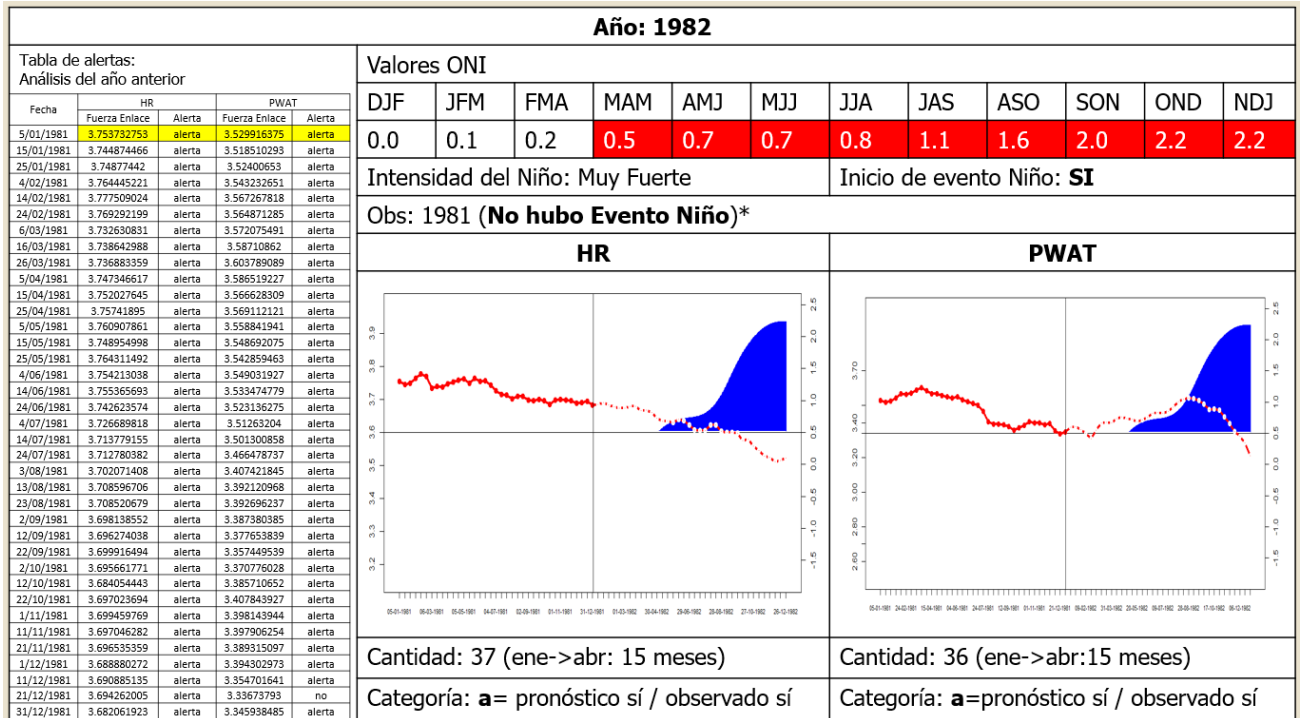


Figura 83. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1982

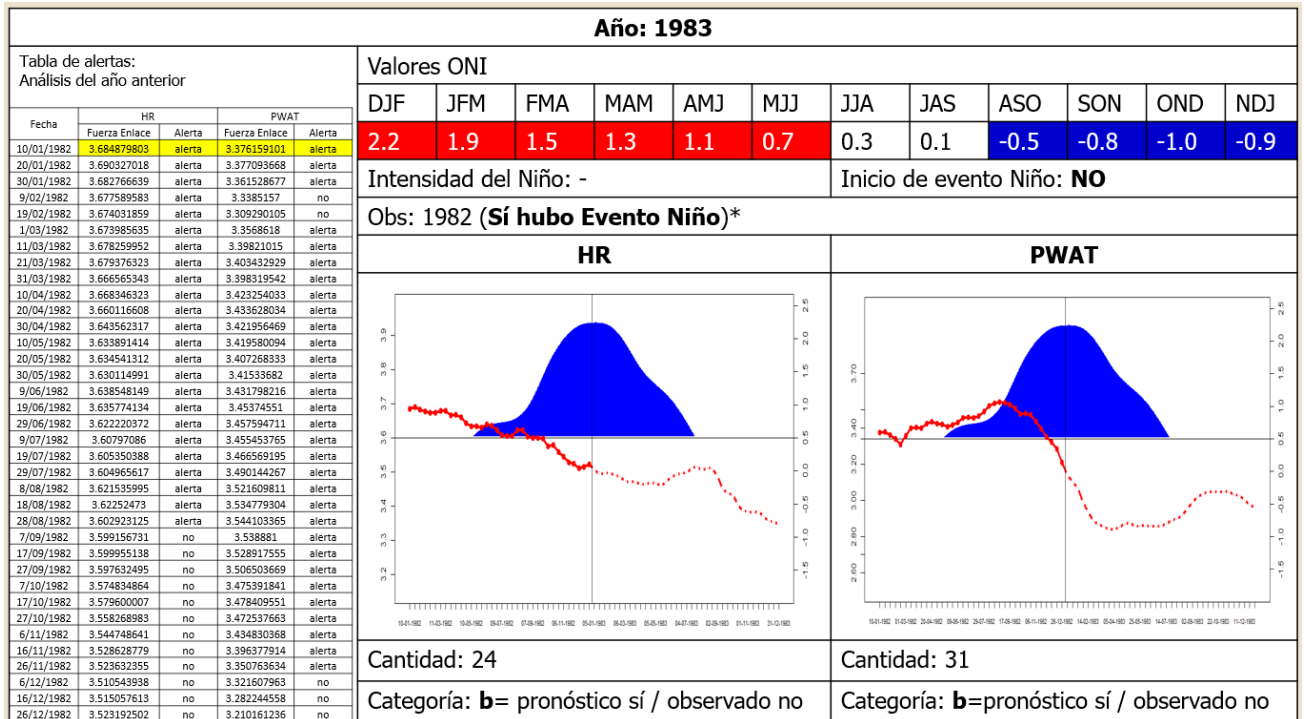


Figura 84. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1983

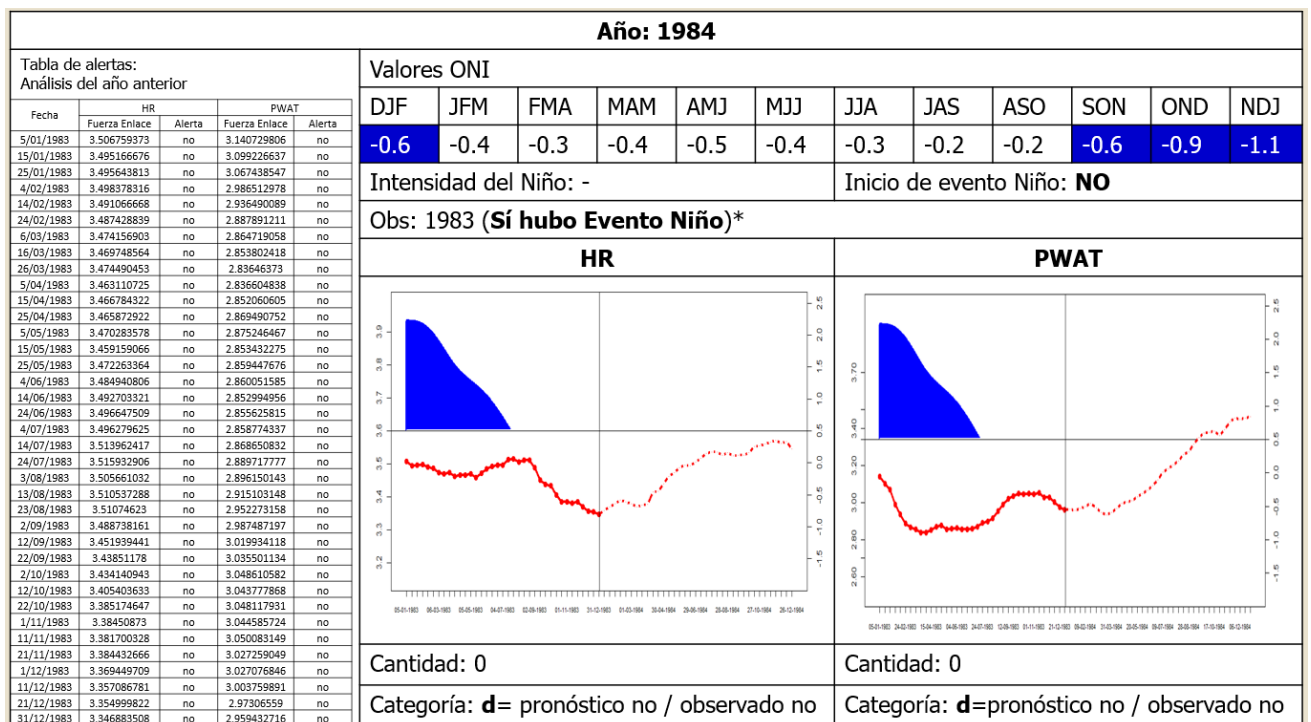


Figura 85. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1984

Año: 1985																																																																																																																												
Tabla de alertas: Análisis del año anterior			Valores ONI																																																																																																																									
			DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ																																																																																																														
			-1.0	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.6	-0.5	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4																																																																																																														
			Intensidad del Niño: -					Inicio de evento Niño: NO																																																																																																																				
			Obs: 1984 (No hubo Evento Niño)*																																																																																																																									
			HR						PWAT																																																																																																																			
Fecha			HR		PWAT																																																																																																																							
Fuera Enlace			Fuerza Enlace	Alerta	Fuerza Enlace	Alerta	Cantidad: 0						Cantidad: 11																																																																																																															
Alerta							Categoría: d = pronóstico no / observado no						Categoría: b =pronóstico sí / observado no																																																																																																															
10/01/1984	3.359754414	no	2.962152083	no	10/05/1984	3.46173641	no	3.010091296	no	10/09/1984	3.474577755	no	3.031399565	no	10/13/1984	3.487886028	no	3.048390787	no	10/17/1984	3.496179965	no	3.066946039	no	10/21/1984	3.49482267	no	3.090010148	no	10/25/1984	3.505708397	no	3.123275231	no	10/29/1984	3.517225793	no	3.162849782	no	11/02/1984	3.532524985	no	3.179811318	no	11/06/1984	3.536749766	no	3.204019543	no	11/10/1984	3.5361807	no	3.224929278	no	11/14/1984	3.526025486	no	3.256829059	no	11/18/1984	3.538396048	no	3.275618593	no	11/22/1984	3.525380556	no	3.315913535	no	11/26/1984	3.525479978	no	3.3459344705	alerta	12/01/1984	3.527308225	no	3.375963046	alerta	12/05/1984	3.533454897	no	3.379542516	alerta	12/09/1984	3.55296976	no	3.385298817	alerta	12/13/1984	3.554970962	no	3.361894119	alerta	12/17/1984	3.559499953	no	3.390786773	alerta	12/21/1984	3.566748443	no	3.433826745	alerta	12/25/1984	3.570859195	no	3.45464548	alerta	12/29/1984	3.562391264	no	3.445556131	alerta	12/31/1984	3.568050895	no	3.456771036	alerta	12/31/1984	3.544835569	no	3.460709973	alerta

Figura 86. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1985

Año: 1986																																																																																																																																																																																								
Tabla de alertas: Análisis del año anterior			Valores ONI																																																																																																																																																																																					
			DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ																																																																																																																																																																										
			-0.5	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	0.0	0.2	0.4	0.7	0.9	1.1	1.2																																																																																																																																																																										
			Intensidad del Niño: Moderado					Inicio de evento Niño: SI																																																																																																																																																																																
			Obs: 1985 (No hubo Evento Niño)*																																																																																																																																																																																					
			HR						PWAT																																																																																																																																																																															
Fecha			HR		PWAT																																																																																																																																																																																			
Fuera Enlace			Fuerza Enlace	Alerta	Fuerza Enlace	Alerta	Cantidad: 29 (feb->set: 19 meses)						Cantidad: 37 (ene->set: 20 meses)																																																																																																																																																																											
Alerta							Categoría: a = pronóstico sí / observado sí						Categoría: a =pronóstico sí / observado sí																																																																																																																																																																											
5/01/1985	3.547079019	no	3.456796055	alerta	5/05/1985	3.549983985	no	3.445749122	alerta	5/09/1985	3.559737175	no	3.440040361	alerta	5/13/1985	3.585364685	no	3.446449956	alerta	5/17/1985	3.582863807	no	3.431432144	alerta	5/21/1985	3.608048375	alerta	3.435109155	alerta	5/25/1985	3.619562441	alerta	3.452165158	alerta	5/29/1985	3.620502936	alerta	3.492135609	alerta	6/02/1985	3.610586273	alerta	3.474789101	alerta	6/06/1985	3.619366356	alerta	3.462319772	alerta	6/10/1985	3.60864404	alerta	3.465511798	alerta	6/14/1985	3.607933277	alerta	3.462612481	alerta	6/18/1985	3.616107113	alerta	3.459433422	alerta	6/22/1985	3.629843715	alerta	3.456485698	alerta	6/26/1985	3.62895104	alerta	3.453395634	alerta	6/30/1985	3.630877037	alerta	3.451645103	alerta	7/04/1985	3.656020516	alerta	3.461727748	alerta	7/08/1985	3.648564994	alerta	3.466663929	alerta	7/12/1985	3.638793491	alerta	3.47281106	alerta	7/16/1985	3.623080619	alerta	3.485033746	alerta	7/20/1985	3.621157827	alerta	3.499392701	alerta	7/24/1985	3.624266062	alerta	3.501960009	alerta	7/28/1985	3.618769783	alerta	3.503522909	alerta	8/01/1985	3.616235785	alerta	3.493950433	alerta	8/05/1985	3.61178438	alerta	3.47628203	alerta	8/09/1985	3.604803818	alerta	3.465148741	alerta	8/13/1985	3.604700319	alerta	3.488805133	alerta	8/17/1985	3.603569925	alerta	3.480796721	alerta	8/21/1985	3.592628282	no	3.498404773	alerta	8/25/1985	3.573419925	no	3.4919238	alerta	8/29/1985	3.5731084	no	3.478760255	alerta	9/02/1985	3.605914669	alerta	3.484723535	alerta	9/06/1985	3.620447172	alerta	3.49418877	alerta	9/10/1985	3.636556	alerta	3.500790114	alerta	9/14/1985	3.643477168	alerta	3.524042585	alerta	9/18/1985	3.646818264	alerta	3.543723071	alerta	9/22/1985	3.675515516	alerta	3.555492245	alerta

Figura 87. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1986

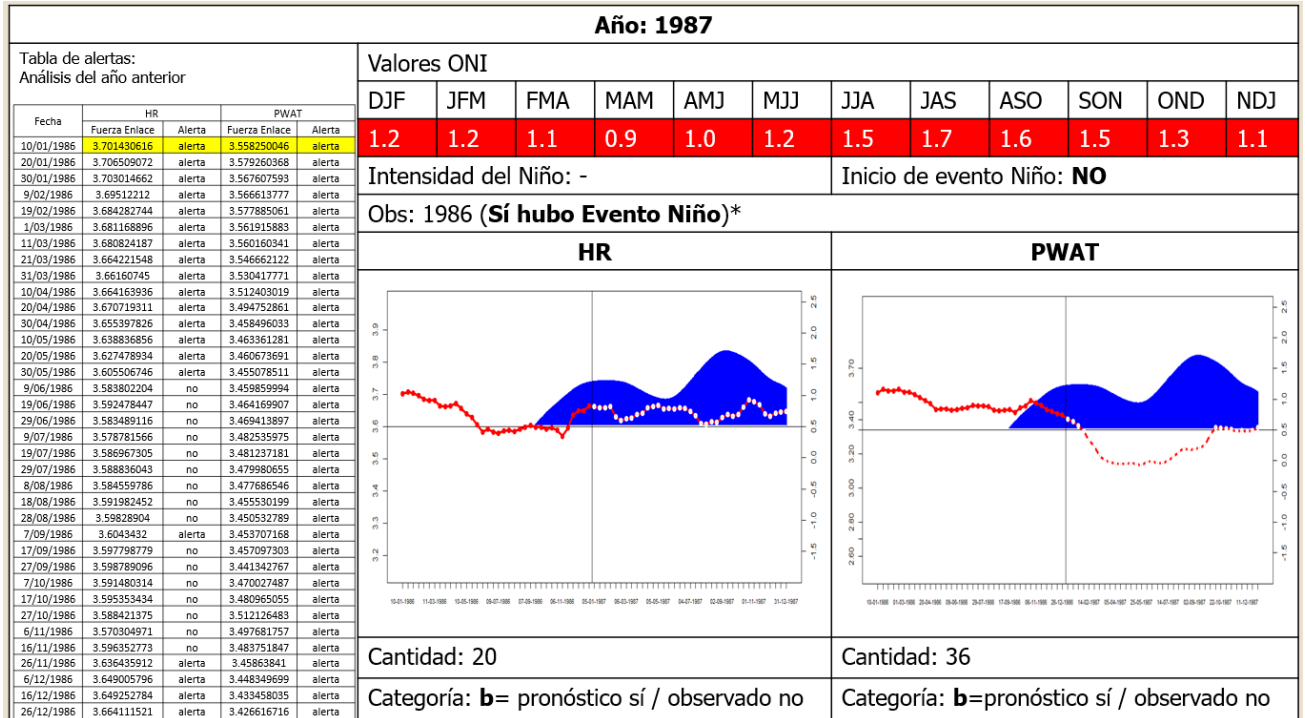


Figura 88. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1987

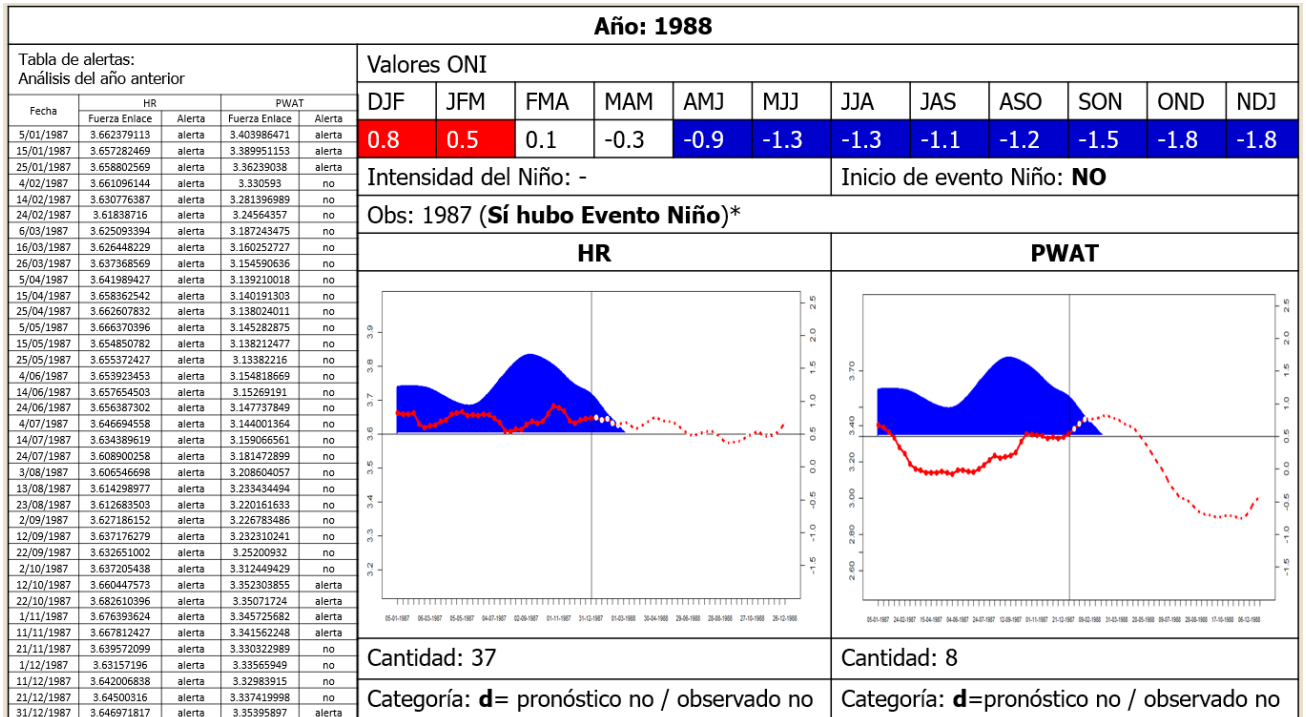


Figura 89. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1988

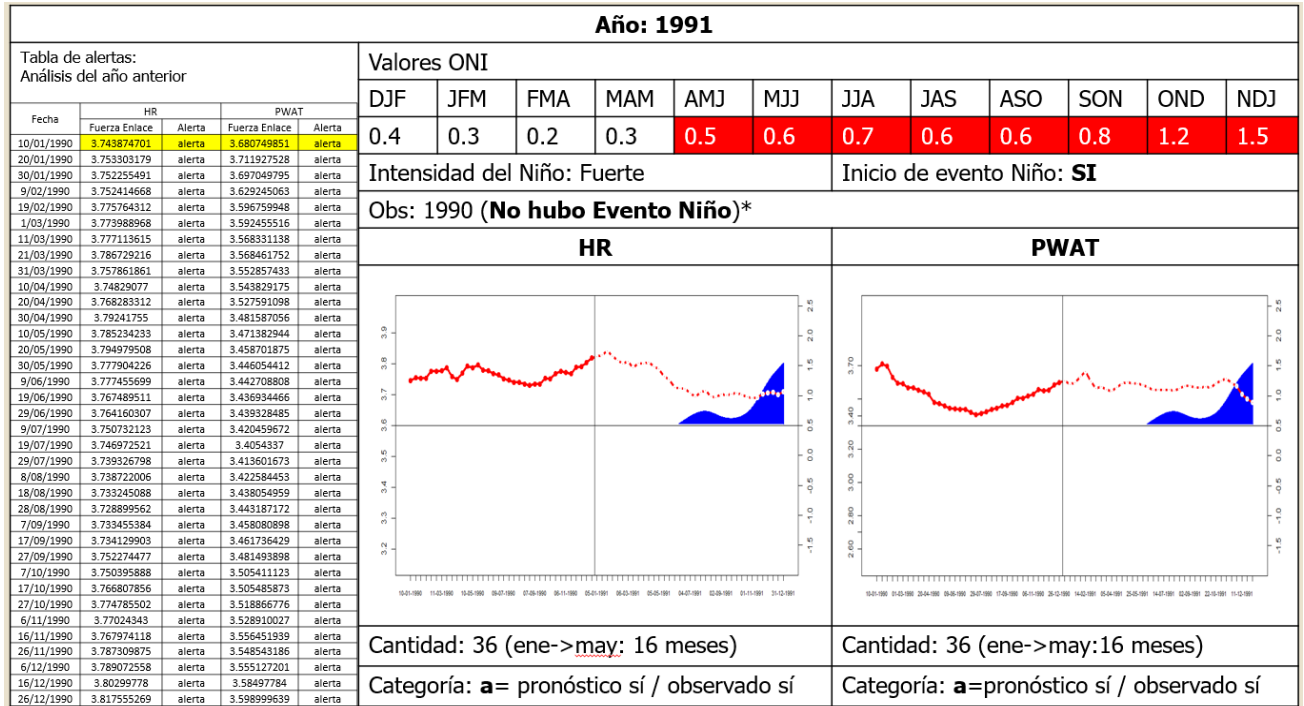


Figura 92. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1991

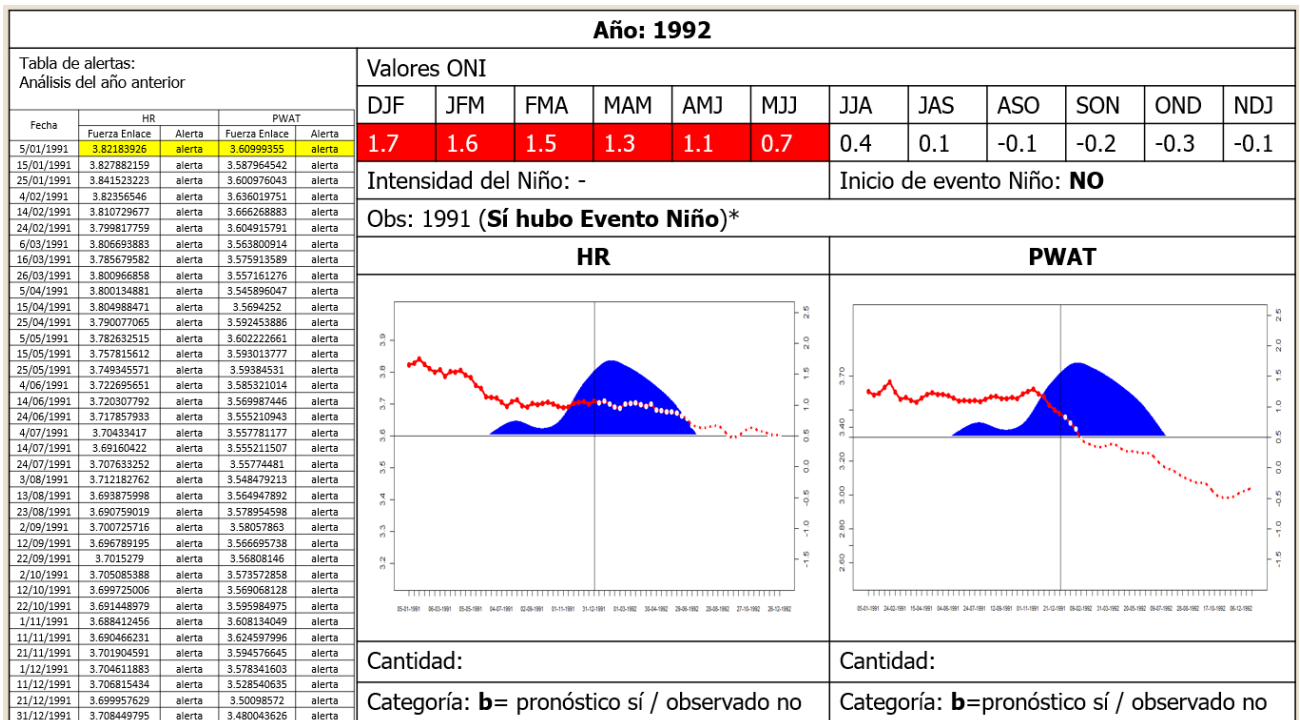


Figura 93. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1992

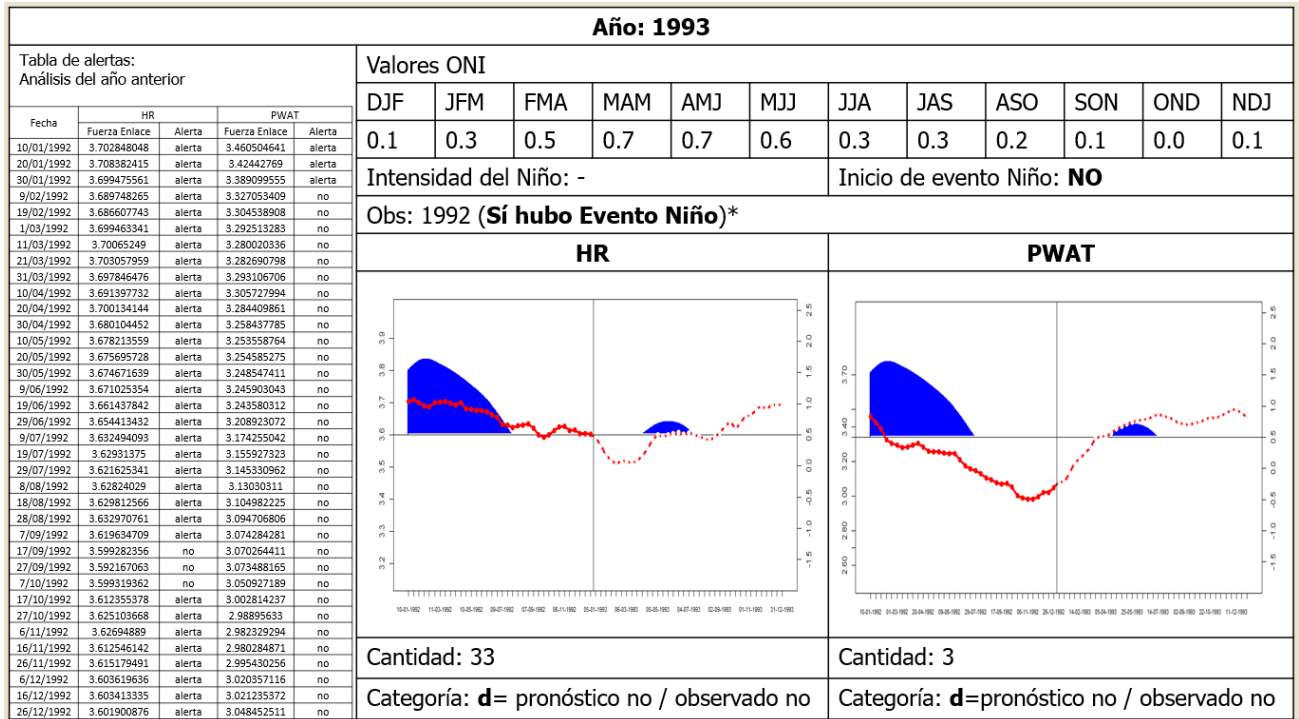


Figura 94. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1993

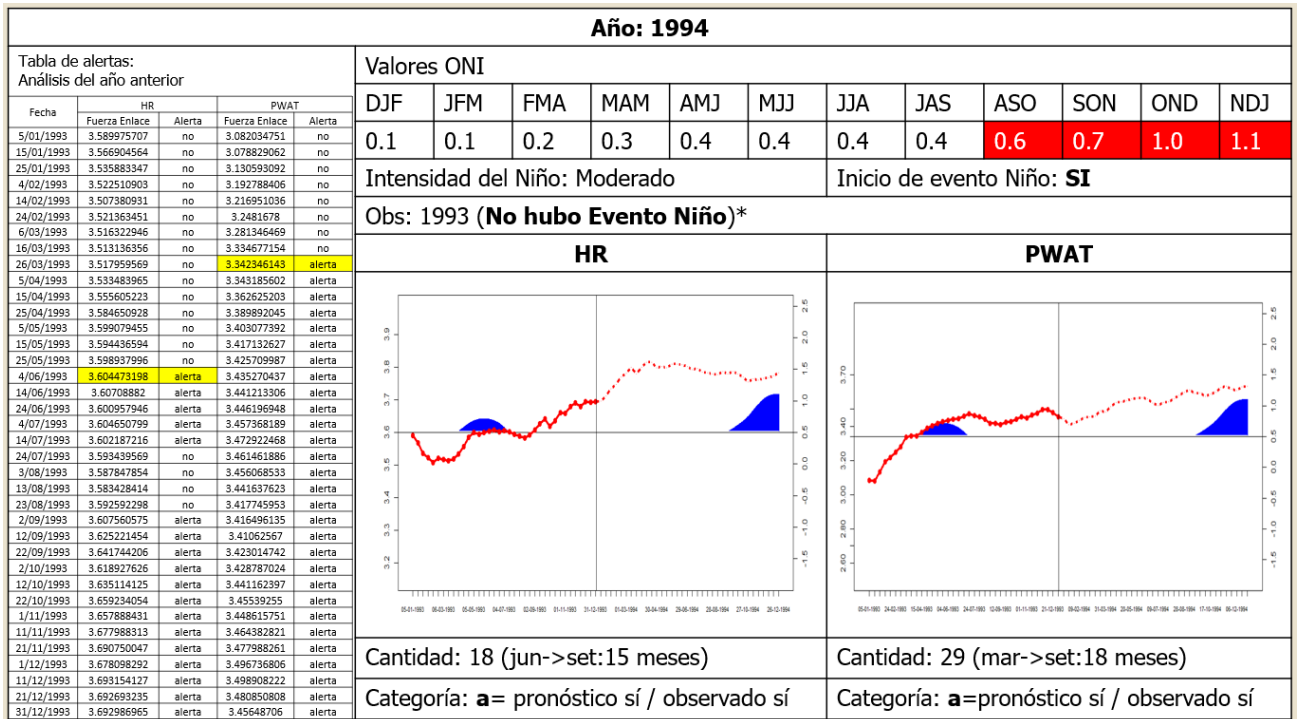


Figura 95. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1994

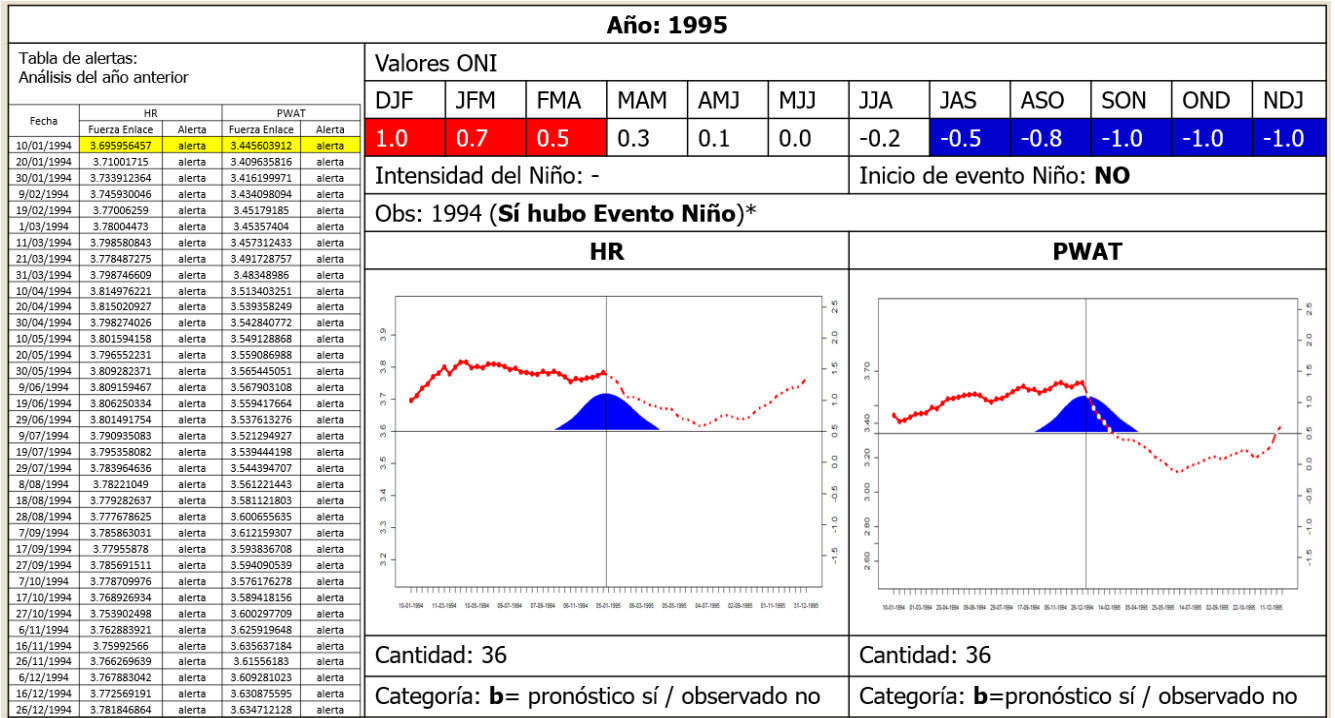


Figura 96. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1995

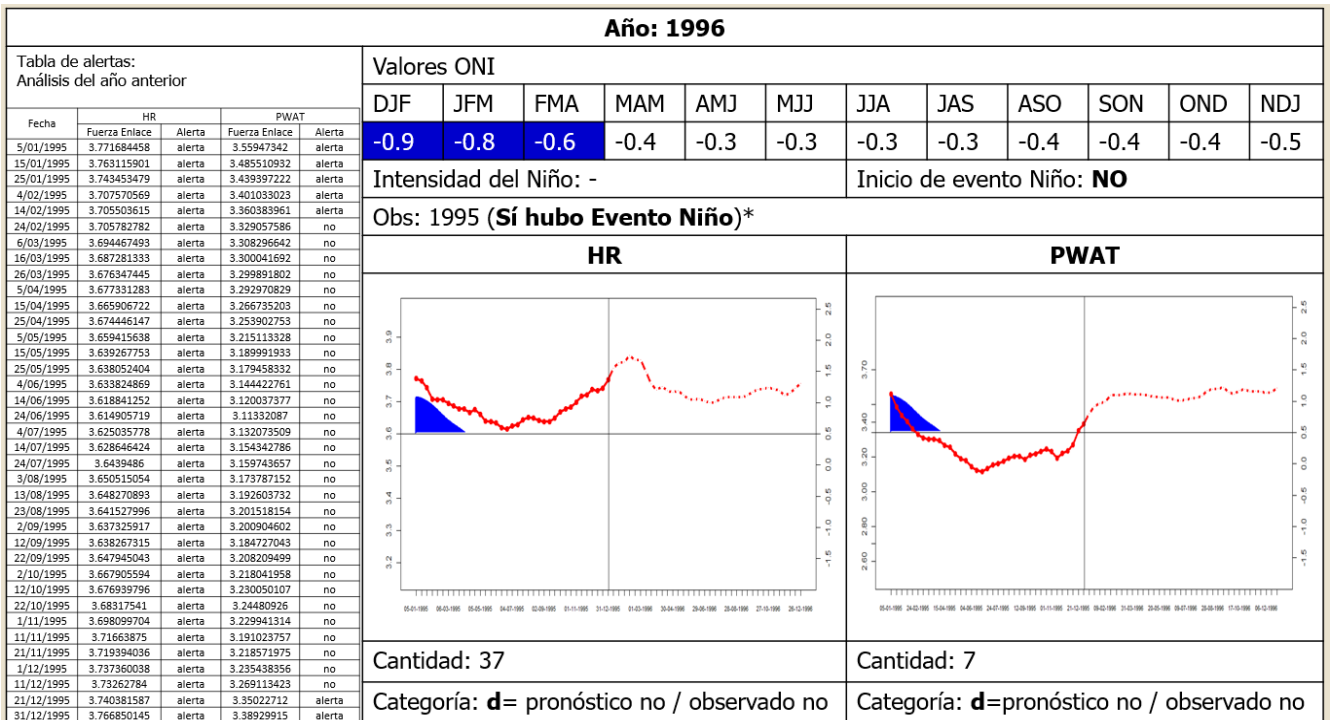


Figura 97. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1996

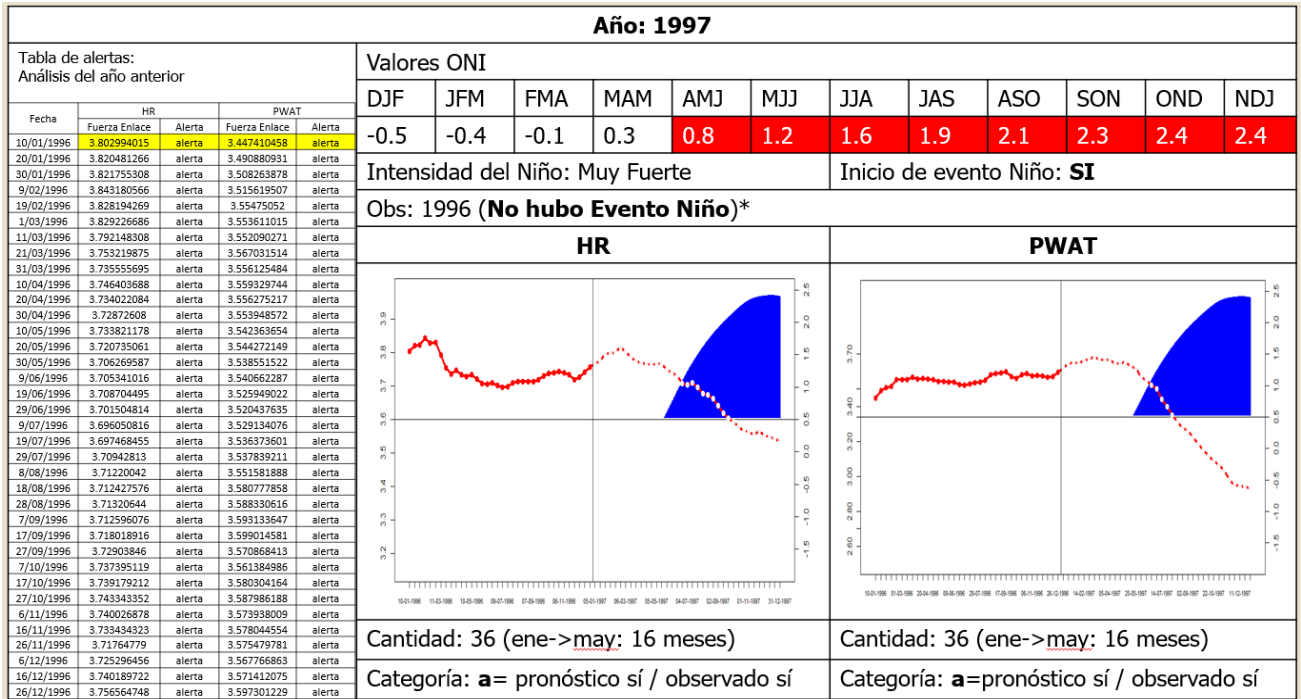


Figura 98. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1997

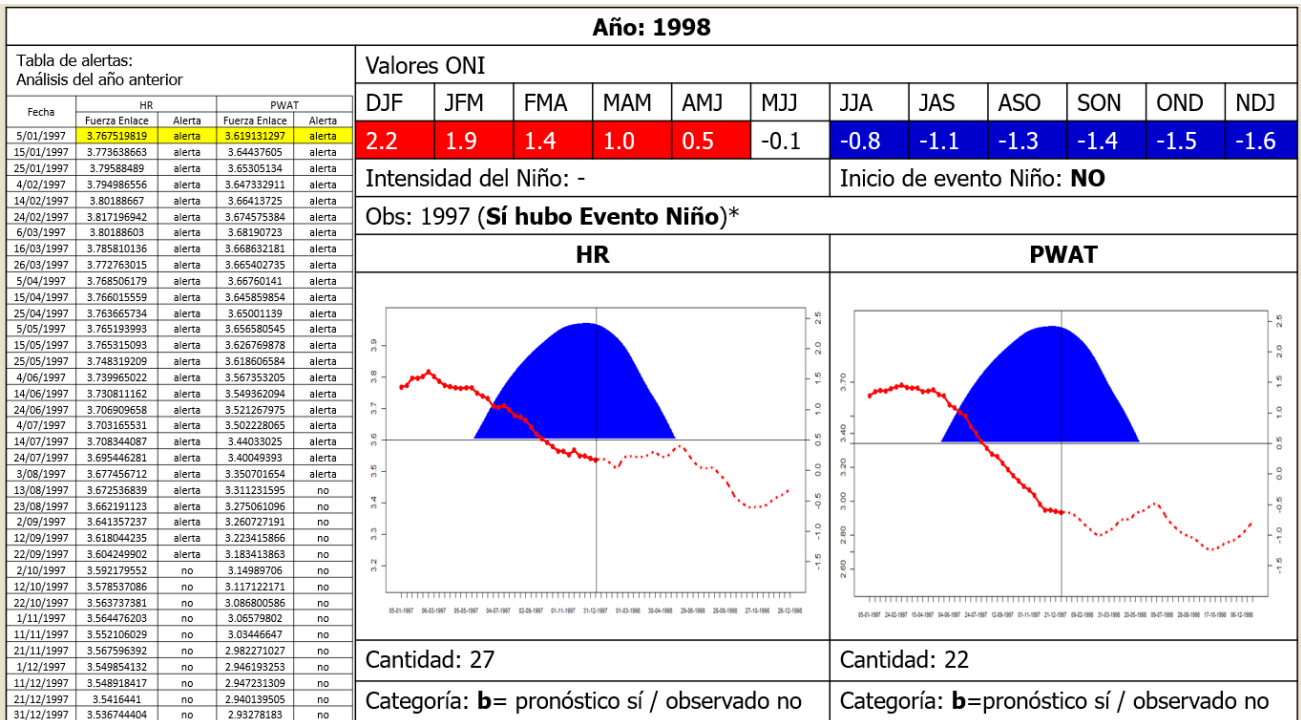


Figura 99. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1998

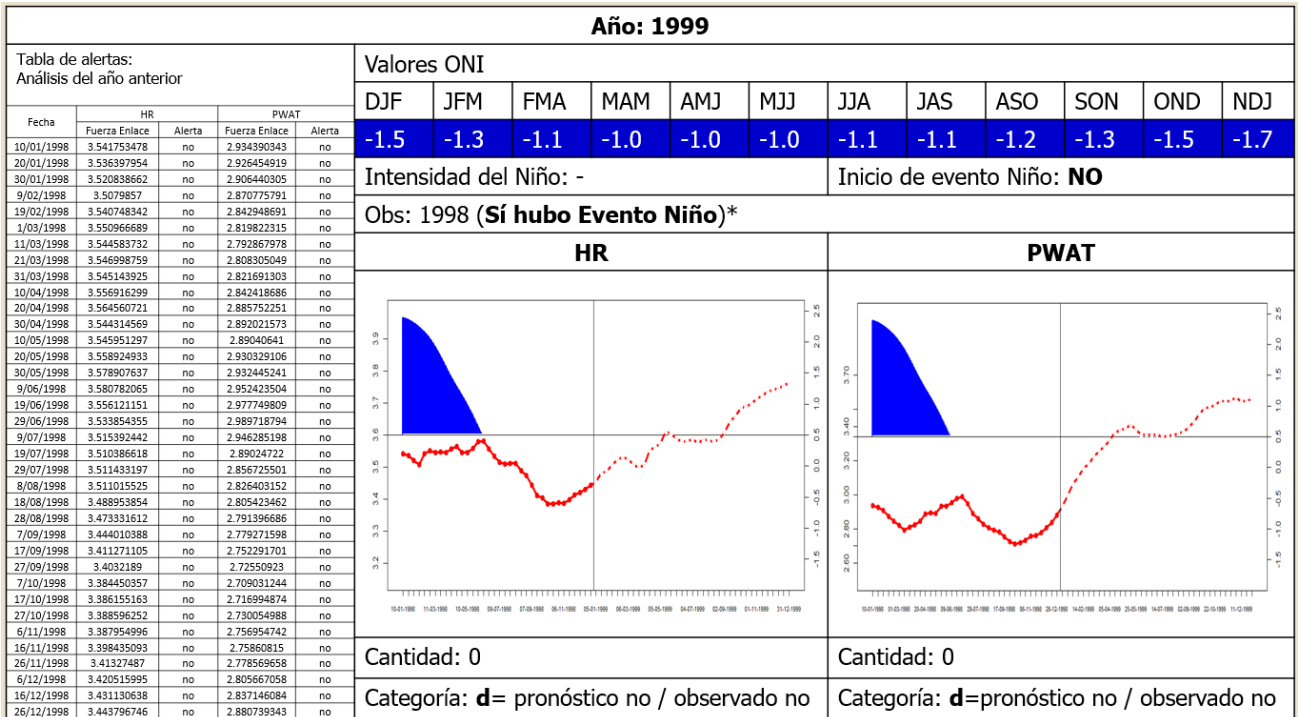


Figura 100. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 1999

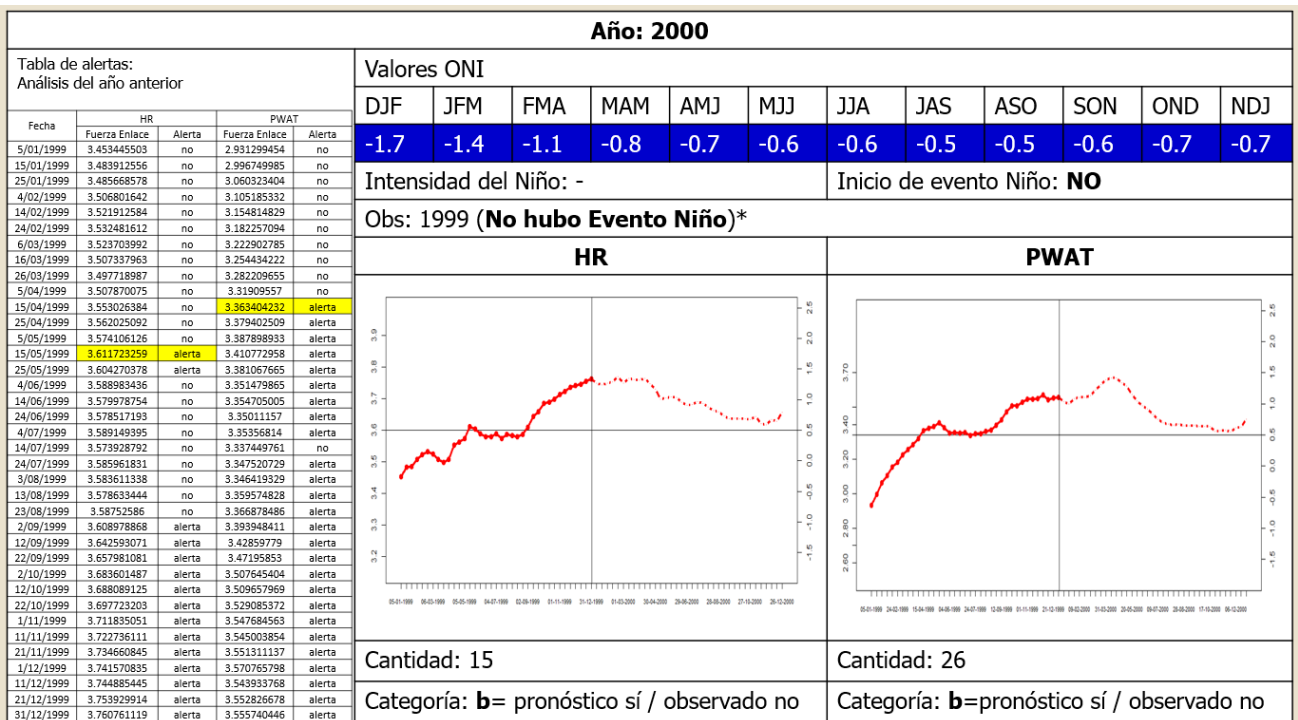


Figura 101. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2000

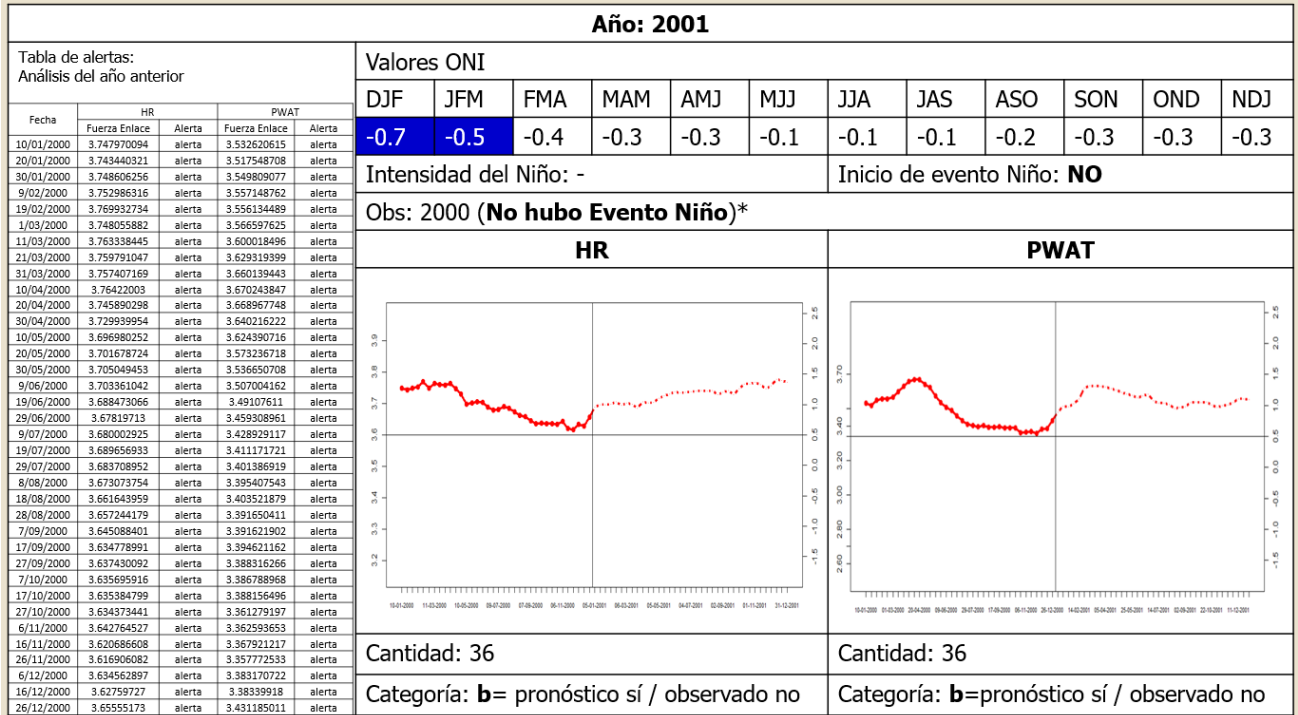


Figura 102. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2001

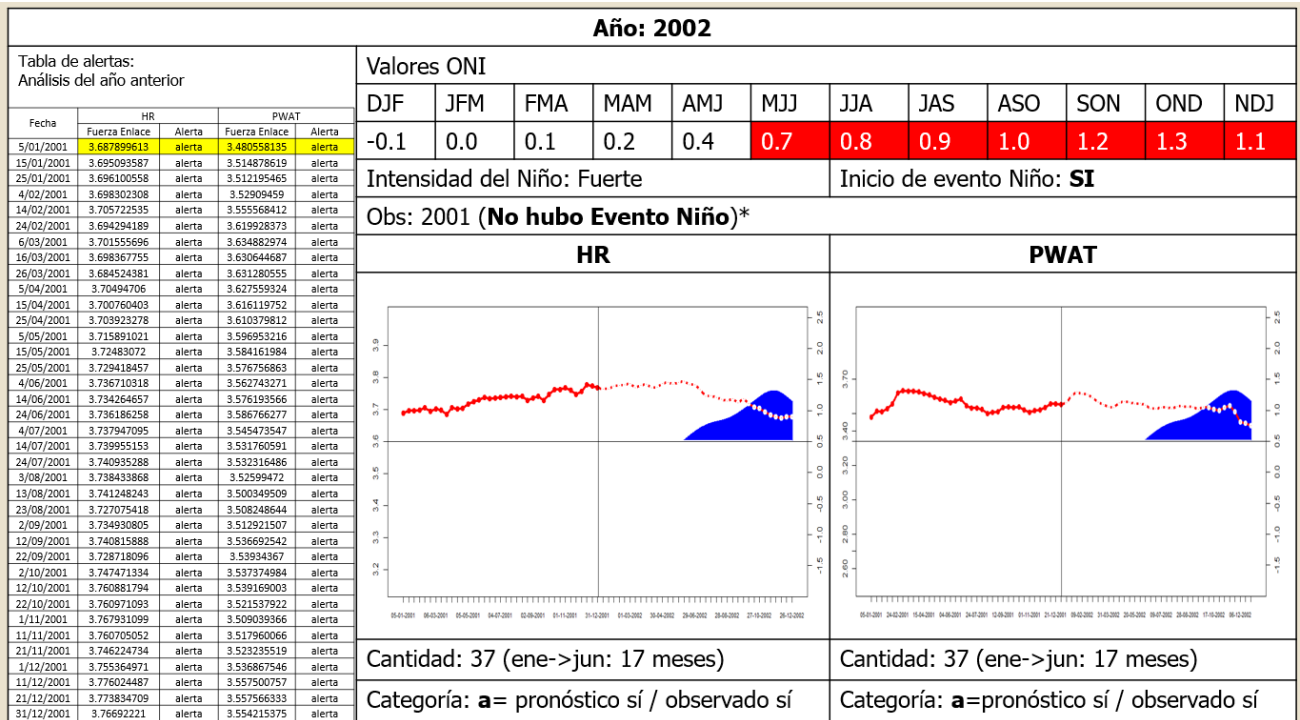


Figura 103. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 200

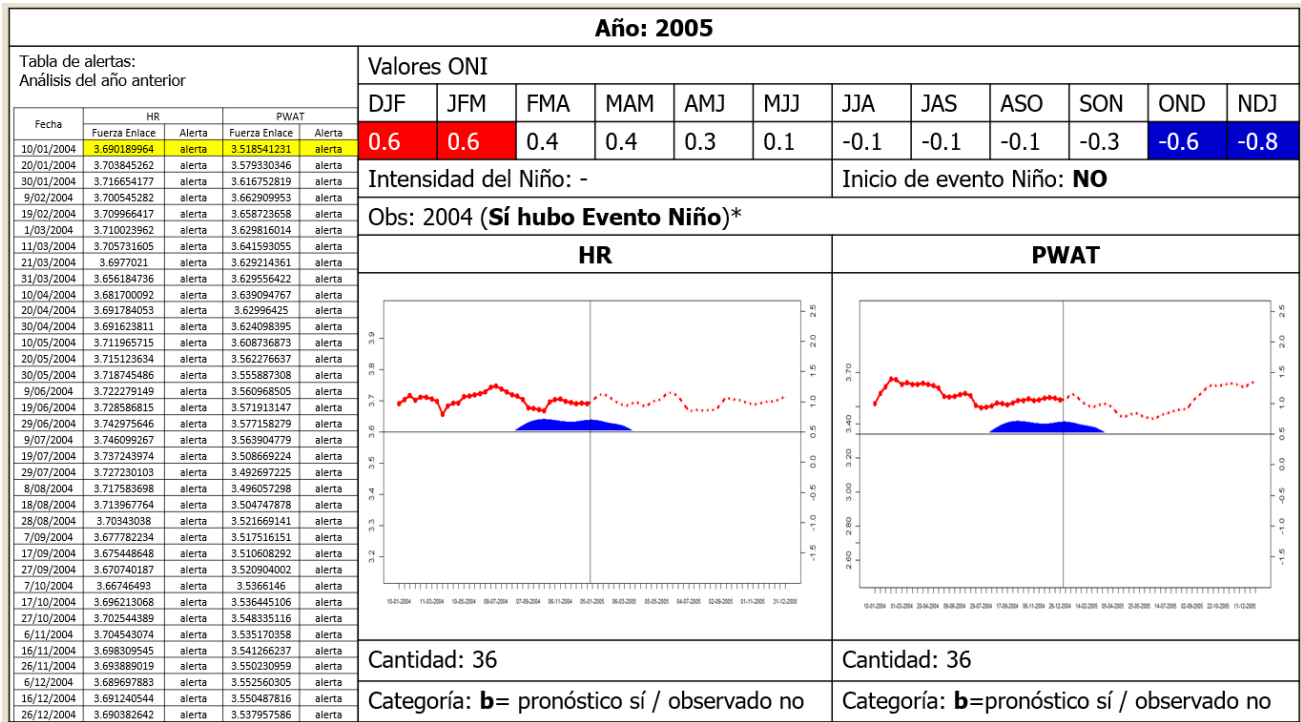


Figura 106. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2005

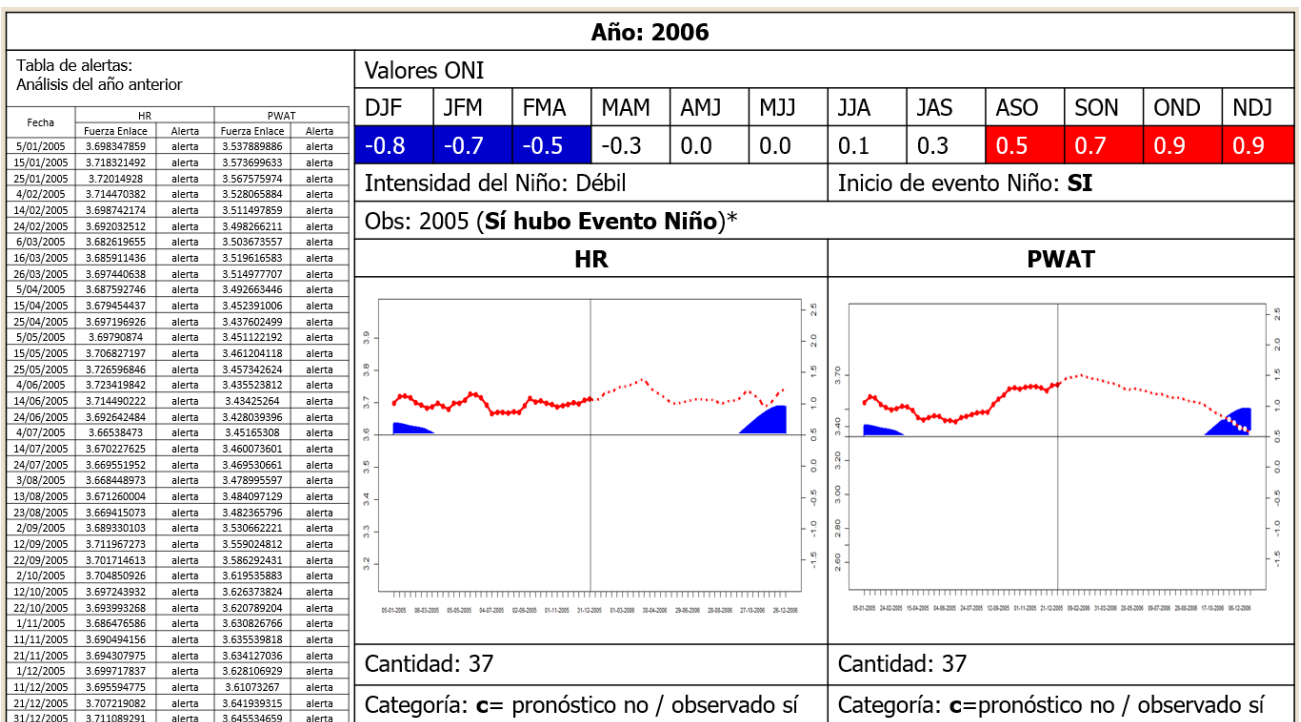


Figura 107. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2006

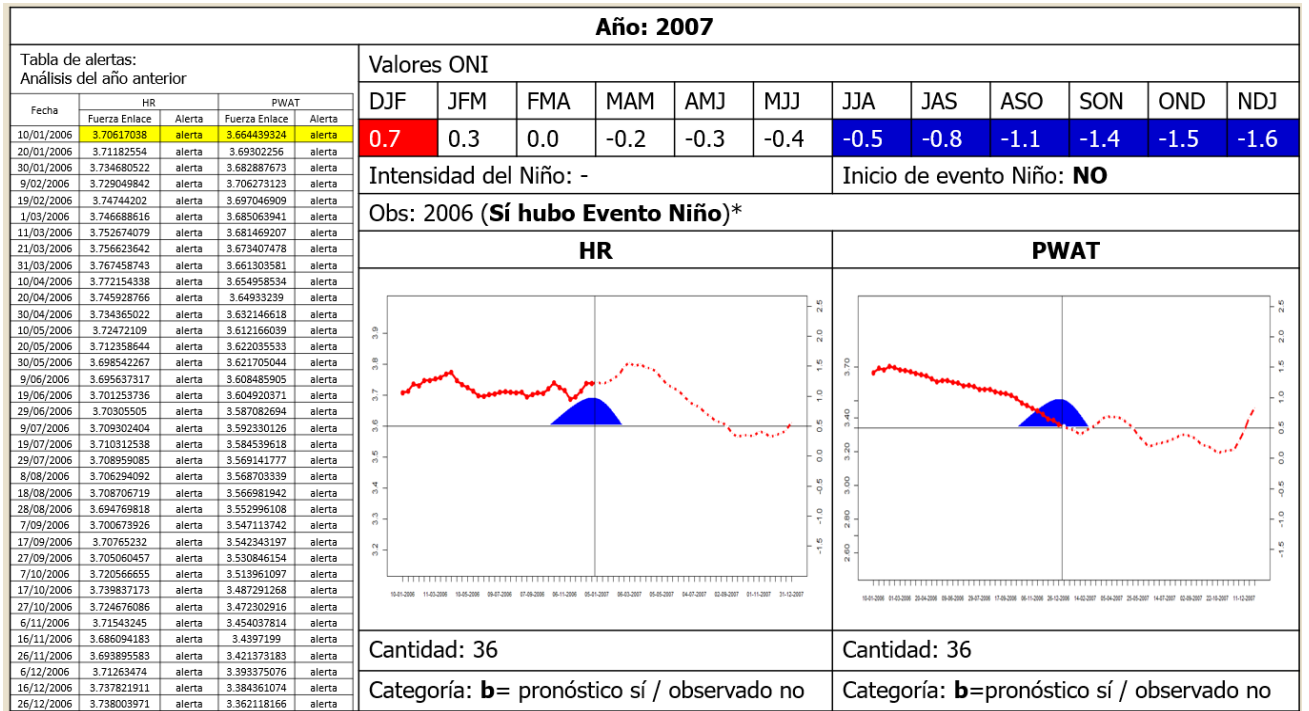


Figura 108. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2007

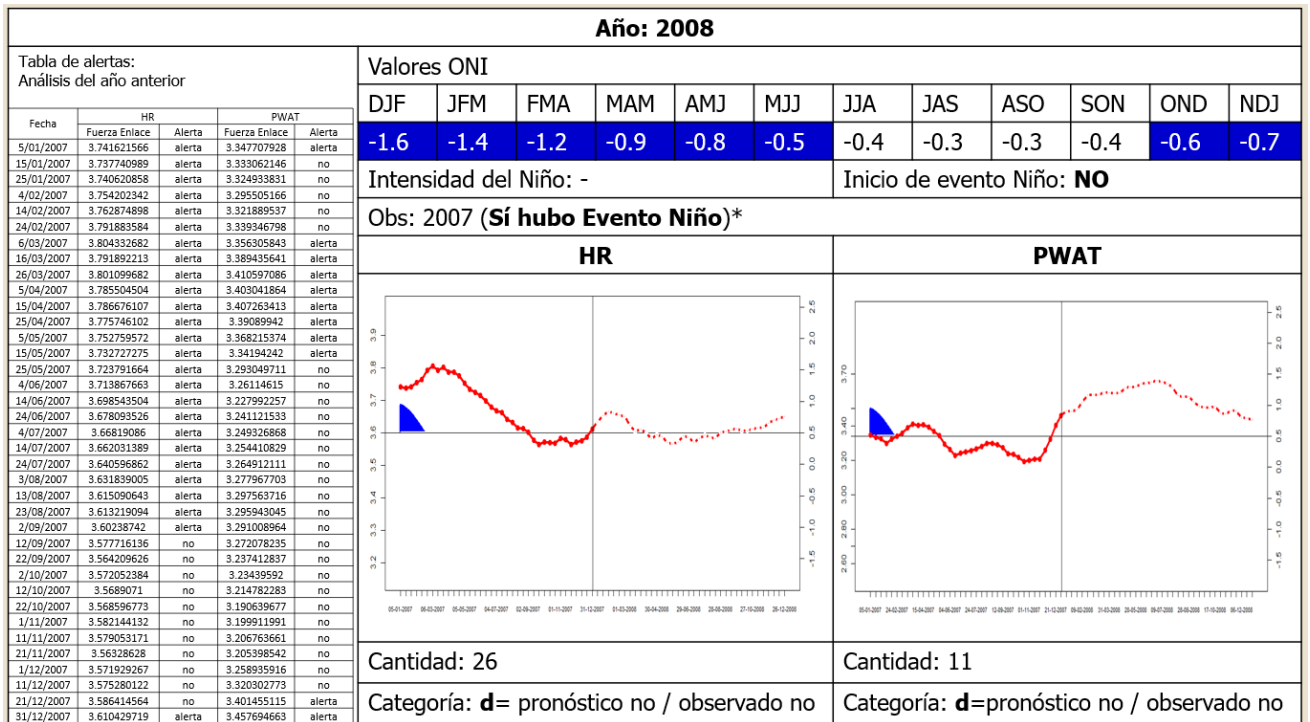


Figura 109. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2008

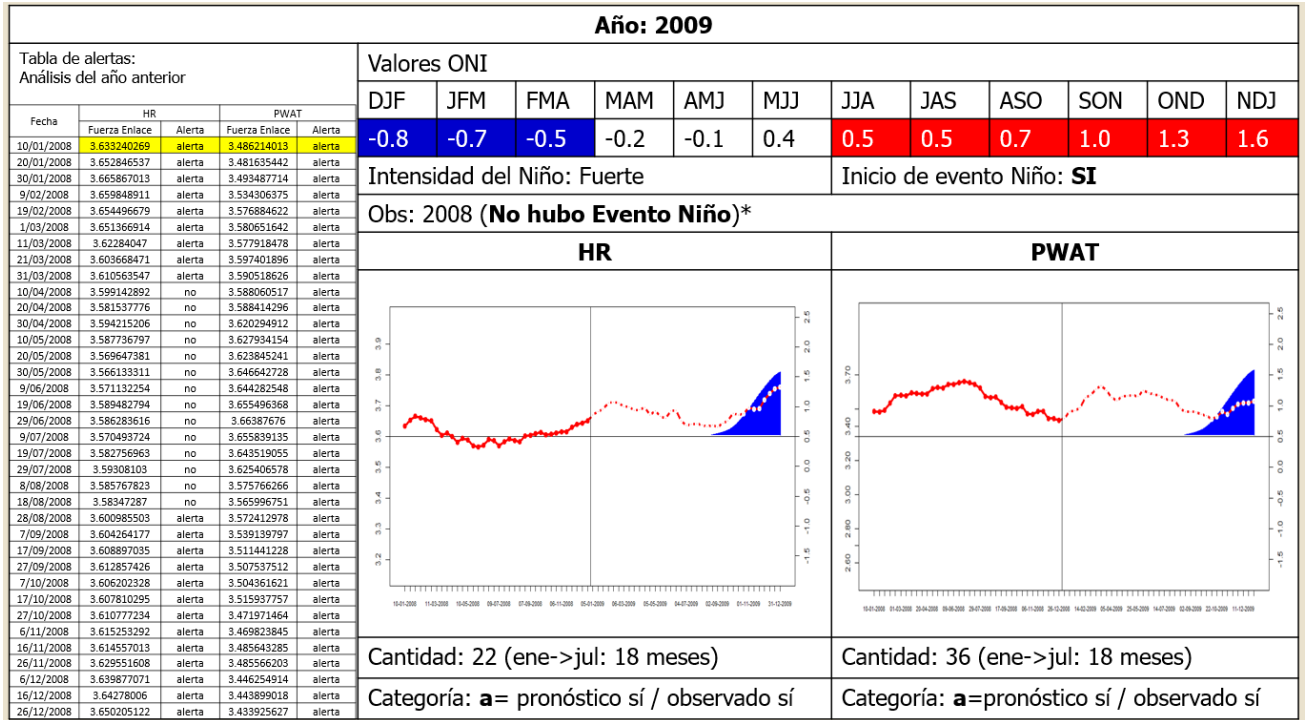


Figura 110. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2009

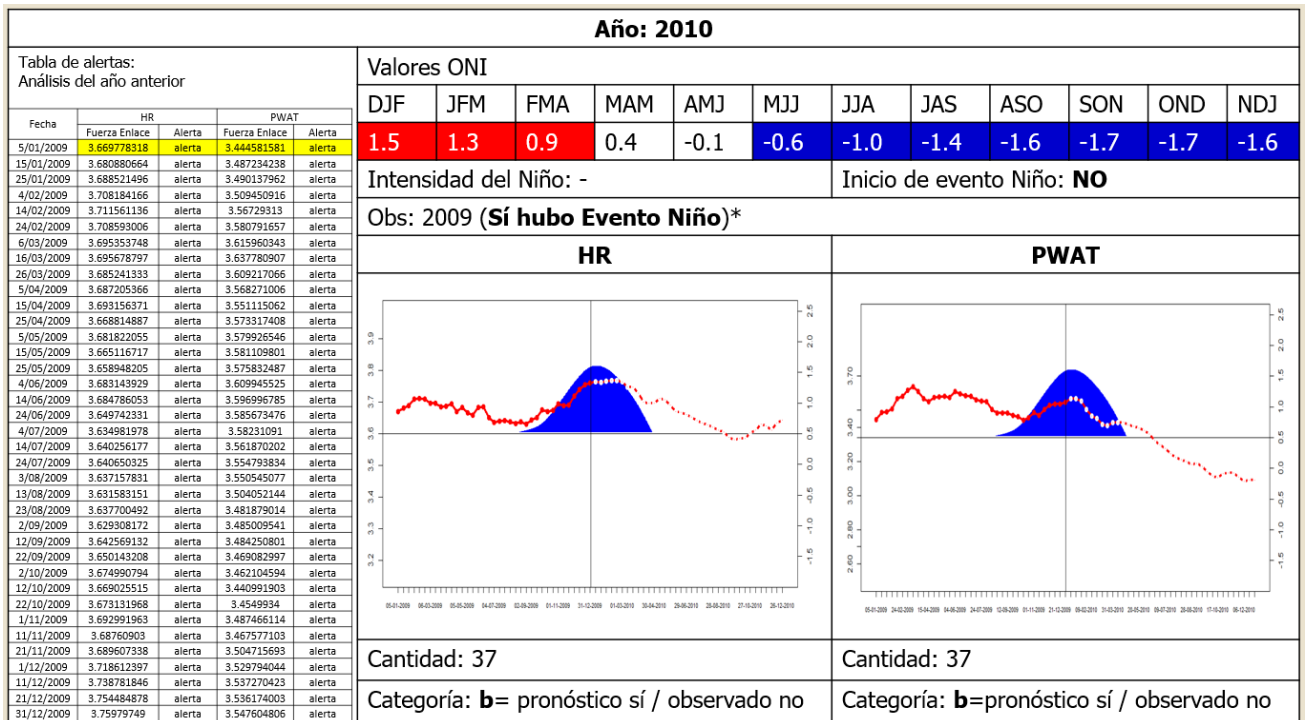


Figura 111. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2010

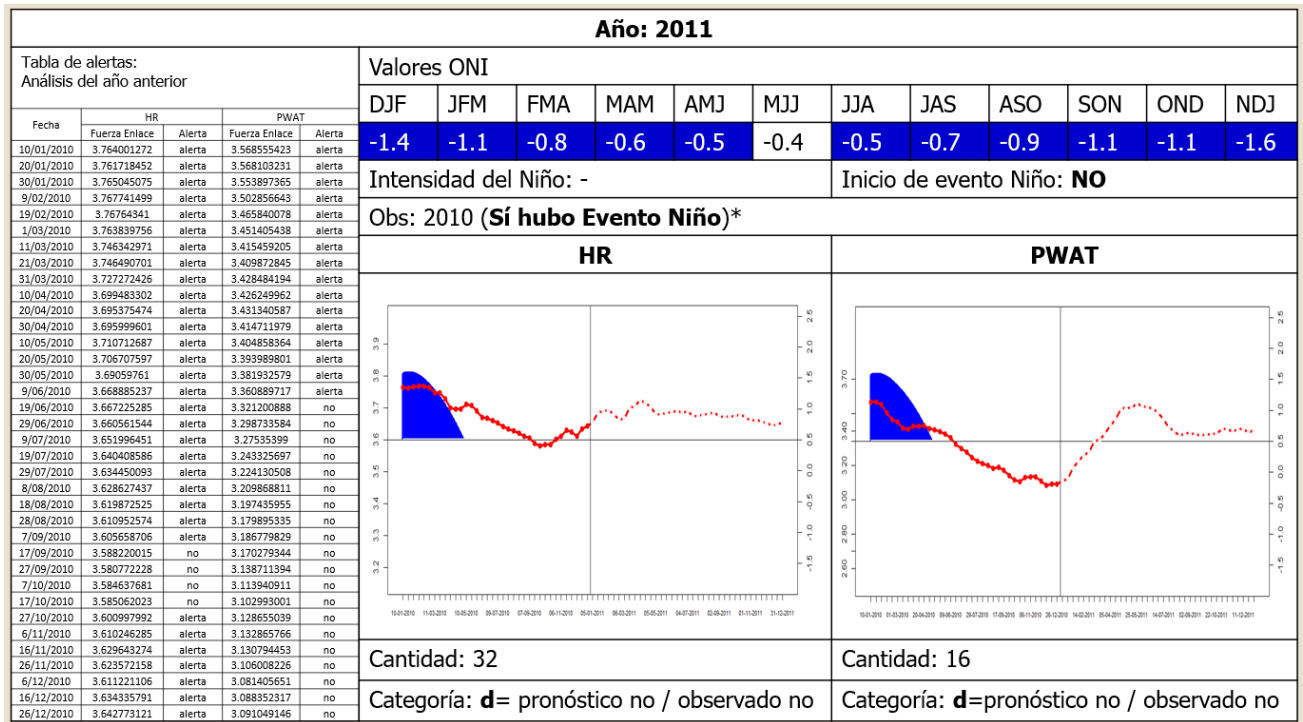


Figura 112. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2011

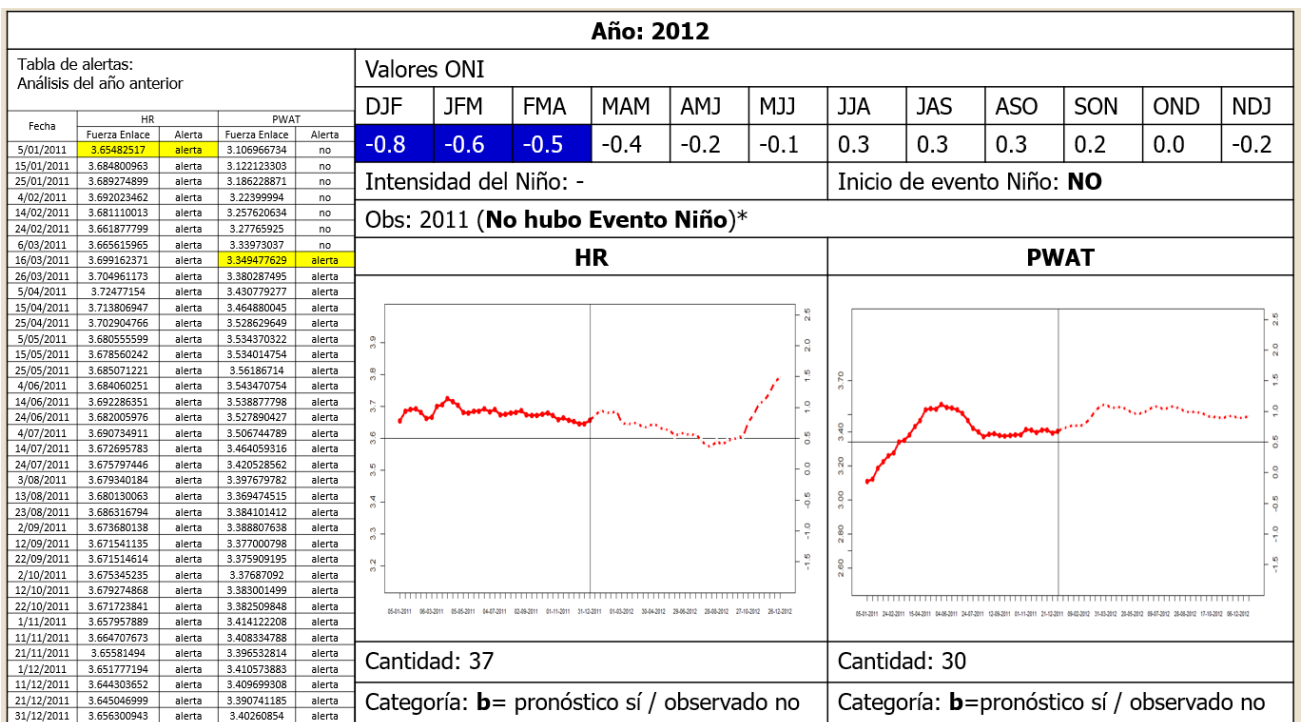


Figura 113. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2012

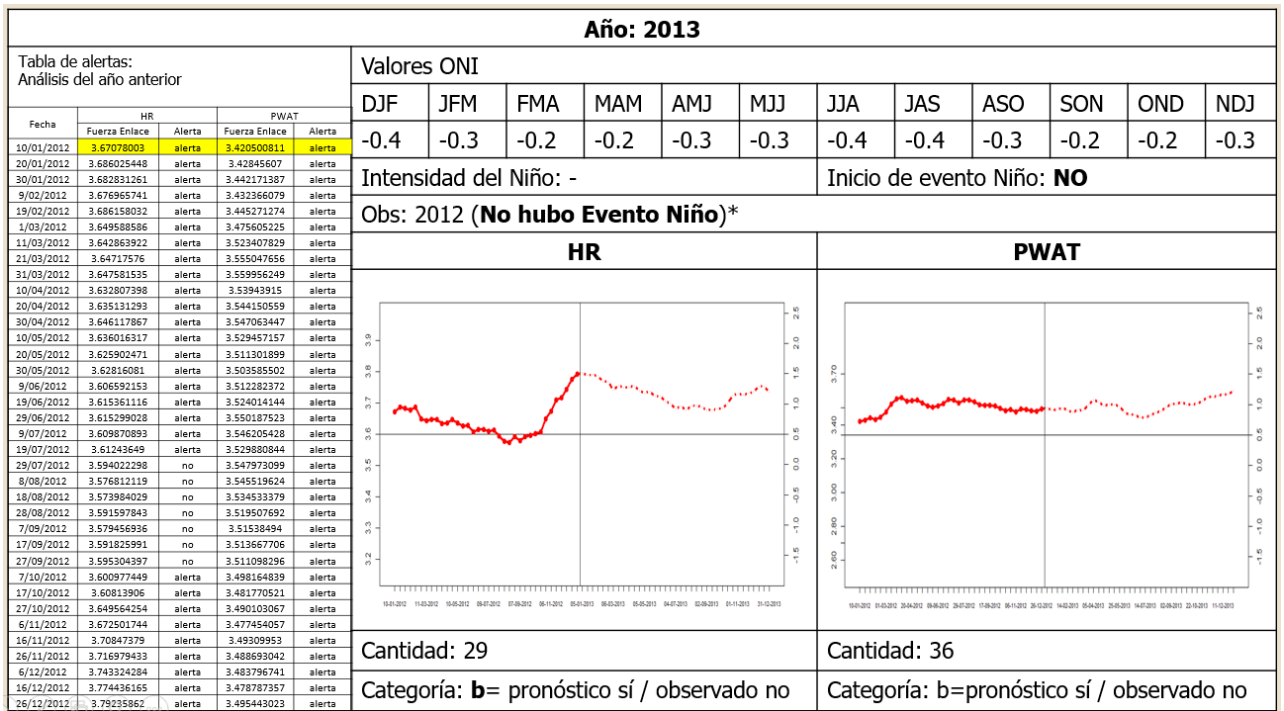


Figura 114. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2013

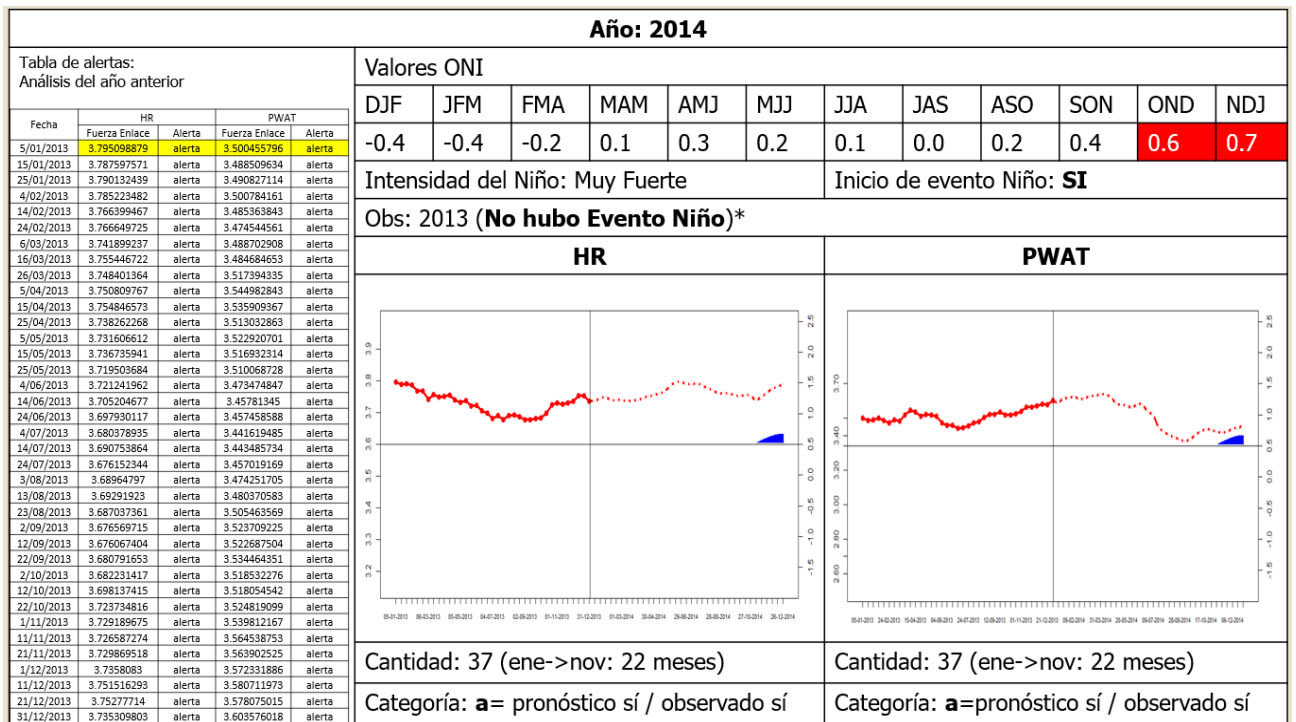


Figura 115. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2014

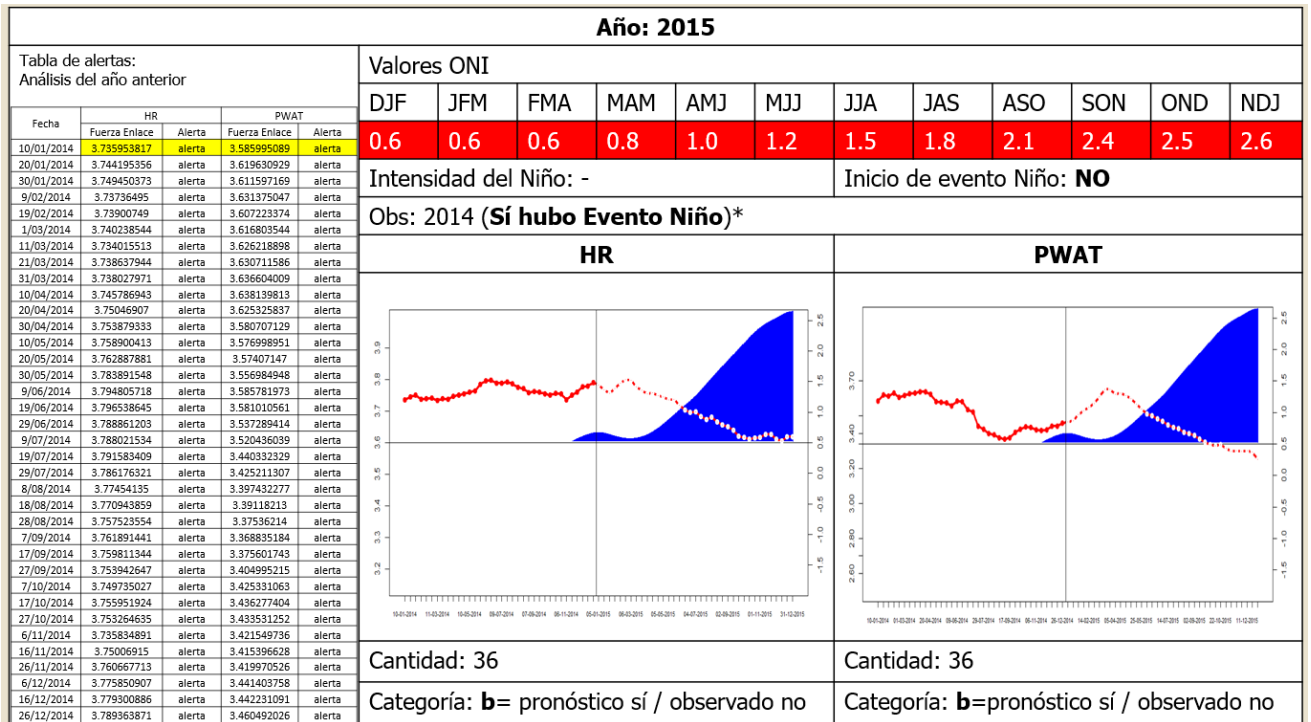


Figura 116. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2015

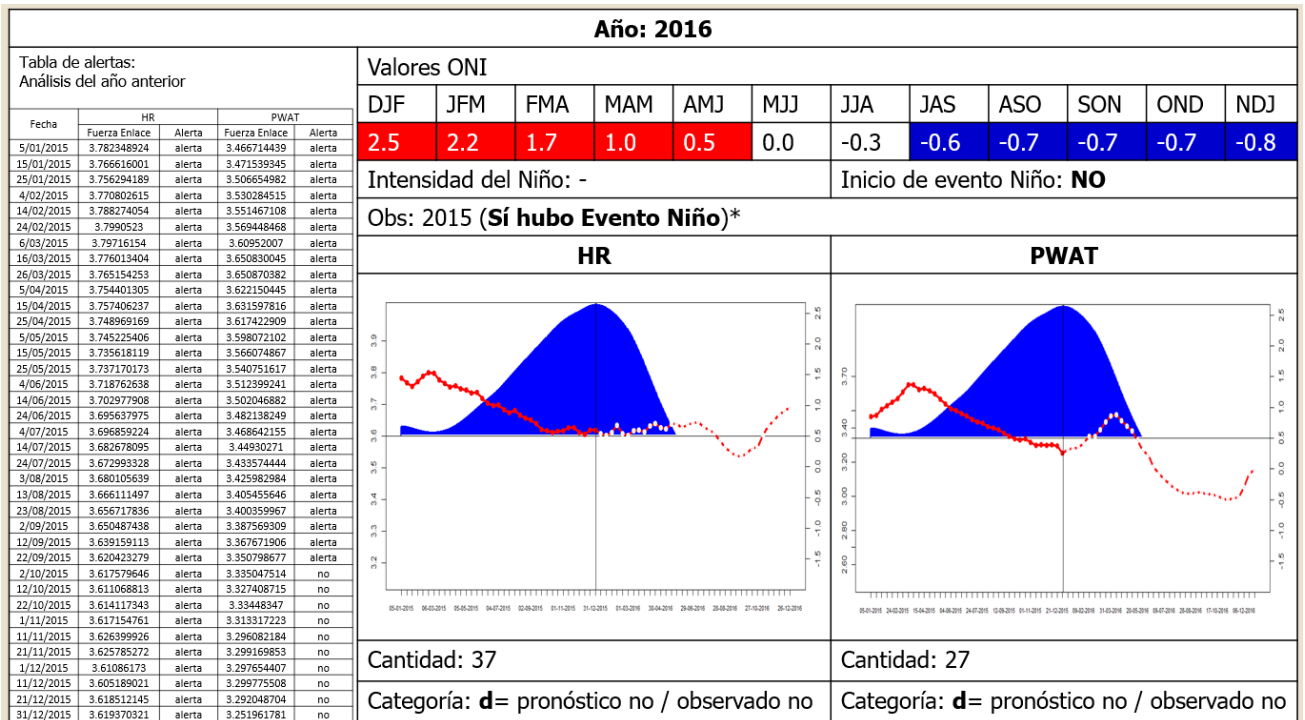


Figura 117. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2016

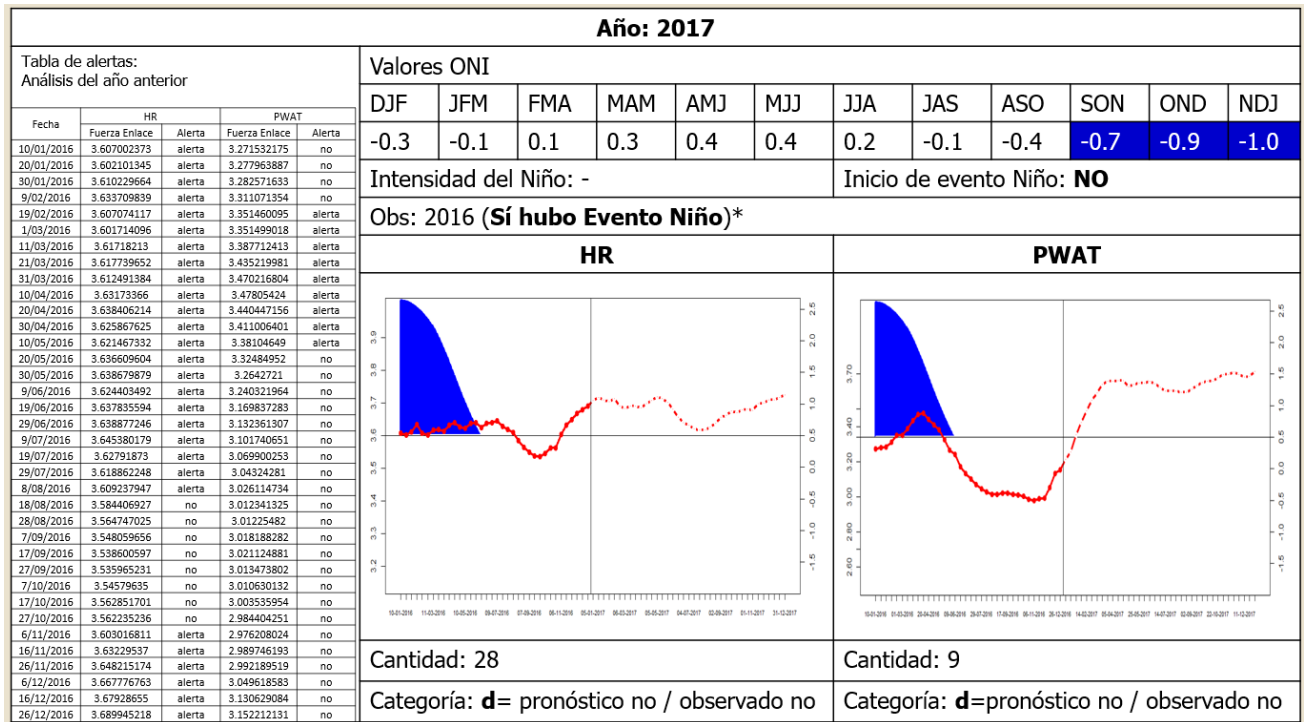


Figura 118. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2017

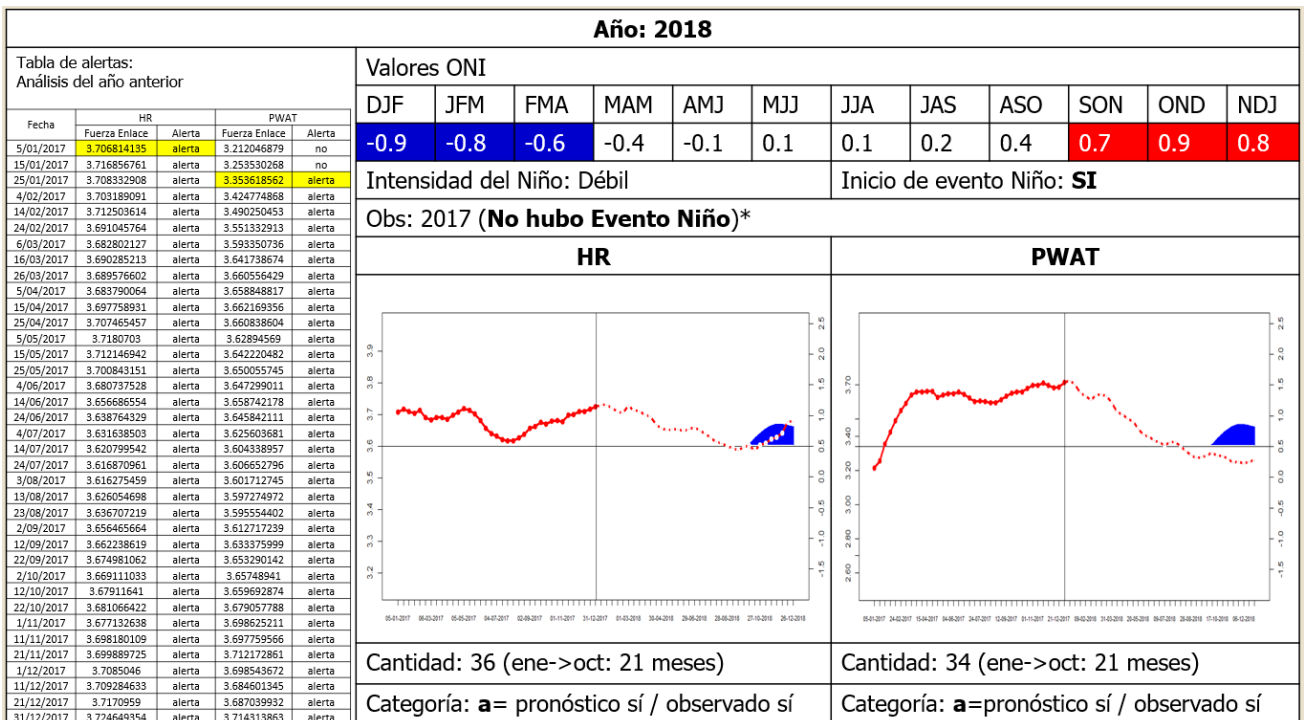


Figura 119. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2018

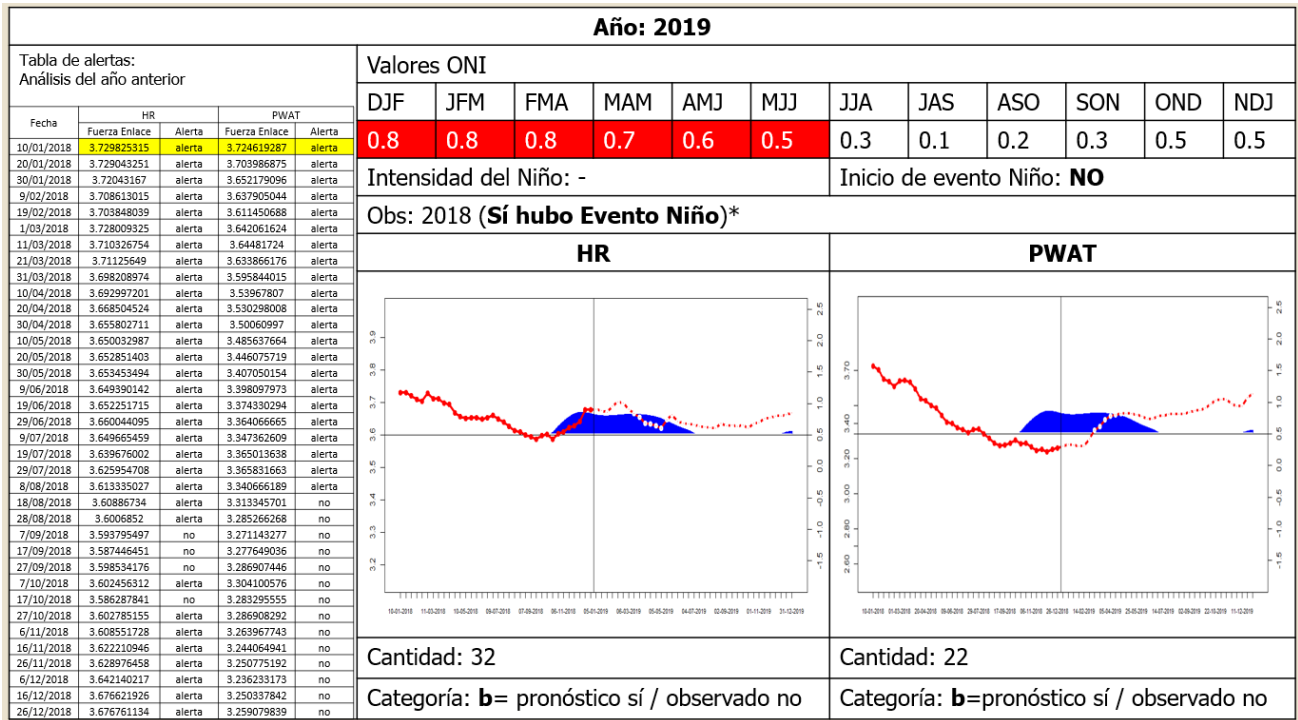


Figura 120. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2019

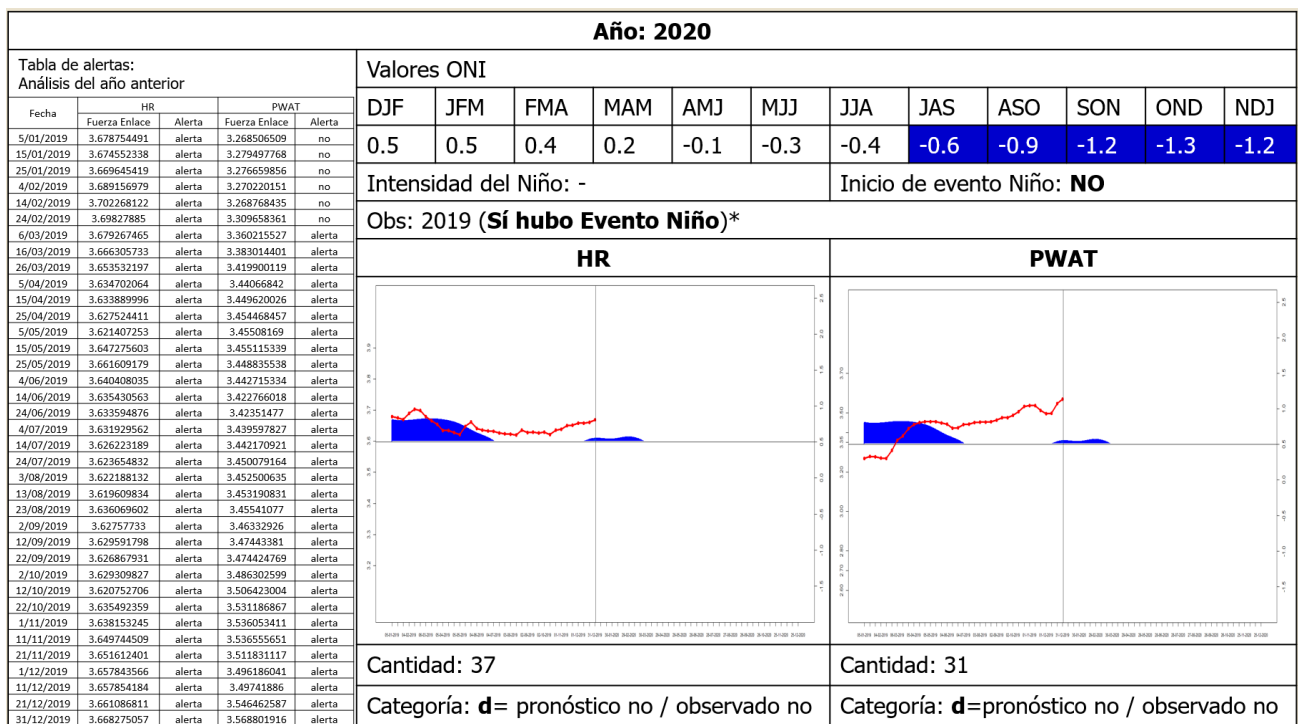


Figura 121. Validación del pronóstico del evento ENSO "El Niño" para el año 2020

4.3. RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DEL PRONÓSTICO A LARGO PLAZO DE LA FUERZA ENLACE DESEADA

Luego de la presentación de los resultados de las fuerzas enlaces deseadas en ambas variables meteorológicas de estudio se validó estadísticamente mediante tablas de contingencia de doble entradas (2x2) para la determinación de los parámetros de confiabilidad de los pronósticos del ENSO a largo plazo que son principalmente la tasa de aciertos y la tasa de falsas alarmas.

En la Figura 122 se muestra las tablas de contingencia del pronóstico ENSO tanto para humedad relativa y agua precipitable.

En la parte superior corresponde a la fase de prueba en la que se determinó el umbral de pronóstico, para la humedad relativa se obtuvo una tasa de acierto de 0.636 y para la tasa de falsa alarma fue de 0.353, se pronosticaron 7 eventos “El Niño” de 11 de manera correcta y hubieron 6 pronósticos falsos de 17 que no ocurrieron, por otro lado en agua precipitable se obtuvo el mismo valor de tasa de aciertos con respecto a la otra variable, sin embargo se tuvieron 5 pronósticos falsos de 17, uno menos a diferencian de la variable de humedad relativa, de esta manera la tasa de falsa alarma fue de 0.294.

En la parte media de la Figura 122 corresponde a las tablas de contingencia de la fase de validación del pronóstico, en humedad relativa se obtuvo un valor de 0.818 de tasa de aciertos mientras que la tasa de falsas alarmas fue de 0.552, se pronosticaron 9 eventos “El Niño” acertadamente, en cambio los pronósticos falsos tuvieron un incremento de casi más de la mitad (16 de 29 eventos que no ocurrieron), por ello la tasa de falsas alarma se vio reflejado en un incremento considerable. En agua precipitable ocurrió lo mismo con respecto a la tasa de aciertos (9 de 11 eventos pronosticados correctamente), sin embargo, la tasa de falsas alarmas incrementó ligeramente a comparación de la variable de humedad relativa con un valor de 0.586 debido a que hubo 17 pronósticos erróneos de 29 que no debieron haberse pronosticado.

En la parte inferior de la Figura 122 engloba la validación estadística mediante tablas de contingencia de todo el periodo de estudio, tanto en humedad relativa y agua precipitable se obtuvieron una tasa de aciertos de 0.727 (16 de 22 eventos “El Niño” pronosticados acertadamente) mientras que la tasa de falsa alarmas fue de 0.478 (22 de 46 eventos que no

ocurrieron), lo cual refleja un alza de casi la mitad de pronósticos falsos para ambas variables meteorológicas de estudio.

Humedad Relativa				Agua Precipitable								
F. Prueba (1953-1980)	Pronosticado	Observado		RESULTADOS		Observado						
		SI	NO				HIT RATE	0.636	SI	NO	HIT RATE	0.636
	SI	7	6			SI	7	5			FALSA ALARMA	0.294
	NO	4	11			NO	4	12			FALSA ALARMA	0.294
F. Pronóstico (1981-2020)	Pronosticado	Observado		RESULTADOS		Observado						
		SI	NO				HIT RATE	0.818	SI	NO	HIT RATE	0.818
	SI	9	16			SI	9	17			FALSA ALARMA	0.586
	NO	2	13			NO	2	12			FALSA ALARMA	0.586
Total (1953-2020)	Pronosticado	Observado		RESULTADOS		Observado						
		SI	NO				HIT RATE	0.727	SI	NO	HIT RATE	0.727
	SI	16	22			SI	16	22			FALSA ALARMA	0.478
	NO	6	24			NO	6	24			FALSA ALARMA	0.478

Figura 122. Cuadro comparativo de tablas de contingencia en humedad relativa y agua precipitable del pronóstico ENSO "El Niño"

En cuanto a los pronósticos correctos, durante el periodo de estudio correspondiente al pronóstico ENSO (1953-2020) han ocurrido 22 eventos “El Niño”, de las cuales en la Tabla 8 se muestra la validación de los pronósticos ENSO de la categoría “a” (pronóstico sí/ observado sí) tanto en humedad relativa como agua precipitable. Se aprecia que los eventos “El Niño” de intensidad débil han sido pronosticados correctamente con 20 meses de antelación aproximadamente en ambas variables, siendo el evento “El Niño” 1958-59 que se ha pronosticado con mayor tiempo de anticipación con 22 meses en agua precipitable, en cuanto a la intensidad moderado se ha pronosticado de manera correcta entre 15 a 21 meses de anticipación en humedad relativa y agua precipitable, sin embargo en el evento “El Niño” 1963-64 solo en humedad relativa se pronosticó correctamente con 6 meses de anticipación, siendo esta de corto plazo. Con respecto a los eventos “El Niño” de intensidad fuerte fueron pronosticados correctamente entre 14 a 18 meses de anticipación a excepción del evento “El Niño” 1972-73 que fue pronosticada con 5 meses y 9 meses en humedad relativa y agua precipitable respectivamente. En cuanto a la intensidad muy fuerte fueron pronosticados correctamente entre 15 a 22 meses de antelación en ambas variables, siendo el evento “El Niño” 2014-16 de 22 meses de antelación.

En la Tabla 9 se muestra los años inicio que no ocurrieron eventos “El Niño” y no fueron pronosticados en el periodo de estudio (categoría “d” de la validación estadística del pronóstico ENSO “El Niño”), en el año 1954 solo en humedad relativa fue de manera certera y en el año 1961 solo en agua precipitable, en los demás años ambas variables coincidieron en el pronóstico certero en la categoría “d”. De 46 años que no se observó un inicio de un evento “El Niño” durante el periodo de estudio, 24 años fueron pronosticados correctamente en ambas variables meteorológicas de estudio, siendo más de la mitad del conjunto de muestra de años observados que no se dio inicio a un evento “El Niño”.

Tabla 8: Validación de los pronósticos ENSO “El Niño” de categoría "a" del periodo de estudio en humedad relativa y agua precipitable

AÑO INICIO	INTENSIDAD	DURACION DEL EVENTO (meses)	PRONOST. PLAZO (meses)			
			L: largo plazo		C: corto plazo	
			HR	PWAT		
1957	Fuerte	16	NO	14	L	
1958	Débil	5	21	L	22	L
1963	Moderado	9	6	C	NO	
1968	Moderado	8	21	L	19	L
1969	Débil	6	19	L	19	L
1972	Fuerte	11	5	C	9	C
1976	Débil	6	20	L	20	L
1977	Débil	5	20	L	20	L
1982	Muy Fuerte	15	15	L	15	L
1986	Moderado	18	19	L	20	L
1991	Fuerte	14	16	L	16	L
1994	Moderado	7	15	L	18	L
1997	Muy Fuerte	13	16	L	16	L
2002	Fuerte	9	17	L	17	L
2009	Fuerte	9	18	L	18	L
2014	Muy Fuerte	19	22	L	22	L
2018	Débil	9	21	L	21	L

Tabla 9: Validación de los pronósticos ENSO “El Niño” de categoría "d" del periodo de estudio en humedad relativa y agua precipitable

AÑO INICIO	HR	PWAT
1954	Correcto	NO
1955	Correcto	Correcto
1956	Correcto	Correcto
1959	Correcto	Correcto
1960	Correcto	Correcto
1961	NO	Correcto
1966	Correcto	Correcto
1967	Correcto	Correcto
1970	Correcto	Correcto
1971	Correcto	Correcto
1974	Correcto	Correcto
1978	Correcto	Correcto
1981	Correcto	Correcto
1984	Correcto	Correcto
1985	Correcto	Correcto
1988	Correcto	Correcto
1989	Correcto	Correcto
1993	Correcto	Correcto
1996	Correcto	Correcto
1999	Correcto	Correcto
2008	Correcto	Correcto
2011	Correcto	Correcto
2016	Correcto	Correcto
2017	Correcto	Correcto
2020	Correcto	Correcto

Con respecto a los pronósticos fallidos, se pronosticaron 22 eventos que no se observaron durante el periodo de estudio tanto en humedad relativa como en agua precipitable. En el año 1954 se pronosticó un evento “El Niño” en agua precipitable, el año anterior las fuerzas enlaces deseadas estuvieron ligeramente sobre el umbral de pronóstico, mostró una tendencia ascendente hacia los primeros meses del año anterior y luego desciende en el mes de abril coincidiendo con el inicio del evento “El Niño” 1953-54, también se observó el inicio de una fase fría del ENSO en el mes de mayo del año 1954. En el pronóstico del año 1956, las fuerzas enlaces deseadas en agua precipitable nuevamente estuvieron ligeramente sobre el umbral de pronóstico en medio de un evento “La Niña”. En el pronóstico del año 1961, en humedad relativa se observó una tendencia descendente en las fuerzas enlaces

deseadas en el año anterior. Para el pronóstico del año 1962, en humedad relativa se observó una tendencia fluctuante ligeramente superior sobre el umbral de pronóstico en el año anterior. En el año 1964 se presencié un evento “La Niña” a partir del mes de mayo, las fuerzas enlaces deseadas el año anterior en humedad relativa mostré una tendencia descendente hacia los primeros meses del año de análisis y luego una tendencia ascendente coincidiendo con el desarrollo de un evento “El Niño”. Para el pronóstico del año 1973, en el mes de mayo se observé el inicio de un evento “La Niña”, en cuanto a las fuerzas enlaces deseadas en ambas variables mostraron una tendencia descendente, siendo más notorio en humedad relativa coincidiendo a fines del año de análisis con el evento “El Niño” 1972-73 con una tendencia ascendente. Durante el año 1975 ocurrió un evento “La Niña”, las fuerzas enlaces deseadas en el año pasado en humedad relativa mostraron una tendencia ascendente superando el umbral de pronóstico a fines del año de análisis mientras en agua precipitable mostré un comportamiento más irregular. En el pronóstico del año 1980, en humedad relativa, las fuerzas enlaces deseadas durante el año anterior estuvieron por encima del umbral de pronóstico, mientras que en agua precipitable mostré una tendencia ascendente. En el año 1983, se vio reflejado por el término del evento “El Niño” y el inicio de un evento “La Niña”, en humedad relativa, las fuerzas enlaces deseadas en el año anterior mostraron una tendencia más descendente que el agua precipitable, ya que este último mostré un comportamiento más irregular, siendo descendente a fines del año de análisis. En el año 1985, continué el evento “La Niña”, en ambas variables, las fuerzas enlaces deseadas en el año anterior mostraron un comportamiento ascendente, sin embargo, en agua precipitable superé el umbral de pronóstico hacia los últimos meses del año de análisis por lo que el pronóstico resulté fallido.

Durante el año 1987 se presencié el evento “El Niño”, un año antes las fuerzas enlaces deseadas en ambas variables mostraron una tendencia descendente con una pendiente no muy pronunciada. En el año 1990 se presentaron condiciones neutras del ENSO, las fuerzas enlaces deseadas en ambas variables mostraron una tendencia ascendente. En los primeros meses del año 1992 se daba término al evento “El Niño”, las fuerzas enlaces deseadas en ambas variables mostraron una tendencia descendente en el año anterior hacia el desarrollo del evento “El Niño”. En los últimos meses del año 1995 se dio inicio a un evento “La Niña”, las fuerzas enlaces deseadas en el año anterior en humedad relativa mostraron un comportamiento constante sobre el umbral de pronóstico, mientras que en agua precipitable fue de manera ascendente. En el año 1998 estuvo compuesto por 2 fases del ENSO, el evento

“El Niño” en los primeros meses y luego el evento “La Niña”, las fuerzas enlaces deseadas en el año anterior en ambas variables mostraron una tendencia descendente coincidiendo con el desarrollo del evento “El Niño”. Durante el año 2020 se presencié el evento “La Niña”, en cuanto a las fuerzas enlaces deseadas en el año anterior mostraron una tendencia ascendente. Para el pronóstico del año 2001, las fuerzas enlaces deseadas en humedad relativa y agua precipitable en el año anterior mostraron una tendencia descendente, siendo más notoria en humedad relativa. Para el pronóstico del año 2003, las fuerzas enlaces deseadas en el año anterior mostraron un comportamiento descendente coincidiendo con el evento “El Niño”. En el año 2005, las fuerzas enlaces deseadas en el año anterior fueron superiores al umbral de pronóstico, en humedad relativa mostró un comportamiento casi constante mientras que en agua precipitable fue más irregular notándose subidas y bajadas. Para el pronóstico del año 2007 se presencié a mediados del año el inicio de un evento “La Niña”, en cuanto a las fuerzas enlaces deseadas en el año anterior, en agua precipitable se notó una tendencia más descendente que la humedad relativa. En el año 2010 nuevamente se dió inicio a otro evento “La Niña”, las fuerzas enlaces deseadas en ambas variables en el año anterior mostraron un comportamiento variable. Para el año 2012, las fuerzas enlaces deseadas en el año pasado en humedad relativa fue de manera casi constante superior al umbral de pronóstico mientras que en agua precipitable fue de manera ascendente y luego descendente. En el año 2013 predominaron las condiciones neutras del ENSO, las fuerzas enlaces deseadas en el año anterior en humedad relativa mostraron un comportamiento irregular con subidas y bajadas mientras que en agua precipitable fue más constante y superior.

Para el año 2015, ya se había dado inicio al evento “El Niño” en los últimos meses del año 2014, por lo que se había pronosticado correctamente, sin embargo, las fuerzas enlaces deseadas continuaron superiores al umbral de pronóstico en ambas variables de estudio mostrando un comportamiento constante superior en humedad relativa e irregular en agua precipitable en el año de análisis. Para inicios del año 2019, se presencié el desarrollo de un evento “El Niño”, las fuerzas enlaces deseadas en ambas variables mostraron una tendencia descendente, siendo el agua precipitable de mayor notoriedad.

En la Tabla 11 se muestra los resultados de los eventos “El Niño” que no fueron pronosticados correctamente. Para el evento del año 1953-54, las fuerzas enlaces deseadas coincidieron con el evento del año 1951-52 por lo que no se tomaron en cuenta por más que fueron superiores al umbral de pronóstico, cabe precisar que la separación de estos eventos

fue de apenas 1 año exactamente. Para el evento “El Niño” 1957-58, las fuerzas enlaces deseadas en el año anterior en humedad relativa tuvieron un comportamiento ascendente sin superar el umbral de pronóstico, mientras que en agua precipitable el pronóstico fue de corto plazo. Para el evento “El Niño” 1963-64, las fuerza enlaces deseadas en ambas variables mostraron un comportamiento variable en el año de análisis, solo en humedad relativa se pronosticó a corto plazo. Para el evento del año 1965-66, las fuerzas enlaces deseadas tuvieron un comportamiento descendente en el año anterior coincidiendo con el término el evento del año 1963-64 por lo que no se tomaron en cuenta. Para el evento del año de inicio en 1979, las fuerzas enlaces deseadas en ambas variables tuvieron una tendencia irregular en el año de análisis, solo en humedad relativa superaron el umbral de pronóstico coincidiendo con el evento “El Niño” del año 1977-78 por lo que no se tuvo en cuenta, mientras que en agua precipitable no fueron superiores al umbral de pronóstico. Para el evento “El Niño” 2004-05, las fuerzas enlaces deseadas en el año anterior en humedad relativa mostraron un comportamiento cuasi constante superior al umbral de pronóstico coincidiendo con el término del evento del año 2002-03 por lo que no se tuvieron en cuenta las alertas, mientras que en agua precipitable fue más irregular pero también coincidieron con el evento “El Niño”. Para el evento del año 2006-07, las fuerzas enlaces deseadas en el año anterior para ambas variables tuvieron un comportamiento cuasi constante y superior al umbral de pronóstico, pero estos coincidieron con el evento “El Niño” del año 2004-05.

Tabla 10: Validación de los pronósticos ENSO “El Niño” de categoría "b" del periodo de estudio en humedad relativa y agua precipitable

AÑO PRONOSTICADO	Tendencia-Observaciones	
	Humedad relativa	Agua precipitable
1954	NO	Subida al inicio, ENSO Fase La Niña 1954
1956	NO	Constante superior, ENSO Fase La Niña 1956
1961	Tendencia descendente, ENSO Fase Neutro	NO
1962	Superior ligero al umbral, tendencia descendente	NO
1964	Tendencia descendente, subida a fines de año durante El Niño	NO
1973	Tendencia descendente, subida a fines de año durante El Niño	Constante, bajada cuando hay evento El Niño 1972
1975	Tendencia ascendente, cruza el umbral a fines de año	Subida y bajada ligera, las alertas están a inicio de año
1980	Constante superior durante el año 1979	Tendencia ascendente, calentamiento por unos meses
1983	Tendencia descendente, ENSO El Niño 1982	Subida y bajada, nuevamente baja a fines de año
1985	NO	Tendencia ascendente, ENSO Fase La Niña 1985
1987	Tendencia descendente, subida a fines de año durante El Niño	Tendencia descendente, ENSO Fase El Niño 1986
1990	Tendencia ascendente, superior al umbral en todo el año	Tendencia ascendente, ENSO Fase Neutro
1992	Tendencia descendente, ENSO El Niño 1991	Constante superior, tendencia descendente
1995	Constante superior, superior al umbral en todo el año	Tendencia ascendente
1998	Tendencia descendente, ENSO El Niño 1997	Tendencia descendente

Continuación...

AÑO PRONOSTICADO	Tendencia-Observaciones	
	Humedad relativa	Agua precipitable
2000	Tendencia ascendente a fines de año cruza el umbral	Tendencia ascendente
2001	Tendencia descendente, superior al umbral en todo el año	Subida y tendencia descendente
2003	Tendencia descendente, ENSO El Niño 2002	Tendencia descendente
2005	Constante superior, superior al umbral en todo el año	Subida y tendencia descendente
2007	Constante superior, superior al umbral en todo el año	Tendencia descendente
2010	Variable (subida y bajada), superior al umbral todo el año	Variable (subida y bajada)
2012	Constante superior, superior al umbral todo el año	Subida y bajada
2013	Tendencia descendente y subida	Constante y superior
2015	Constante superior, superior al umbral todo el año	Tendencia descendente y subida a fines de año
2019	Tendencia descendente, ENSO El Niño 2018	Tendencia descendente, ENSO El Niño 2018

Tabla 11: Validación de los pronósticos ENSO “El Niño” de categoría "c" del periodo de estudio en humedad relativa y agua precipitable

AÑO INICIO	INTENSIDAD	DURACION DEL EVENTO (meses)	Observaciones	
			Humedad Relativa	Agua Precipitable
1953	Débil	13	Alerta en un evento Niño	Alerta en un evento Niño
1957	Fuerte	16	Valor máximo S=3.52	NO
1963	Moderado	9	NO	Valor máximo S=3.23
1965	Fuerte	12	Alerta en un evento Niño	Alerta en un evento Niño
1979	Débil	5	Valor máximo S=3.27	Valor máximo S=3.27
2004	Débil	8	Alerta en un evento Niño	Alerta en un evento Niño
2006	Débil	5	Alerta en un evento Niño	Alerta en un evento Niño

V. CONCLUSIONES

1. La humedad relativa y el agua precipitable tuvieron un comportamiento estacional con valores máximos en los meses de verano y mínimos en los meses de invierno, conforme los nodos se alejan al Ecuador, muestran más dispersión y con valores extremos tanto mínimos como máximos durante los meses del año, por lo que los datos que se exploraron predeterminadamente estuvieron coherentes para la prueba de estacionariedad. En la prueba de estacionariedad ADF se concluyó para ambas variables que no existe raíz unitaria en las series de tiempo de cada nodo de estudio, esto comprobó la estacionariedad de cada una de las series de cada nodo.
2. Las fuerzas enlaces deseadas en el periodo de estudio (1952-2019) por cada décimo día “t” para la humedad relativa oscilan entre 3.319 a 3.875 con una tendencia ligeramente creciente, en el periodo de prueba correspondiente del 1952 al 1980 existe mayor dispersión a comparación de los años posteriores al 2000 donde se observa más concentración, por otro lado para el agua precipitable, los valores oscilan entre 2.641 a 3.710 presentando mayor dispersión en todo el periodo de estudio a comparación de la humedad relativa, puesto que este último es una variable cuyos valores son de intervalo limitado.
3. Para la elección del umbral de pronóstico, se validó estadísticamente entre los valores de las fuerzas enlaces deseadas durante el periodo de prueba (1953-1980), el resultado que mejor se ajustó para la humedad relativa fue de 3.60 y para el agua precipitable fue de 3.35. Se pronosticaron 16 de 22 eventos El Niño del 1953 al 2020 de manera correcta usando las fuerzas enlaces deseadas de las correlaciones cruzadas de las anomalías diarias de humedad relativa y agua precipitable, con ello se obtuvo una tasa de acierto de 0.727, mientras que la tasa de falsa alarma fue de 0.478 para ambas variables debido a que se pronosticaron 22 de 46 años que no ocurrieron algún evento El Niño. En cuanto a la intensidad de los eventos El Niño, tanto en humedad relativa como agua precipitable se pronosticaron 6 de 10 eventos El Niño débil, con intensidad moderada fueron 4 para la humedad relativa y 3 para el agua precipitable de 4 eventos ocurridos, con intensidad fuerte fueron 4 para la humedad relativa y 5 para el agua precipitable de 6 eventos que ocurrieron y finalmente los tres eventos muy fuertes fueron pronosticados correctamente en ambas variables.

VI. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda ensayar con una modificación de la metodología en cuanto a la emisión de alertas de pronóstico, cuando las fuerzas enlaces deseadas aún se mantengan por encima del umbral habiendo pasado el año de análisis, este no debería ser considerado como alerta para la reducción de la categoría “b” en la validación estadística, con el fin de acortar la tasa de falsa alarma.
2. Se recomienda realizar la metodología de estudio con otras variables meteorológicas tales como la presión superficial del mar, precipitación, viento, entre otros con el fin de poder comparar y obtener resultados que puedan mejorar el pronóstico a largo plazo del evento ENSO “El Niño”.
3. Se recomienda evaluar un nuevo dominio del área de estudio para el análisis de correlación que pueda existir entre las teleconexiones de la cuenca del Niño con un nuevo campo.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Agarwal, A., Caesar, L., Marwan, N., Maheswaran, R., Merz, B., & Kurths, J. (2019). Network-based identification and characterization of teleconnections on different scales. *Scientific Reports*, 9(1), 1-12.
- Ambrizzi, T., de Souza, E. B., & Pulwarty, R. S. (2004). Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. *The Hadley circulation: present, past and future*, 203-235.
- Ancapichún, S., & Garcés-Vargas, J. (2015). Variability of the Southeast Pacific Subtropical Anticyclone and its impact on sea surface temperature off north-central Chile. *Ciencias Marinas*, 41(1), 1-20.
- Andrade Jr, E. R., & Sellers, W. D. (1988). El Niño and its effect on precipitation in Arizona and western New Mexico. *Journal of Climatology*, 8(4), 403-410.
- Ashok, K., & Yamagata, T. (2009). The El Niño with a difference. *Nature*, 461(7263), 481-484.
- Ashok, K., Behera, S. K., Rao, S. A., Weng, H., & Yamagata, T. (2007). El Niño Modoki and its possible teleconnection. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C11), 1-27.
- Barnston, A. (2015). Why are there so many ENSO indexes, instead of just one? NOAA Climate.gov. <http://url-del-blog.com>
- Bjerknes, J. (1969). Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Monthly weather review*. 97(3). 163-172.
- Bhalme, H. N., & Jadhav, S. K. (1984). The Southern Oscillation and its relation to the monsoon rainfall. *Journal of climatology*, 4(5), 509-520.
- Boslaugh, S., & Watters, P. A. (2008). *Statistics in a nutshell*. Sebastopol, CA: OReilly Media.
- Brockwell, P. J., & Davis, R. A. (Eds.). (2002). *Introduction to time series and forecasting*. New York, NY: Springer New York.

- Calvo Sánchez, F. J., Martín Pérez, D., Morales Martín, G., & Viana Jiménez, S. (2018). HARMONIE-AROME, modelo operativo de escala convectiva de AEMET. Parte I: Modelo de predicción y validación.
- Carson, J. S. (2002). Model verification and validation. In Proceedings of the winter simulation conference. Vol. 1, 52-58.
- Clarke, A. J. (2008). An introduction to the dynamics of El Niño and the Southern Oscillation. Elsevier.
- Comité Técnico del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN). (2012). Definición Operacional de los eventos El Niño y La Niña y sus magnitudes en la costa del Perú. 1-3.
- Corcuera-García P. (2016). “Fenómeno El Niño y Capital Humano en el Perú: impactos sobre el peso al nacer, peso/talla por edad y educación acumulada”. Tesis para optar el título de Licenciado en Economía. Universidad de Piura-Perú, 12-16.
- Cornejo-Garrido, A. G., & Stone, P. H. (1977). On the heat balance of the Walker circulation. *Journal of Atmospheric Sciences*. 34(8), 1155-1162.
- Dahlman, L. (2009). Climate Variability: Oceanic Niño Index. NOAA Climate.gov. Recuperado de <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-variability-oceanic-ni%C3%B1o-index>
- Derrick, T., & Thomas, J. (2004). Time series analysis: the cross-correlation function.
- Duan, W., & Wei, C. (2013). The ‘spring predictability barrier’ for ENSO predictions and its possible mechanism: results from a fully coupled model. *International Journal of Climatology*, 33(5), 1280-1292.
- ENFEN. (2012). Definición Operacional de Los Eventos El Niño y La Niña y Sus Magnitudes En La Costa Del Perú.
- Escobar, F., & ACEITUNO, P. (1998). INFLUENCIA DEL FENÓMENO ENSO SOBRE LA. *Bull. Inst. fr. études andines*, 27(3), 753-759.
- Ferreira, N. S. (1996). Zona de convergência intertropical. *Boletim do Climanálise Especial-Comemoração dos*, 10.
- Ferreiraa, L. N., Ferreirab, N. C., Gavac, M. L. L., Zhaod, L., & Macaua, E. E. (2019). The Influence of Time Series Distance Functions on Climate Networks.

- Fraedrich, K. (1990). European grosswetter during the warm and cold extremes of the El Niño/Southern Oscillation. *International Journal of Climatology*, 10(1), 21-31.
- Gray, W. M. (1984). Atlantic seasonal hurricane frequency. Part II: Forecasting its variability. *Monthly Weather Review*, 112(9), 1669-1683.
- Guevara Díaz, J. M. (2014). Uso correcto de la correlación cruzada en Climatología: el caso de la presión atmosférica entre Taití y Darwin. *Terra*, 30(47), 79-102.
- Hendon, H. H., Wheeler, M. C., & Zhang, C. (2007). Seasonal dependence of the MJO–ENSO relationship. *Journal of climate*, 20(3), 531-543.
- Hewaratchi, A. P., Li, Y., Lund, R., & Rennie, J. (2017). Homogenization of daily temperature data. *Journal of Climate*, 30(3), 985-999.
- Hurley, J. V., & Galewsky, J. (2010). A last saturation analysis of ENSO humidity variability in the subtropical Pacific. *Journal of climate*. 23(4). 918-931.
- International Research Institute for Climate and Society (IRI), Monitoreo ENSO. Recuperado de: <https://iridl.ldeo.columbia.edu/maproom/ENSO/Diagnostics.html>
- Jiménez García, M. (2014). Validación de la capacidad del modelo WRF “Weather Research and Forecasting” para pronosticar lluvia intensa, usando el método orientado a objetos y tablas de contingencia. Departamento de Geociencias.
- Jin, F. F. (1997). An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part I: Conceptual model. *Journal of the atmospheric sciences*, 54(7), 811-829.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., ... & Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American meteorological Society*, 77(3), 437-472.
- Kao, H. Y., & Yu, J. Y. (2009). Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of ENSO. *Journal of Climate*, 22(3), 615-632.
- Kateri M. (2014). *Contingency tables. Methods and implementation using R*. Birkhäuser, New York, USA. 304.
- Kiladis, G. N., Straub, K. H., & Haertel, P. T. (2005). Zonal and vertical structure of the Madden–Julian oscillation. *Journal of the atmospheric sciences*, 62(8), 2790-2809.
- Kim, H. M., Webster, P. J., & Curry, J. A. (2009). Impact of shifting patterns of Pacific Ocean warming on North Atlantic tropical cyclones. *Science*. 325(5936), 77-80.

- Kirtman, B. P. (1997). Oceanic Rossby wave dynamics and the ENSO period in a coupled model. *Journal of climate*, 10(7), 1690-1704.
- Komorowski, M., Marshall, D. C., Saliccioli, J. D., & Crutain, Y. (2016). Exploratory data analysis. Secondary analysis of electronic health records, 185-203.
- Kug, J. S., Jin, F. F., & An, S. I. (2009). Two types of El Niño events: cold tongue El Niño and warm pool El Niño. *Journal of Climate*, 22(6), 1499-1515.
- Lau, KM y Yang, S. (2003). Walker Circulation. *Encyclopedia of atmospheric sciences*, 2505-2510.
- Lavado-Casimiro, W., & Espinoza, J. C. (2014). Impactos de El Niño y La Niña en las lluvias del Perú (1965-2007). *Revista Brasileira de Meteorologia*, 29, 171-182.
- Lenters, J. D., & Cook, K. H. (1997). On the origin of the Bolivian high and related circulation features of the South American climate. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 54(5), 656-678.
- Lin, I. I., Camargo, S. J., Patricola, C. M., Boucharel, J., Chand, S., Klotzbach, P., ... & Jin, F. F. (2020). ENSO and tropical cyclones. *El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate*, 377-408.
- Lovell-Smith, J. W., & Pearson, H. (2005). On the concept of relative humidity. *metrologia*, 43(1), 129.
- Ludescher, J., Gozolchiani, A., Bogachev, M. I., Bunde, A., Havlin, S., & Schellnhuber, H. J. (2013). Improved El Niño forecasting by cooperativity detection. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(29), 11742-11745.
- Mantua, N. J., & Battisti, D. S. (1994). Evidence for the delayed oscillator mechanism for ENSO: The “observed” oceanic Kelvin mode in the far western Pacific. *Journal of Physical Oceanography*. 24(3), 691-699.
- Marcos Valiente, Ó. (1999). Evolución en el estudio del fenómeno ENSO (El Niño-Oscilación del Sur): de anomalía «local» a la predicción de variaciones climáticas globales. *Investigaciones geográficas*, nº 21, 1999. 5-20.
- Martínez Grimaldo, A., & Takahashi, K. (2017). ¿El Niño costero o Fenómeno El Niño? *Moneda*, 34-37.
- Marques, J., Santos, J. M. D., Villa Nova, N. A., & Salati, E. (1977). Precipitable water and

- water vapor flux between Belém and Manaus (). *Acta Amazonica*, 7(3), 355-362.
- Maturana J., Bello M. & Manley M. (2004). Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile. Departamento de Oceanografía de Valparaíso.
- McCarthy, M. P., & Toumi, R. (2004). Observed interannual variability of tropical troposphere relative humidity. *Journal of climate*, 17(16), 3181-3191.
- MetEd. (2010). Fundamentos de instrumental meteorológico y mediciones atmosféricas. Recuperado de: https://www.meted.ucar.edu/instrumentation/instrumentation_intro_es/navmenu.php?tab=1&page=3-0-0&type=flash
- MetEd. (2016). Introduction to Tropical Meteorology 2nd Edition. Chapter 4: Tropical Variability. Recuperado de: https://www.meted.ucar.edu/tropical/textbook_2nd_edition/navmenu.php?tab=5&page=2.1.9
- MetEd. (2016). Introduction to Tropical Meteorology 2nd Edition. Chapter 4: Tropical Variability. Recuperado de: https://www.meted.ucar.edu/tropical/textbook_2nd_edition/navmenu.php?tab=5&page=1.2.2
- MetEd. (2018). Fundamentos de PNT: la predicción numérica y el pronóstico. Recuperado de: https://www.meted.ucar.edu/education_training/lesson/1383#.XW26fihKjIU
- Mm, M. (2012). Statistics Corner: A guide to appropriate use of Correlation coefficient in medical research. *Malawi Med J*, 24(3), 69-71.
- Molina Arias, M. (2017). ¿Qué significa realmente el valor de p? *Pediatría Atención Primaria*, 19(76), 377-381.
- Montgomery, D. C., Jennings, C. L., & Kulahci, M. (2008). *Introduction to Time Series Analysis And Forecasting* John Wiley & Sons. Inc., New Jersey.
- Negrón, P. (2014). Redes neuronales sigmoideal con algoritmo Lm para pronóstico de tendencia del precio de las acciones del IPSA. Valparaíso, Chile: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Informática.

- Nettleton, D. (2014). *Commercial data mining: processing, analysis and modeling for predictive analytics projects*. Elsevier.
- Nicholls, N. (1987). The use of canonical correlation to study teleconnections. *Monthly Weather Review*, 115(2), 393-399.
- Nigam, S., & Baxter, S. (2015). Teleconnections. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, G. North, Ed. Elsevier Science, 90, 109.
- NOAA. (2009). In *Watching for El Niño and La Niña, NOAA Adapts to Global Warming*. Recuperado de: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/watching-el-ni%C3%B1o-and-la-ni%C3%B1a-noaa-adapts-global-warming>
- Organización Mundial de Meteorología (OMM). (2014). *El Niño/Oscilación del Sur*. N°1145.
- Ovando, G., Bocco, M., & Sayago, S. (2005). Redes neuronales para modelar predicción de heladas. *Agricultura Técnica*, 65(1), 65-73.
- Pabón Caicedo, J. D., & Montealegre Bocanegra, J. E. (2017). Los fenómenos de El Niño y de La Niña, su efecto climático e impactos socioeconómicos.
- Paredes, F. J., Barbosa, H., & Guevara, E. (2015). Análisis espacial y temporal de las sequías en el nordeste de Brasil. *Agriscientia*, 32(1), 1-14.
- Patterson, J. (2020). *Spectrum Analysis Basics, Part 1 - What is a Spectrum Analyzer?* Recuperado de: https://blogs.keysight.com/blogs/tech/rfmw.entry.html/2020/05/01/spectrum_analysisba-8Axa.html
- Peixoto, J., & Oort, A. H. (1996). The climatology of relative humidity in the atmosphere. *Journal of climate*. 9(12), 3443-3463.
- Peña, D. (2005). *Análisis de series temporales*. Alianza Editorial.
- Picaut, J., Masia, F., & Du Penhoat, Y. (1997). An advective-reflective conceptual model for the oscillatory nature of the ENSO. *Science*. 277(5326), 663-666.
- Quispe Ccalluari, C., Tam Málaga, J., Demarcq, H., Romero Tadeo, C., Espinoza Morriberón, D., Chamorro Gómez, A., ... & Oliveros Ramos, R. (2015). El Índice Térmico Costero Peruano (ITCP), 7-11.
- Ramírez, I. J., & Briones, F. (2017). Understanding the El Niño costero of 2017: The

- definition problem and challenges of climate forecasting and disaster responses. *International Journal of Disaster Risk Science*. 8(4), 489-492.
- Ramírez, W. B. (2020). Fundamentos para pronosticar una serie de tiempo estacionaria con información de su propio pasado. *Industrial data*, 23(1), 207-228.
- Rao, V. B., Chapa, S. R., & Cavalcanti, I. F. A. (1998). Moisture budget in the tropics and the Walker circulation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 103(D12), 13713-13728.
- Rasmusson, E. M., & Carpenter, T. H. (1982). Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Monthly Weather Review*. 110(5), 354-384.
- Richardson, M. (2009). Principal component analysis. URL: <http://people.maths.ox.ac.uk/richardsonm/SignalProcPCA.pdf> (last access: 3.5. 2013). Aleš Hladnik Dr., Ass. Prof., Chair of Information and Graphic Arts Technology, Faculty of Natural Sciences and Engineering, University of Ljubljana, Slovenia ales.hladnik@ntf.uni-lj.si, 6, 16.
- Ropelewski, C. F., & Halpert, M. S. (1986). North American precipitation and temperature patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation (ENSO). *Monthly Weather Review*, 114(12), 2352-2362.
- Ropelewski, C. F., & Jones, P. D. (1987). An extension of the Tahiti-Darwin southern oscillation index. *Monthly weather review*. 115(9), 2161-2165.
- Roy, I., & Kripalani, R. H. (2019). The role of natural factors (part 1): addressing on mechanism of different types of ENSO, related teleconnections and solar influence. *Theoretical and Applied Climatology*. 137(1), 469-480.
- Sargent, R. G. (2011). Verification and validation of simulation models. In *Proceedings of the 2010 winter simulation conference* (pp. 166-183). IEEE.
- SENAMHI. (2014). El Fenómeno EL NIÑO en el Perú. Dirección General de Meteorología. Dirección de Climatología. Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres – PLANAGERD.
- Straub, K. H., & Kiladis, G. N. (2002). Observations of a convectively coupled Kelvin wave in the eastern Pacific ITCZ. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59(1), 30-53.

- Takahashi, K., Montecinos, A., Goubanova, K., & Dewitte, B. (2011). ENSO regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño. *Geophysical Research Letters*, 38(10), 1-5.
- Takahashi, K., Mosquera Vásquez, K. A., & Reupo Vélez, J. A. (2014). El índice Costero El Niño (ICEN): historia y actualización, 8-9.
- Talagrand, O. (1997). Assimilation of observations, an introduction (gtspecial issue\data assimilation in meteorology and oceanography: Theory and practice). *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, 75(1B), 191-209.
- Teng, W. H., Huang, C. Y., Ho, S. P., Kuo, Y. H., & Zhou, X. J. (2013). Characteristics of global precipitable water in ENSO events revealed by COSMIC measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(15), 8411-8425.
- Temple E. (2002). “El Niño” en el Perú: Viejos y Nuevos Temas. Programa de Desastres, ITGD- Oficina Regional para América Latina – Lima, 104.
- Trenberth, K. E. (1984). Signal versus noise in the Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, 112(2), 326-332.
- Trenberth, K. E., & Stepaniak, D. P. (2001). Indices of el Niño evolution. *Journal of climate*, 14(8), 1697-1701.
- Tsonis, A. A., Hunt, A. G., & Elsner, J. B. (2003). On the relation between ENSO and global climate change. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 84(3), 229-242.
- Tsonis, A. A., & Roebber, P. J. (2004). The architecture of the climate network. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 333, 497-504.
- Tsonis, A. A., Swanson, K. L., & Wang, G. (2008). On the role of atmospheric teleconnections in climate. *Journal of Climate*, 21(12), 2990-3001.
- Uurtio, V., Monteiro, J. M., Kandola, J., Shawe-Taylor, J., Fernandez-Reyes, D., & Rousu, J. (2017). A tutorial on canonical correlation methods. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 50(6), 1-33.
- Van Der Vaart, H.R. (1961). Some extensions of the idea of bias. *Ann. Math. Statist.* 32, 436-447.
- Veiga, J. A. P., Pezza, A. B., Ambrizzi, T., Rao, V. B., Franchito, S. H., & Yoshida, M. C. (2013). The energy cycle associated to the Pacific Walker circulation and its

- relationship to ENSO. *Atmospheric and Climate Sciences*. 627-642.
- Veiga, J. A. P., Rao, V. B., & Franchito, S. H. (2009). On the initiation of the Walker circulation during 1982/1983 ENSO event. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 24(1), 63-68.
- Villarpando, W. (1998). Alteración de la dinámica atmosférica producida por el Fenómeno El Niño en Bolivia. SENAMHI Bolivia. Departamento de Meteorología. 122-129.
- Wang, C. (2001). On the ENSO mechanisms. *Advances in Atmospheric Sciences*. 18(5), 674-691.
- Wang, C. (2018). A review of ENSO theories *National Science Review*. 5(6), 813-825.
- Wang, B., & Rui, H. (1990). Synoptic climatology of transient tropical intraseasonal convection anomalies: 1975–1985. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 44(1), 43-61.
- Wang, W. C., & Li, K. (1990). Precipitation fluctuation over semiarid region in northern China and the relationship with El Niño/Southern Oscillation. *Journal of Climate*, 3(7), 769-783.
- Weather Prediction Center – National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (1998). Recuperado de: <https://www.wpc.ncep.noaa.gov/international/jetbody.html>
- Weisberg, R. H., & Wang, C. (1997). A western Pacific oscillator paradigm for the El Niño-Southern Oscillation. *Geophysical research letters*. 24(7), 779-782.
- Williamson, D. F., Parker, R. A., & Kendrick, J. S. (1989). The box plot: a simple visual method to interpret data. *Annals of internal medicine*, 110(11), 916-921.
- Daniel, S., & Wilks, W. I. L. K. S. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press.
- Yamasaki, K., Gozolchiani, A., & Havlin, S. (2008). Climate networks around the globe are significantly affected by El Niño. *Physical review letters*, 100(22), 228501.
- Yang, H., Zhao, Y., & Liu, Z. (2016). Understanding Bjerknes compensation in atmosphere and ocean heat transports using a coupled box model. *Journal of Climate*. 29(6), 2145-2160.
- Yu, J. Y., & Kim, S. T. (2011). Relationships between extratropical sea level pressure variations and the central Pacific and eastern Pacific types of ENSO. *Journal of*

Climate, 24(3), 708-720.

Zambrano, E. (1996). El Niño. INOCAR-Ecuador. 8(1), 109-114.

Zavala, J. (2016). Desarrollo de un sistema de pronóstico operacional de eventos extremos basado en modelos numéricos de predicción de las condiciones meteorológicas, de oleaje y marea de tormenta, incluyendo la evaluación del desempeño de los modelos y la determinación de incertidumbres, con fines de alertamiento. Universidad Autónoma de México. 37-48.

Zebiak, S. E., & Cane, M. A. (1987). A model El Niño–Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*. 115(10), 2262-2278.

Zhang, C. (2005). Madden-Julian oscillation. *Reviews of Geophysics*, 43(2).

Zhou, D., Gozolchiani, A., Ashkenazy, Y., & Havlin, S. (2015). Teleconnection paths via climate network direct link detection. *Physical review letters*, 115(26), 268501.

VIII. ANEXOS

Los scripts desarrollados en R se ejecutaron de forma independiente para cada variable meteorológica de estudio, lo cual se muestra a continuación.

Anexo 1. Script de procesamiento de datos

```

rm(list=ls())
setwd("C:/Users/DELL.DESKTOP-VDABKP2/Desktop/Tesis/SCRIPTS/code/HR")
library("ncdf4")
library("lubridate")
#SCRIPT_1. DATOS
# ----- DATOS-----
#Cargar data
file.nc=nc_open("C:/Users/DELL.DESKTOPVDABKP2/Desktop/Tesis/SCRIPTS/input/hr.nc",
write=F, readunlim=T, verbose=F, auto_GMT=T, suppress_dimvals=F)
print(file.nc)
#Dimensiones de la data (Longitud, latitud y tiempo)
#Longitud
lon=ncvar_get(file.nc,"lon")
#Latitud
lat=ncvar_get(file.nc,"lat", verbose=F)
#Tiempo
time=ncvar_get(file.nc,"time")
time[1]
timep=as.Date(time/24, origin = "1800-01-01")
head(timep)
tail(timep)
#Declarando la variable temperatura del aire
var=ncvar_get(file.nc,"rhum")
#Declarando el tamaño de las dimensiones
nlon=length(lon)
nlat=length(lat)
ntime=length(time)
#Cerrar netcdf
nc_close(file.nc)
# ----- PROCESAMIENTO DE DATOS-----
rh=var
#-----Encontrar los días de los años bisiestos-----
year=NULL
for ( y in 1950:2019 ){
  if( y%%4 == 0 ) #Si y es multiplo de 4
    year=c(year,y) }
diabis <- as.Date (ISOdate(year,2,29), origin = "1800-01-01")
bis <- which (timep %in% diabis)
#-----Eliminacion de días bisiestos-----
# R es la matriz de trabajo sin los días de los años bisiestos
tiempo <- timep [!(timep%in%diabis)]
R <- rh[,-(bis)]
dim(R)
#saveRDS(R, file="C:/Users/DELL/Desktop/Tesis/SCRIPTS/output/datos.Rda")

```

Anexo 2. Script del área de estudio

```
library("dplyr")
library("fields")
library("mapproj")
#SCRIPT_2. AREA DE ESTUDIO
#-----Seleccion del grillado (Resolucion de 7.5 x 7.5)-----
lon_nuevo=NULL;lat_nuevo=NULL
for (ii in 0:22)
  for(jj in 0:8){
    longi=lon[1]+7.5*ii
    lati=lat[1]-7.5*jj
    lon_nuevo=c(lon_nuevo,longi)
    lat_nuevo=c(lat_nuevo,lati)
  }
#Dataframe
Puntos_estudio <- data.frame(Longitud=lon_nuevo,Latitud=lat_nuevo)
Puntos_estudio$Region<-ifelse((Puntos_estudio$Longitud==195.0& Puntos_estudio$Latitud==0) |
  (Puntos_estudio$Longitud==202.5 & Puntos_estudio$Latitud==0) |
  (Puntos_estudio$Longitud==210.0 & Puntos_estudio$Latitud==0) |
  (Puntos_estudio$Longitud==217.5 & Puntos_estudio$Latitud==0) |
  (Puntos_estudio$Longitud==225.0 & Puntos_estudio$Latitud==0) |
  (Puntos_estudio$Longitud==232.5 & Puntos_estudio$Latitud==0) |
  (Puntos_estudio$Longitud==240.0 & Puntos_estudio$Latitud==0) |
  (Puntos_estudio$Longitud==247.5 & Puntos_estudio$Latitud==0) |
  (Puntos_estudio$Longitud==255.0 & Puntos_estudio$Latitud==0) |
  (Puntos_estudio$Longitud==262.5 & Puntos_estudio$Latitud==0) |
  (Puntos_estudio$Longitud==270.0 & Puntos_estudio$Latitud==0) |
  (Puntos_estudio$Longitud==277.5 & Puntos_estudio$Latitud==0) |
  (Puntos_estudio$Longitud==232.5 & Puntos_estudio$Latitud==-7.5) |
  (Puntos_estudio$Longitud==277.5 & Puntos_estudio$Latitud==-7.5)
  , "Nino", "No Nino")
for (n in 1:dim(Puntos_estudio)[1]){
  Puntos_estudio$UbicaLon[n] <- which(lon==Puntos_estudio$Longitud[n]);
  Puntos_estudio$UbicaLat[n] <- which(lat==Puntos_estudio$Latitud[n])}
#Agregar longitud y latitud con respecto al hemisferio que se encuentra
for (i in 1:dim(Puntos_estudio)[1]){
  Puntos_estudio$Lon[i]<ifelse(Puntos_estudio$Longitud[i]<180,paste(Puntos_estudio$Longitud[i],
  "°E",sep=""),paste(360-Puntos_estudio$Longitud[i],"°W",sep=""))
  Puntos_estudio$Lat[i]<-ifelse(Puntos_estudio$Latitud[i]<0,paste(-
  Puntos_estudio$Latitud[i],"°S",sep=""),paste(Puntos_estudio$Latitud[i],"°N",sep=""))}
# ----- SERIES NINO & SERIES NO NINO -----
SerieNino <- filter (Puntos_estudio, Region == "Nino")
SerieNoNino <- filter (Puntos_estudio, Region == "No Nino")
lon_SNN=NULL ; lat_SNN=NULL;
lon_SN=NULL ; lat_SN=NULL;
for (ni in 1:dim(SerieNino)[1]){
  for (no in 1:dim(SerieNoNino)[1]){
    long_SN=SerieNino$UbicaLon[ni] ;lati_SN=SerieNino$UbicaLat[ni]
    long_SNN=SerieNoNino$UbicaLon[no];lati_SNN=SerieNoNino$UbicaLat[no]
    lon_SN=c(lon_SN,long_SN)
    lat_SN=c(lat_SN,lati_SN)
    lon_SNN=c(lon_SNN,long_SNN)
    lat_SNN=c(lat_SNN,lati_SNN)} }
# MATRIZ CUADRADA, QUE INDICA LAS COMBINACIONES DE NODOS NINO Y NODOS NO NINO
```

```

posicion <- cbind(lon_SN,lat_SN,lon_SNN,lat_SNN)
#-----GRAFICA DEL AREA DE ESTUDIO-----
longitud <- ifelse(lon <180 ,paste(lon, "°E",sep=""),paste(360-lon,"°W",sep=""))
latitud <- ifelse(lat<0 , paste(-lat,"°S",sep=""),paste(lat, "°N",sep=""))
plot(Puntos_estudio$Longitud,Puntos_estudio$Latitud,xlab="Longitud",ylab="Latitud",
      ylim=c(-45,45),col=ifelse(Puntos_estudio$Region %in% "Nino" ,"red","blue"),pch=16,axes=F)
      axis(1, seq(120,300,2.5),longitud)
      axis(2, seq(-30,30,2.5),rev(latitud))
data(wrld_simpl)
plot(wrld_simpl, add = TRUE)
plot(elide(wrld_simpl, shift = c(360, 0)), add = TRUE)
#Delimitacion de Regiones Nino
#Región 4 Nino : (5N-5S, 160E-150W)
#Region 3 Nino : (5N-5S, 150W-90W)
#Región 3.4 Nino : (5N-5S, 170W-120W)
#Región 1.2 Nino : (0-10S, 90W-80W)
region_nino <- data.frame(
  "region" =c("Nino 4","Nino 3","Nino 3+4","Nino 1+2"),
  "lat_i" =c("5°N","5°N","5°N","0°N"),
  "lat_f" =c("5°S","5°S","5°S","10°S"),
  "lon_i" =c("160°E","150°W","170°W","90°W"),
  "lon_f" =c("150°W","90°W","120°W","80°W"))

```


Anexo 3. Script del análisis exploratorio de las variables meteorológicas de estudio

```
library("fields")
library("maptools")
#SCRIPT_3. ANALISIS EXPLORATORIO
#R <- readRDS("C:/Users/DELL/Desktop/Tesis/SCRIPTS/output/datos.Rda")
# ----- ANALISIS EXPLORATORIO -----
#-----DIAGRAMA DE CAJAS PARA EL AREA DE ESTUDIO-----
meses <- matrix(rep(month(tiempo),each=nlat),nrow=nlat,ncol=length(tiempo))
for (n in 0:22){
  punto <- R[(3*n)+1,]
  ruta_boxplot <- paste("C:/Users/DELL/Desktop/Tesis/RESULTADOS/HR/analisis
exploratorio/Boxplot/"
, longitud[(3*n)+1], ".pdf", sep="")
  pdf(file=ruta_boxplot)
  titulo <- paste("Diagrama de cajas \n Humedad Relativa (%) \n Lat : 30°S -30°N - Lon
:", longitud[(3*n)+1], sep="")
  boxplot(punto~meses, main=titulo, xlab="Meses", ylab="Humedad Relativa (%)",

names=c("ENE", "FEB", "MAR", "ABR", "MAY", "JUN", "JUL", "AGO", "SET", "OCT", "NOV", "DIC
"))
  dev.off()
}
```

Anexo 4. Script del cálculo de las anomalías diarias de las variables meteorológicas de estudio

```
#SCRIPT_4.ANOMALIAS
# -----CLIMATOLOGIA MENSUAL-----
# -----Calculo de la climatologia-----
dia <- day(tiempo)
mes <- month(tiempo)
ano <- year(tiempo)
# -----Determinar la climatologia base (1981-2010)-----
#Según la OMM (WMO N°100- Cap.4.8.1)
#Insertar el inicio de evaluacion de la climatologia
dia1 <- 01
mes1 <- 01
ano1 <- 1981
Fecha1 <- as.Date (ISOdate(ano1,mes1,dia1), origin = "1800-01-01")
fecha1 <- which (tiempo %in% Fecha1)
#Insertar el termino de evaluacion de la climatologia
dian <- 31
mesn <- 12
anon <- 2010
Fechan <- as.Date (ISOdate(anon,mesn,dian), origin = "1800-01-01")
fechan <- which (tiempo %in% Fechan)
clima <- aperm(apply(R[,fecha1:fechan],c(1,2),by,mes[fecha1:fechan],
function(x)ifelse(all(is.na(x)),NA,mean(x))),c(2,3,1))
dim(clima)
# -----CLIMATOLOGIA MENSUAL SUAVIZADA A DIARIA -----
Dates<-seq(12/365,12,by=12/365)
clima_s <-array(NA,dim=c(nlon,nlat,365))
for (lati in 1:nlat ){
  for(long in 1:nlon){
    clima_s[long,lati,] <- splinefun(x=0:12,y=c(clima[long,lati,12],clima[long,lati,]))(Dates)
  }
}
dim(clima_s)
# -----ANOMALIA DIARIA MEDIANTE LA CLIMATOLOGIA SUAVIZADA-----
tanom <- R[,c(1:dim(R)[3])]-clima_s[,rep(1:365,times=max(ano)-min(ano)+1)]
dim(tanom)
```

Anexo 5. Script del cálculo de las correlaciones cruzadas y fuerzas enlaces de las anomalías de las variables meteorológicas de estudio

```

#SCRIPT_5.CORRELACION CRUZADA Y FUERZA ENLACE
n1=NULL;n2=NULL
for(t in 57:2555)
{
t1=10*t-364
n1=c(n1,t1)
t2=10*t
n2=c(n2,t2)
ejex=tiempo[n2]          #MODIFICADO, CREAR EJE X (TIEMPO)
}
# ----- CORRELACION CRUZADA -----
#for (i in 1:length(n1))
#for (j in 1:dim(posicion)[1])
for (i in 2401:2499){
for (j in 1:dim(posicion)[1])
{
corr=c(abs(ccf(tanom[posicion[j,1],posicion[j,2],n1[i]:n2[i]],
tanom[posicion[j,3],posicion[j,4],n1[i]:n2[i]],
lag.max=200,plot=FALSE)$acf))
estad <- c(max(corr),mean(corr),sd(corr))
ruta <- "E:/pwat/"
nombre=paste(ruta,"corr_",i,"_",j,".txt",sep = "")
write.table(estad,file = nombre,row.names=F,col.names=F)
message(paste(i,j,sep=" "),"\r",appendLF=T)
flush.console()
}
}
#----- IMPORTACION DE LAS CORRELACIONES CRUZADAS -----
#FUERZA ENLACE
#for (i in 1:length(n1))
for (i in 2401:2499){
fe=NULL
for(j in 1:dim(posicion)[1]){
ruta <- "E:/pwat/"
nombre=paste(ruta,"corr_",i,"_",j,".txt",sep = "")
leer=read.csv(file=nombre,header=F)
maximo=leer[1,]
promedio=leer[2,]
desviacion=leer[3,]
fen=(maximo-promedio)/desviacion
fe=c(fe,fe)}
exportar<-paste("E:/fe/", "fe_",i,".txt",sep = "")
write.table(fe,file =exportar,row.names=F,col.names=F)
#message(paste(i,j,sep=" "),"\r",appendLF=T)
#flush.console()
}
# ----- FUERZA ENLACE DESEADA -----
CC<- matrix(NA,nrow=dim(posicion)[1],ncol=length(n1))
for (i in 1:length(n1)){
nombre=paste("C:/Users/DELL.DESKTOP-
VDABKP2/Desktop/Tesis/RESULTADOS/PWAT/cfc/fe_",i,".txt",sep="")
CC[,i]=as.matrix(read.csv(file=nombre,header=F))
}

```

```

}
#Fuerza enlace deseada
S <- apply(CC, 2, mean)
fuerza_enlace <- data.frame(ejex,S)
umbral=2.82
write.csv(fuerza_enlace,file="C:/Users/DELL.DESKTOP-
VDABKP2/Desktop/Tesis/RESULTADOS/PWAT/cfc/fe_pwat.csv")
fuerza_enlace$umbral <- ifelse(fuerza_enlace[,2]>umbral,"alerta","no")
names(fuerza_enlace)<-c("Fecha","Fuerza Enlace","Alerta")
#Importar las fechas con las fuerzas enlaces
fuerza_enlace<-read.csv("C:/Users/DELL.DESKTOP-
VDABKP2/Desktop/Tesis/RESULTADOS/PWAT/cfc/fe_pwat.csv",sep=","header=F)
fuerza_enlace<-fuerza_enlace[(1:dim(fuerza_enlace)[1]),(2:3)]
fuerza_enlace[,1]<-as.Date(fuerza_enlace[,1])
fuerza_enlace[,2]<-as.numeric(fuerza_enlace[,2])
#Buscar el umbral
summary(fuerza_enlace[,2][1:1075])
#Columna Umbral
umbral= ##
fuerza_enlace$umbral <- ifelse(fuerza_enlace[,2]>umbral,"alerta","no")
names(fuerza_enlace)<-c("Fecha","Fuerza Enlace","Alerta")

```

Anexo 6. Script de la validación estadística del pronóstico ENSO "El Niño"

```
#SCRIPT_6.VALIDACION DEL PRONOSTICO
#-----IDENTIFICACION DE EVENTOS NINO-----
#-----INDICE ONI-----
file="C:/Users/DELL.DESKTOP-VDABKP2/Desktop/Tesis/SCRIPTS/input/ONI.txt"
oni=read.csv(file,header=T,sep=",")
#Periodo de rango de anomalias
ano1_oni <- min(which(oni$ANIO==min(ano))) #1950
ano2_oni <- max(which(oni$ANIO==max(ano))) #2017
oni_34 <- oni$ONI[ano1_oni:ano2_oni]
#Extrapolacion diaria de anomalias de la region Nino 3.4 de SST
tamano_34 <- length(oni_34)
anios <- (ano2_oni-ano1_oni+1)/12
dias <- seq(tamano_34/(365*anios),tamano_34,by=tamano_34/(365*anios))
oni_d_34 <- splinefun(x=1:tamano_34,y=c(oni_34))(dias)
oni_extr_34<-data.frame(tiempo,oni_d_34) #datos ONI extrapolados diarios
# -----ANIOS CALIDOS ENSO -----
#ANIOS NINO (FASE CALIDA ENSO)
for (i in 1:dim(oni)[1]){
  if(round(oni$ONI[i],1)>=0.5){
    oni$fase[i]="calido"
  }else if(round(oni$ONI[i],1)<=-0.5){
    oni$fase[i]="fria"
  }else{
    oni$fase[i]="neutro"
  }
}
pos=NULL
for (i in 2:length(which(oni$fase=="calido"))){
  if(which(oni$fase=="calido")[i]-which(oni$fase=="calido")[i-1]>1){
    posicion_calido=which(oni$fase=="calido")[i]
    pos=c(pos,posicion_calido)
  }
}
oni$ENSO[1:dim(oni)[1]]="no nino"
oni$ENSO[18:25]="nino" #Chequear por que no lee esos anios
oni$ENSO[839:843]="nino" #Chequear por que no lee esos anios
for(i in 2:length(pos)){
  a=which(which(oni$fase=="calido")==pos[i])
  if((which(oni$fase=="calido")[a-1]-pos[i-1])>=4){
    oni$ENSO[pos[i-1]:(which(oni$fase=="calido")[a-1])]="nino"
  }
}
#Inicio de un evento Nino
oni$INICIO[1:dim(oni)[1]]="no"
for(i in 2:dim(oni)[1] ){
  if(oni$ENSO[i]=="nino" & oni$ENSO[i-1]=="no nino"){
    oni$INICIO[i]="inicio"
  }
}
fuerza_enlace$ENSO=NA
fuerza_enlace$InicioENSO=NA
for (i in 1:dim(fuerza_enlace)[1]){
  anio_enso<-as.numeric(format(fuerza_enlace$Fecha[i],%Y'))
```

```

mes_enso<-as.numeric(format(fuerza_enlace$Fecha[i], '%m'))
fuerza_enlace$ENSO[i]=oni$ENSO[which(oni$ANIO==anio_enso & oni$MES==mes_enso)]
fuerza_enlace$InicioENSO[i]=oni$INICIO[which(oni$ANIO==anio_enso &
oni$MES==mes_enso)]
}
#Tabla modificada-----
anio_fecha_fe <- as.numeric(format(fuerza_enlace$Fecha, '%Y'))
tabla<-data.frame("anio"=(min(anio_fecha_fe)+1):
max(anio_fecha_fe))
tabla$pronostico=NA
tabla$observado=NA
tabla$categoria=NA
for (i in (min(anio_fecha_fe)+1):
max(anio_fecha_fe))
{
#Pronostico
h<-which(anio_fecha_fe==i-1)
if(length(fuerza_enlace[h,]$Alerta[fuerza_enlace[h,]$Alerta=="alerta"])==0){
tabla$pronostico[i-min(anio_fecha_fe)]= "no" }else{
if(fuerza_enlace[h,][fuerza_enlace[h,]$Alerta=="alerta",][1,]$ENSO=="no nino"){
tabla$pronostico[i-min(anio_fecha_fe)]= "si" }else{
tabla$pronostico[i-min(anio_fecha_fe)]= "no"
}
}
#Observado
k<-which(anio_fecha_fe==i)
if(length(fuerza_enlace[k,]$InicioENSO[fuerza_enlace[k,]$InicioENSO=="inicio"])>0){
tabla$observado[i-min(anio_fecha_fe)]= "si" }else{
tabla$observado[i-min(anio_fecha_fe)]= "no"
}
#Categoria
if(tabla$pronostico[i-min(anio_fecha_fe)]=="si" &
tabla$observado[i-min(anio_fecha_fe)]=="si"){
tabla$categoria[i-min(anio_fecha_fe)]= "a" }
else if(tabla$pronostico[i-min(anio_fecha_fe)]=="si" &
tabla$observado[i-min(anio_fecha_fe)]=="no"){
tabla$categoria[i-min(anio_fecha_fe)]= "b" }
else if(tabla$pronostico[i-min(anio_fecha_fe)]=="no" &
tabla$observado[i-min(anio_fecha_fe)]=="si"){
tabla$categoria[i-min(anio_fecha_fe)]= "c" }
else if(tabla$pronostico[i-min(anio_fecha_fe)]=="no" &
tabla$observado[i-min(anio_fecha_fe)]=="no"){
tabla$categoria[i-min(anio_fecha_fe)]= "d" }
}
aa=length(tabla$categoria[tabla$categoria=="a"])
bb=length(tabla$categoria[tabla$categoria=="b"])
cc=length(tabla$categoria[tabla$categoria=="c"])
dd=length(tabla$categoria[tabla$categoria=="d"])
#Medidas de la tabla de contingencia
#HIT RATE
hit_rate=aa/(aa+cc)
#FALSA ALARMA
falsa_alarma =bb/(bb+dd)

```