



Universidad de Cuenca

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Ambiental

Análisis de las relaciones entre la precipitación, vegetación y el fenómeno ENOS en las subcuenca Machángara y Tomebamba del río Paute

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
Ingeniera Ambiental

AUTORA

Lisseth Mariela Montalván Pérez
C.I. 0104618566

DIRECTOR

Ing. Alex Manuel Avilés Añazco. PhD
C.I. 0102247186

Cuenca-Ecuador
Junio - 2018



RESUMEN

El fenómeno denominado El Niño-Southern Oscillation (ENOS) se relaciona con las variables meteorológicas, especialmente con la precipitación. En este estudio se explora las relaciones entre ENOS, la precipitación y la vegetación de las subcuentas Machángara y Tomebamba, adicionalmente se busca conocer si existe relación entre la precipitación y vegetación. Los datos de este estudio fueron recopilados del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), de imágenes del satélite MODIS y base de datos de índices del fenómeno ENOS. Esta información posee una escala mensual y corresponde al periodo 2000-2015. Se realizaron correlaciones cruzadas entre el fenómeno ENOS, el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) con un retraso máximo de 18 meses. Las relaciones estadísticamente más significativas se presentaron entre el fenómeno ENSO y el SPI, además también se encontraron relaciones entre el SPI y NDVI. En las dos subcuenca la precipitación y vegetación tienen comportamiento similar, sin embargo el número de relaciones que se presentan entre estas variables y el fenómeno ENOS tuvieron su variación. La subcuenca Machángara presento un mayor número de relaciones, a pesar de esto, la relación es similar para las dos subcuenca cuando se presenta un fenómeno El Niño cuando la precipitación disminuye, lo contrario ocurre cuando se presenta un fenómeno La Niña. Este estudio podría ser utilizado como información base para la prevención de los efectos del incremento y disminución de precipitación y para la incorporación de planes de manejo de la vegetación en las dos subcuenca.

Palabras clave: ENSO, SPI, NDVI, correlación cruzada.



ABSTRACT

The phenomenon known as El Niño-Southern Oscillation (ENSO) is related to meteorological variables, especially precipitation. In this study, the relationship between ENSO, precipitation and vegetation of the Machángara and Tomebamba sub-basins is explored. In addition, it seeks to know if there is a relationship between precipitation and vegetation. The data of this study were compiled from the Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), from images of the MODIS satellite and database of indexes of the ENSO phenomenon. This information has a monthly scale and corresponds to the period 2000-2015. Cross correlations were made between the ENSO phenomenon, the Standardized Precipitation Index (SPI) and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) with a maximum delay of 18 months. The most statistically significant relationships were between the ENSO phenomenon and the SPI, and there were also relationships between the SPI and NDVI. In the two sub-basins, precipitation and vegetation have a similar behavior, however the number of relationships between these variables and the ENSO phenomenon varied. The Machángara sub-basin presented a greater number of relationships, in spite of this, the relationship is similar for the two sub-basins when an El Niño phenomenon occurs when precipitation decreases, the opposite occurs when a La Niña phenomenon occurs. This study could be used as basic information for the prevention of the effects of the increase and decrease of precipitation and for the incorporation of vegetation management plans in the two sub-basins.

Keywords: ENSO, SPI, NDVI, cross-correlation.



Contenido

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	12
1.1 Descripción del área de estudio	14
CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS	16
2.1 Caracterizar el comportamiento y tendencia de la precipitación, vegetación y anomalías e índices del fenómeno ENOS mediante series temporales y gráficas	16
2.1.1 Datos precipitación	16
2.1.2 Datos vegetación (NDVI)	19
2.1.3 Datos fenómeno ENOS	20
2.1.4 Método.....	21
2.2 Evaluar el grado de relación de la precipitación y vegetación con el fenómeno ENOS.....	23
2.2.1 Correlación cruzada.....	23
2.3 Caracterizar la dinámica de la precipitación y vegetación durante los eventos El Niño y La Niña, mediante el análisis de series temporales	24
CAPITULO 3: RESULTADOS	25
3.1 Caracterizar el comportamiento y tendencia de la precipitación, vegetación y anomalías e índices del fenómeno ENOS mediante series temporales y gráficas.....	25
3.1.1 Precipitación	25
3.1.2 Vegetación.....	26
3.1.3 SOI.....	28
3.1.4 TNI.....	29
3.1.5 Niño 1+2	30
3.1.6 Niño 3	31
3.1.7 Niño 3.4	33
3.1.8 Niño 4	34
3.1.9 Comparación entre índices y las cuatro regiones de la temperatura superficial del mar.....	35
3.2 Evaluar el grado de relación de la precipitación y vegetación con el fenómeno ENOS.....	39



3.3 Caracterizar la dinámica de la precipitación y vegetación durante los eventos El Niño y La Niña, mediante el análisis de series temporales.	46
3.3.1 Dinámica de precipitación de la subcuenca Tomebamba.....	46
3.3.2 Dinámica de la precipitación de la subcuenca Machángara	48
3.3.3 Dinámica de la vegetación de la subcuenca Tomebamba.....	49
3.3.4 Dinámica de la vegetación de la subcuenca Machángara	49
CAPITULO 4: DISCUSIÓN.....	50
4.1 Comparación entre subcuencas	50
4.2 Comparación con otros estudios	51
CAPITULO 5: CONCLUSIONES.....	53
6. Referencias.....	55

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.Ubicación de las subcuencas en estudio..	15
Figura 2. Regiones de la temperatura superficial del mar.....	20
Figura 3. SPI mensual del 2000 al 2015 de las subcuencas Machángara (Azul) y Tomebamba (Rojo).....	25
Figura 4.Tendencia del índice SPI de la subcuenca Machángara durante el periodo 2000-2015.	26
Figura 5. Tendencia del índice SPI de la subcuenca Tomebamba durante el periodo 2000-2015..	26
Figura 7. Tendencia del índice NDVI de la subcuenca Machángara durante el periodo 2000-2015.	27
Figura 8. Tendencia del índice NDVI de la subcuenca Tomebamba durante el periodo 2000-2015.	28
Figura 9. Índice SOI mensual del periodo 2000-2015.	28
Figura 10. Tendencia del índice SOI durante el periodo 2000-2015.	29
Figura 11. Índice TNI mensual del periodo 2000-2015.....	29
Figura 12. Tendencia del índice TNI durante el periodo 2000-2015.....	30
Figura 13. Anomalías de la región Niño 1+2 mensual del periodo 2000-2015.	30
Figura 14. Tendencia de las anomalías de la región Niño 1+2 durante el periodo 2000-2015.	31



Figura 15. Anomalías de la región Niño 3 mensual del periodo 2000-2015...	32
Figura 16. Tendencia de las anomalías de la región Niño 3.4 durante el periodo 2000-2015.....	33
Figura 17. Anomalías de la región Niño 3.4 mensual del periodo 2000-2015.	33
Figura 18.Tendencia de las anomalías de la región Niño 3.4 durante el periodo 2000-2015.....	34
Figura 19. Anomalías de la región Niño 4 mensual del periodo 2000-2015.Fuente: NOAA.....	34
Figura 20. Tendencia de las anomalías de la región Niño 4 durante el periodo 2000-2015.....	35
Figura 21.Anomalías de las cuatro regiones de la temperatura superficial del mar, periodo 2000-2015.	36
Figura 22. Anomalías de la región Niño 3.4 (Celeste), índice SOI (Gris) e índice TNI (Negro), periodo 2000-2015.	36
Figura 23. Correlaciones de los índices y anomalías relacionadas al fenómeno ENOS con el índice SPI de la subcuenca Tomebamba.	40
Figura 24. Correlaciones de los índices y anomalías relacionadas al fenómeno ENOS con el índice SPI de la subcuenca Machángara.	42
Figura 25.Correlaciones de los índices y anomalías relacionadas al fenómeno ENOS con el índice NDVI de la subcuenca Tomebamba.	44
Figura 26.Correlaciones de los índices y anomalías relacionadas al fenómeno ENOS con el índice NDVI de la subcuenca Machángara.....	45
Figura 27. Correlación entre los índices SPI y NDVI de la subcuenca Tomebamba y Machángara.....	46

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones INAMHI. Realizado por la autora.	16
Tabla 2. Valores del SPI	21
Tabla 3. Clasificación del NDVI.....	21
Tabla 4. Clasificación SOI de según el criterio del Western Regional Climate de la NOAA	22
Tabla 5. Clasificación Niño o Niña de la región Niño 1+2	22



Tabla 6. Clasificación de los eventos del fenómeno ENSO	22
Tabla 7. Resumen del índice SPI de las subcuenca Machángara y Tomebamba del periodo 2000-2015..	26
Tabla 8. Resumen NDVI de las subcuenca Machángara y Tomebamb	27
Tabla 9. Eventos La Niña y El Niño de acuerdo al índice SOI durante el periodo 2000-2015	29
Tabla 10. Eventos La Niña y El Niño de acuerdo al índice TNI durante el periodo 2000-2015.	30
Tabla 11. Eventos La Niña y El Niño de acuerdo a la región Niño 1+2 durante el periodo 2000-2015	31
Tabla 12. Eventos La Niña y El Niño de acuerdo a la región Niño 3 durante el periodo 2000-2015. Realizado por: Autora.....	32
Tabla 13. Eventos La Niña y El Niño de acuerdo a la región Niño 3.4 durante el periodo 2000-2015.	34
Tabla 14. Eventos La Niña y El Niño de acuerdo a la región Niño 4 durante el periodo 2000-2015.	35
Tabla 15. Fenómenos El Niño de acuerdo a los índices SOI y TNI, y las cuatro regiones de la temperatura superficial del mar.....	38
Tabla 16. Fenómenos La Niña de acuerdo a los índices SOI y TNI, y las cuatro regiones de la temperatura superficial del mar.....	39
Tabla 17. Correlaciones significativas de los índices y anomalías relacionadas al fenómeno ENSO con el índice SPI de la subcuenca Tomebamba.....	41
Tabla 18. Correlaciones de los índices y anomalías relacionadas al fenómeno ENSO con el índice SPI de la subcuenca Machángara	43
Tabla 19. Correlaciones significativas de los índices y anomalías relacionadas al fenómeno ENSO con el índice NDVI de la subcuenca Tomebamba.....	45
Tabla 20. Correlaciones significativas de los índices y anomalías relacionadas al fenómeno ENSO con el índice NDVI de la subcuenca Machángara	46
Tabla 21. Correlación significativas entre los índices SPI y NDVI de la subcuenca Tomebamba y Machángara	46



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Lisseth Mariela Montalván Pérez en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “**Análisis de las relaciones entre la precipitación, vegetación y el fenómeno ENOS en las subcuencas Machángara y Tomebamba del río Paute**”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 21 de junio del 2018



A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Lisseth Mariela Montalván Pérez".

Lisseth Mariela Montalván Pérez

0104618566



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Lisseth Mariela Montalván Pérez, autora del trabajo de titulación “**Análisis de las relaciones entre la precipitación, vegetación y el fenómeno ENOS en las subcuenca Machángara y Tomebamba del río Paute**”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 21 de junio del 2018

A handwritten signature in blue ink, which appears to read "Lisseth Montalván Pérez". It is enclosed in a blue oval shape and placed over a horizontal line.

Lisseth Mariela Montalván Pérez

0104618566



DEDICATORIA

A Dios porque en este largo camino académico él siempre me lleno de bendiciones, y me ha dado la fortaleza necesaria para cumplir todos mis objetivos.

A mis padres Ernesto y Cecilia por ser los principales promotores de mis sueños, gracias por siempre desear y anhelar lo mejor para mi vida, por sus consejos, apoyo incondicional y por enseñarme que con esfuerzo y sacrificio se pueden alcanzar las metas que me proponga.

A mi hermano Diego por su apoyo incondicional, sus consejos y por siempre motivarme a ser mejor.

A mi hermana Damaris por su confianza.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, a mis padres y a mis hermanos, quienes han sido la guía y el camino para poder llegar a este punto de mi carrera, que con su ejemplo, dedicación y palabras de aliento nunca bajaron los brazos para que yo tampoco lo haga aun cuando todo se complicaba.

Al Ingeniero Alex Avilés (Director) por su confianza, apoyo, orientación y aporte enriquecedor a esta investigación.

Al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) por los datos de precipitación utilizados para la realización de esta investigación.

A mis amigos y amigas por acompañarme en la travesía de la vida universitaria y apoyo para la culminación de esta meta.



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

El presente trabajo trata sobre la dinámica de la precipitación y la vegetación de las subcuencas Machángara y Tomebamba, además de la relación de estas variables con el fenómeno ENOS. El fenómeno ENOS es el resultado de las interacciones entre el océano y la atmósfera, a lo largo del Pacífico tropical. Este fenómeno tiene una fase cálida (El Niño) y una fase fría (La Niña) (Hanley et al., 2003). El Niño se genera con la presencia de aguas superficiales cálidas traídas desde el Norte por los vientos alisos, se caracteriza por abundantes precipitaciones a lo largo de la costa del Ecuador, Perú y el Pacífico tropical central (Zambrano, 1996), además causa incremento en el nivel del mar y la disminución de la presión atmosférica sobre el Pacífico (McPhaden et al., 2006). La Niña se genera con el enfriamiento de las aguas superficiales del océano, es el fenómeno contrario a El Niño (McPhaden et al., 2006).

Entre diversos métodos de interpretación de la dinámica de la precipitación y vegetación se encuentran los índices: Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) y el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI). El índice SPI es conocido como índice de sequías, para calcular este índice únicamente se utiliza la precipitación mensual, que en este caso fueron datos mensuales de 18 estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca alta del Río Paute y cuencas cercanas. El índice NDVI se obtuvo del paquete MOD13Q1 de las imágenes MODIS, este producto suministra índices de vegetación (NDVI y EVI) que están diseñados para proveer una comparación permanente y consistente de los cambios temporales y espaciales de la vegetación al responder a la cantidad de radiación fotosintéticamente activa en determinado pixel, al contenido de clorofila, área foliar y a las características estructurales de las plantas (Mas, 2011).

El índice NDVI es un indicador derivado de los índices espectrales que describen la cantidad de radiación fotosintética activa absorbida por las plantas. La cantidad de radiación es medida por instrumentos radiométricos. Este índice se obtiene a partir de la reflectancia de las bandas Roja e Infrarroja (Tucker, 1978). Si la vegetación está sometida a algún estrés, por ejemplo a la sequía, la reflectancia será inferior en el infrarrojo cercano y mayor en la banda Roja, con lo que el contraste entre ambas bandas será mucho menor (Chuvieco, 1995).

Para analizar la problemática que genera el fenómeno ENOS, se ha estudiado este fenómeno desde 1924 (Curtis, 2008) hasta la actualidad. Esto con la finalidad de comprender su dinámica y sus efectos sobre las variables hidrológicas, es así que este estudio busca apoyar este fin, ya que los efectos



de ENOS como las sequias e inundaciones son un problema social, económico y ambiental. Además de que las subcuencas en estudio se encuentran en la cuenca alta del Río Paute, esta cuenca abastece de agua a la ciudad de Cuenca y otras poblaciones aledañas, y también suministra la materia prima para la hidroeléctrica Paute (Mora & Willems, 2011), por lo cual durante las sequias se disminuye el abastecimiento de agua a las comunidades aledañas principalmente a la ciudad de Cuenca y la producción de energía eléctrica, así también se presentan problemas ambientales como la erosión del suelo y la perdida de vegetación. Mientras que las inundaciones tienen consecuencias como la pérdida de vidas humanas y cultivos, daños en las diferentes estructuras, problemas de salud, pérdidas económicas y erosión del suelo (Vacca et al., 1994).

Un aspecto muy importante dentro de la problemática de los efectos del fenómeno ENSO es la disminución de la precipitación y esta a su vez genera perdida de vegetación, la cual es vital dentro de las cuencas hídricas debido a que cumple funciones como mantener el equilibrio hídrico, controlar la calidad de agua (FAO, 2002) y tiene la capacidad de regular la lluvia, proveyendo de agua a ríos y acuíferos, con la pérdida o disminución de la vegetación estas funciones se verían afectadas y como principales perjudicados los habitantes de la zona y la población cuencana.

En el aspecto social la población es muy afectada por estas variaciones climáticas ya que con las inundaciones o sequias tienen perdidas económicas, y esto se debe a que no cuentan con el conocimiento necesario sobre estos eventos para implementar planes de mitigación o acciones de adaptación.

Este estudio se realiza con el interés de conocer la relación entre el fenómeno ENOS, la precipitación y vegetación de las subcuencas del río Tomebamba y Machángara, cuyos resultados podrían ayudar principalmente a los pobladores de la zona y a las autoridades locales y nacionales en la toma de decisiones, y así prevenir y mitigar las consecuencias de las inundaciones y sequías reduciendo las pérdidas económicas. Además permitiría planificar la generación de hidroenergía y tomar precauciones en el abastecimiento de agua de la ciudad de Cuenca y de las poblaciones aledañas. Otro aporte que se quiere obtener en este estudio es aumentar el conocimiento sobre la relación del fenómeno ENOS con la vegetación, con lo cual se podrían tomar medidas preventivas o correctivas que atenúen los efectos de la pérdida o disminución de la misma o de sus funciones.

En este estudio se plantearon 3 objetivos específicos:

1. Caracterizar el comportamiento y tendencia de la precipitación, vegetación y anomalías e índices del fenómeno ENOS



2. Evaluar el grado de relación de la precipitación y vegetación con el fenómeno ENOS
3. Caracterizar la dinámica de la precipitación y vegetación durante los eventos El Niño y La Niña.

1.1 Descripción del área de estudio

La subcuenca Machángara se ubica en las provincias del Azuay y Cañar, tiene una extensión de 325 Km² (Carchi, 2015). La subcuenca Tomebamba se ubica en la provincia del Azuay, tiene una extensión de 338 km² (Vallejo, 2014). Estas dos subcuencas forman parte de las Andes Ecuatorianos al igual que de la cuenca alta del Río Paute (Figura 1), por lo cual tienen características hidrológicas y geográficas propias de la zona (Galarza, 2016) tales como el clima, el cual se divide en dos pisos climáticos: frío andino y templado interandino, los cuales se caracterizan por tener bajas temperaturas, torrentes aguaceros, neblinas espesas y lloviznas, además de vientos fuertes y aire seco, cálido durante las épocas secas (Pesántez, 2015). En cuanto a vegetación las dos subcuencas se caracterizan principalmente por estar formado de paramo y bosque andino, siendo estos reguladores hídricos naturales de gran importancia (Galarza, 2016; Vallejo, 2014).

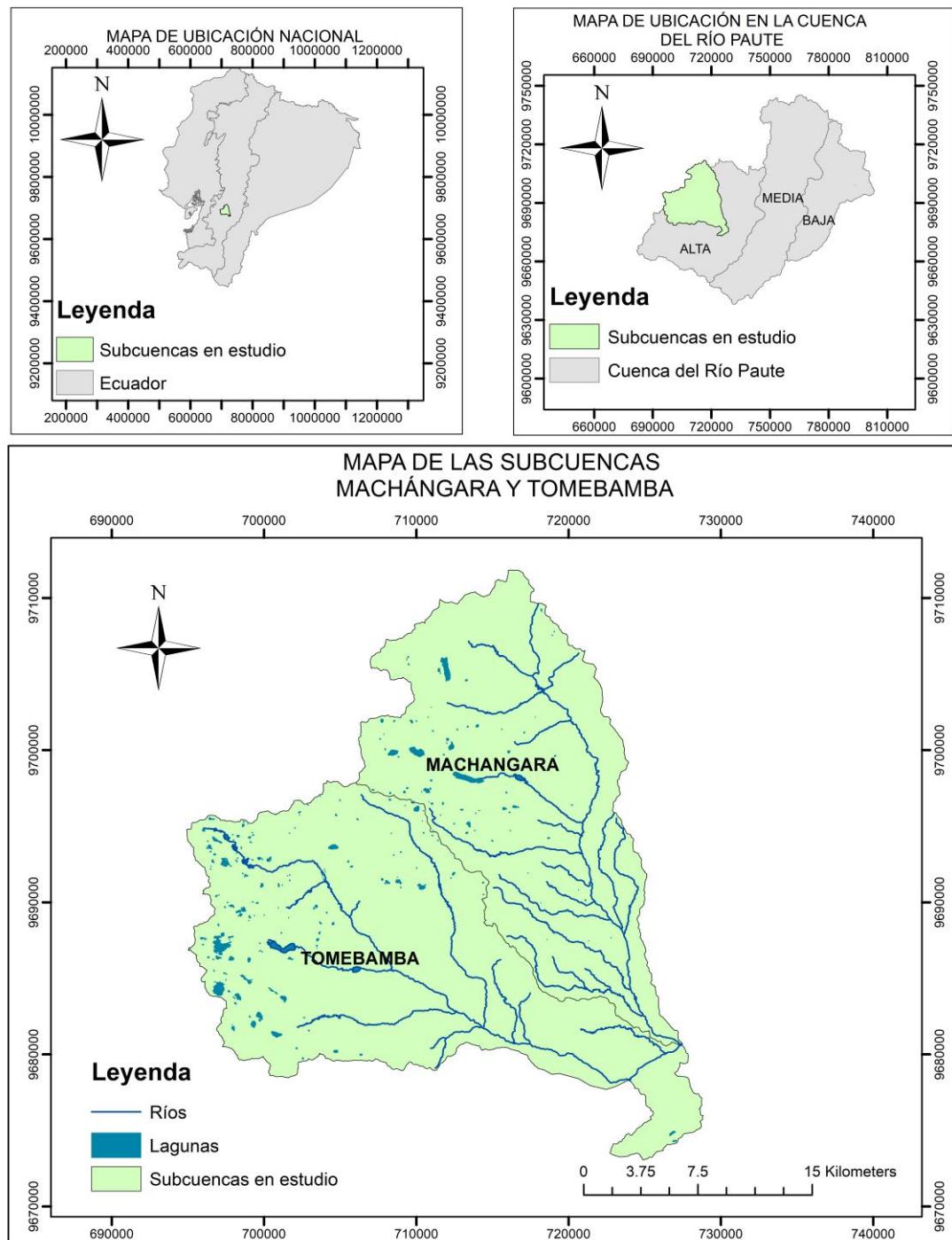


Figura 1. Ubicación de las subcuencas en estudio. Modificación cartográfica: Autora.

CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Caracterizar el comportamiento y tendencia de la precipitación, vegetación y anomalías e índices del fenómeno ENOS mediante series temporales y gráficas

2.1.1 Datos precipitación

Para la generación de los resultados se ha utilizado datos de imágenes satelitales, de estaciones pluviométricas, además de anomalías e índices relacionados con el fenómeno ENOS. Los datos de precipitación con una resolución temporal mensual, fueron proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). En este estudio se utilizó los datos de 18 estaciones del INAMHI (Tabla 1) de las cuales 5 están dentro de las subcuenca en estudio, El Labrado y Chanlud en la subcuenca Machángara; Piscicola Chirimichay, Sayausi y Surucucho en la subcuenca Tomebamaba.

CODIGO	NOMBRE	X	Y
M0031	Cañar	728463	9717749.1
M0045	Palmas	763533.6	9699527.4
M0141	El Labrado	714218.9	9697771.8
M0189	Gualaquiza	769162.9	9623751.3
M0410	Rio Mazar	761307.6	9715296
M0411	Ingapirca	736313.9	9719149.7
M0412	Pamba	715253.6	9727876.8
M0414	Chanin	747535.6	9704105.4
M0417	Piscicola Chirimichay	703183.6	9693181.2
M0419	Giron	705706.4	9650169.6
M0420	Nabon	714809.6	9630706.4
M0422	Lucia-Camino Rircay	693726.8	9689908.7
M0427	Sayausi	713854.9	9683057.1
M0429	Surucucho	707684.4	9687460.3
M0431	Sevilla	760455.2	9689792.2
M0477	Puerto Inca	661889.3	9720235.6
M0481	Ushcurrumi	657392.6	9632800.6
M1111	Chanlud	718577.1	9703594.8

Tabla 1. Estaciones INAMHI.

Los datos de precipitación fueron revisados y completados por promedio mensual, ya que los datos faltantes corresponden a un porcentaje mínimo. Todas las estaciones se utilizaron para calcular el índice estándar de precipitación (SPI), con lo cual se procedió a generar mapas de precipitación mensuales mediante el método de interpolación geo-estadístico Kriging (FAO, 2003). Posteriormente se realizó el recorte



para cada subcuenca, y la extracción de la serie de tiempo correspondiente a cada subcuenca.

Descripción del Índice de Precipitación Estandarizado o Normalizado (SPI, standardized precipitation index)

SPI es un índice que se basa únicamente en la precipitación, pero es considerado como un índice de sequía, ya que este permite cuantificar las anomalías en la disponibilidad del agua. Este índice utiliza series mensuales de precipitación, las cuales deben ser ajustadas o transformadas a una función de probabilidad gamma, para posteriormente ser normalizada (Giner et al, 2012; López, 2013). La distribución gamma se define por su función de densidad de probabilidad (Paredes et al., 2008):

$$G(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}$$

Ecuación 1.

Donde $x > 0$, x es la variable (precipitación); $\beta > 0$, β es un parámetro de escala; $\alpha > 0$, α es un parámetro de forma de la curva, $\Gamma(\alpha)$ es la función gamma, la misma que se define como:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy$$

Ecuación 2.

Los parámetros α y β de la función de densidad de probabilidad gamma se calcula para 1, 3, 6, 9, etc. meses de acuerdo al interés que se tenga, para lo cual se utiliza la aproximación de Thom (1958):

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right)$$

Ecuación 3.

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha}$$

Ecuación 4.

En donde n es el número de observaciones y A igual a:

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n}$$

Ecuación 5.

Los parámetros obtenidos se utilizan para encontrar la probabilidad acumulada de un evento de precipitación para un mes o más.

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx$$

Ecuación 6.



La probabilidad acumulada para valores nulos de la precipitación se convierte en:

$$H(x) = u + (1 - u)G(x)$$

Ecuación 7.

Donde u es la probabilidad de que ocurra una precipitación de cero, $(1-u)$ es la probabilidad de que ocurra precipitación nula. La probabilidad acumulada $H(x)$, se transforma en probabilidad normalizada acumulada Z (media cero y varianza uno), la cual es representada el valor del índice SPI. Los valores Z se calculan mediante aproximaciones:

$$Z = SPI = - \left(k - \frac{c_0 + c_1 k + c_2 k^2}{1 + d_1 k + d_2 k^2 + d_3 k^3} \right) \quad \text{Para } 0 < H(x) \leq 0.5$$

Ecuación 8.

$$Z = SPI = + \left(k - \frac{c_0 + c_1 k + c_2 k^2}{1 + d_1 k + d_2 k^2 + d_3 k^3} \right) \quad \text{Para } 0.5 < H(x) < 1$$

Ecuación 9.

Donde:

$$k = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{(H(x))^2} \right]} \quad \text{Para } 0 < H(x) \leq 0.5$$

Ecuación 10.

$$k = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{(1-H(x))^2} \right]} \quad \text{Para } 0.5 < H(x) < 1$$

Ecuación 11.

Los valores de las constantes c y d según la aproximación de Abramowitz & Stegun (1965) son:

c_0	2.515517
c_1	0.802853
c_2	0.010328
d_1	1.432788
d_2	0.189269
d_3	0.001308

El valor medio del índice SPI es cero, valores positivos son los mayores a la mediana y los valores negativos son menores a la mediana.

Descripción del método de interpolación Kriging

Teniendo mediciones de una variable en varios puntos de la zona de estudio se puede realizar una interpolación para estimar valores en puntos intermedios, la precisión de esta estimación depende de factores como la cantidad de mediciones realizadas, la calidad de estas mediciones y la ubicación de las mediciones dentro de la zona de estudio. Para realizar la estimación de puntos intermedios se puede utilizar el método



Kriging simple, ordinario o universal. De acuerdo a los datos disponibles se utiliza en este estudio el método Kriging ordinario (Giraldo, 2002).

El método kriging ordinario establece que se puede estimar un valor como la combinación lineal de las mediciones realizadas:

$$Z^*(x_0) = \lambda_1 Z(x_1) + \lambda_2 Z(x_2) + \lambda_3 Z(x_3) + \dots + \lambda_n Z(x_n)$$

Ecuación 12.

Donde:

$Z^*(x_0)$ = Valor a estimar

$Z(x_i)$ =Valor medido en el punto 1

λ = Peso del valor medido en función de la distancia al valor a estimar.

La suma de los pesos es igual a 1, para mantener la propiedad de insesgamiento (el promedio de los estadísticos es igual al valor medido (Juste et al, 2012)).

2.1.2 Datos vegetación (NDVI)

Para la descripción de la vegetación se utiliza el índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI), el mismo que para este estudio fue calculado mediante imágenes satelitales MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) del satélite Terra. Las imágenes se descargaron de la página oficial de la NASA (<https://modis.gsfc.nasa.gov/>) mediante R, 365 imágenes del producto MOD13Q1 en una serie temporal de 16 años (del 18/02/2000 al 30/12/2015) con resolución espacial de 250 m y resolución temporal de 16 días. Las imágenes MODIS se descargan con formato HDF (Hierarchical Data Format) el mismo que se debe cambiar a formato GEOTIFF para trabajar en R, este cambio de formato se lo realiza en el programa HEGTool de la NASA (<https://newsroom.gsfc.nasa.gov/sdptoolkit/HEG>). Las imágenes de formato GEOTIFF se cargaron al programa R donde se promedió las imágenes de forma mensual, teniendo 191 imágenes, luego se recortan de acuerdo a las subcuencas. Ya recortadas las imágenes se extrae la serie temporal mensual de cada subcuenca.

Descripción del índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI)

El índice de vegetación NDVI es un índice que describe la cantidad de vegetación existente en un lugar por medio de cuanta radiación es absorbida para realizar la fotosíntesis, este se obtiene de la diferencia de la luz visible absorbida por la clorofila (banda roja) y la luz reflejada por la estructura celular (banda infrarrojo cercano), este índice se calcula con la siguiente formula (Mendoza, 2013; Weier & Herring, 2000):

$$NDVI = \frac{Banda\ IRN - Banda\ R}{Banda\ IRN + Banda\ R}$$

Ecuación 13.

Donde:

Banda IRN corresponde a la banda Infrarrojo cercano

Banda R corresponde a la banda Rojo

Este índice se encuentra calculado en la banda uno de las imágenes MODIS en el producto MOD13Q1 (MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250 m SIN Grid V005), el mismo que tiene un rango que va desde -1 a 1, además de tener una resolución espacial de 250 metros y una resolución espacial radiométrica de 16 bits (Cordova, 2012; Cuya, 2016; Mendoza, 2013; NOAA, 2017). Los valores cercanos a 1 indican que la vegetación está saludable y es muy densa, por el contrario valores de 0.1 y menores indican poca vegetación, vegetación degradada o superficies de agua o impermeables (Cordova, 2012).

2.1.3 Datos fenómeno ENOS

Del fenómeno ENOS se utilizan los índices SOI (Índice de Oscilación del Sur) y el TNI (Índice de la evolución de El Niño), y las anomalías de la temperatura superficial del mar dividida en cuatro regiones: Niño 1+2, Niño 3, Niño 3.4 y Niño 4, estos datos fueron descargados de la página NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) (NOAA, 2017).

- *Índice de Oscilación del Sur (SOI)*

Este índice se obtiene de la diferencia de presión atmosférica estandarizada entre la isla Tahití (punto representativo de la parte oriental-centro del Pacífico Tropical) y Darwin (punto representativo de la parte occidental del Pacífico Tropical).

- *Índice de la evolución de El Niño (TNI)*

Este índice se obtiene de la diferencia de anomalías entre la región Niño 1+2 y Niño 4 (Trenberth et al, 2002).

- *Temperatura superficial del mar (TSM)*

TSM es un indicador basado en la dinámica térmica de la superficie de los océanos, ubicado en la franja tropical del Pacífico (Roldán, 2012), dividido en cuatro regiones, Figura 2 (Davinson et al, 2016):

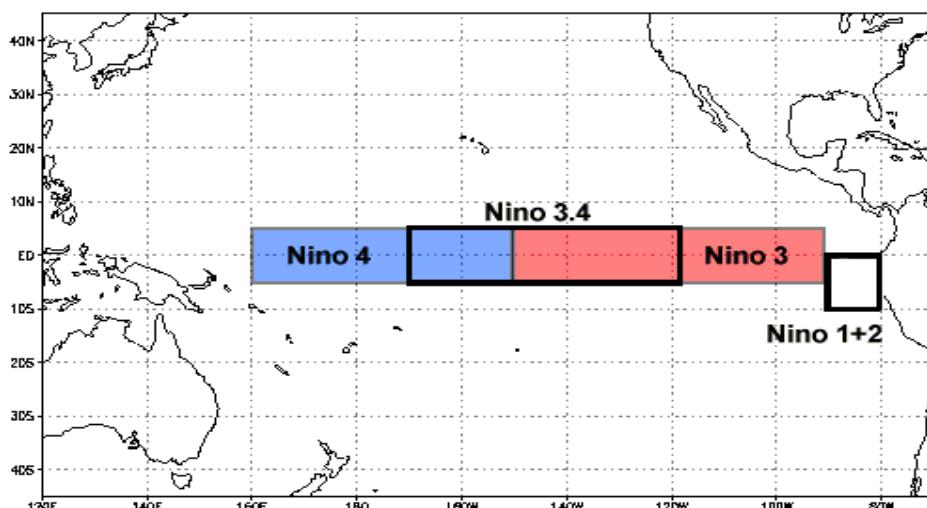


Figura 2. Regiones de la temperatura superficial del mar. Fuente: National Centers for Environmental Information (NCEI), 2018.

- Niño 1+2: Región oriental, al inicio del fenómeno presenta una variación significativa de la temperatura.
- Niño 3: Región central, presenta la variación más alta de la temperatura sobre El Niño.
- Niño 3.4: Región centro occidental, presenta gran variabilidad de temperatura sobre El Niño relacionado al desplazamiento de la lluvia sobre el Pacífico occidental.
- Niño 4: Región occidental, su incremento de temperatura representa la producción de lluvias.

2.1.4 Método

Los datos se convierten en series de tiempo al ser datos mensuales consecutivos, por lo cual se analizaran mediante gráficas para identificar su comportamiento y tendencia. Para caracterizar la precipitación se utiliza el índice SPI, para la vegetación se utiliza el índice NDVI y para el fenómeno ENOS utilizaremos los índices SOI y TNI, y las anomalías de las regiones Niño 1+2, 3, 3.4 y Niño 4 con sus respectivos rangos de clasificación.

El índice SPI se categoriza de la siguiente manera:

SPI	SUELO
2,0 y más	Extremadamente húmedo
1,5 a 1,99	Muy húmedo
1,0 a 1,49	Modernamente húmedo
-0,99 a 0,99	Normal
-1,0 a -1,49	Moderadamente seco
-1,5 a -1,99	Severamente seco
-2 y menor	Extremadamente seco

Tabla 2. Valores del SPI. Fuente: (OMM, 2012)

Para clasificar la vegetación utilizaremos los rangos propuestos por Hilari (Tabla 3) en su trabajo “Identificación y análisis multitemporal de cuatro bofedales en el altiplano norte del Departamento de la Paz”, (Hilari, 2010).

NDVI	COBERTURA
-1 a -0.5	Cuerpos de agua, nubes, nieve
-0.5 a 0	Suelo desnudo sin cobertura
0 a 0.1	Valor crítico de la vegetación
0.1 a 0.3	Vegetación escasa
0.3 a 0.5	Vegetación moderada
0.5 a 1	Vegetación sana y vigorosa

Tabla 3. Clasificación del NDVI. Fuente: Hilari, 2010.

Para describir el fenómeno ENOS en sus fase fría (Niño) o cálida (Niña) de acuerdo al índice SOI se consideran sus anomalías, un valor SOI igual o superior a 0.5 indica un

evento de La Niña, mientras un valor igual o menor a -0.5 indica un evento El Niño (Jiménez, 2011; Roldán, 2012). Para este estudio se considera un evento Niña o Niño cuando las anomalías se mantengan por al menos 5 meses. De acuerdo a la intensidad del evento se puede clasificar en Niño o Niña intensa, Niño o Niña moderada y Normal, Tabla 4.

Intensidad del evento	SOI	Clasificación evento
Fuertemente negativo	≤ -1.00	El Niño intenso
Moderadamente negativo	≤ -0.50	El Niño moderado
Normal	-0.50 a 0.50	Normal
Moderadamente positivo	≥ 0.50	La Niña moderada
Fuertemente positivo	≥ 1.00	La Niña intensa

Tabla 4. Clasificación SOI de según el criterio del Western Regional Climate de la NOAA. Fuente: Jiménez, 2011.

Según el índice TNI los eventos se clasifican Niño cuando hay una sucesión mínima de 6 meses con valores de TNI positivos, iguales o mayores a 0.4, y para una Niña los valores de TNI deben ser iguales o menores a -0.4 por al menos 6 meses consecutivos (Loyo, 2015).

La región Niño 1+2 y Niño 3.4 son las más estudiadas, por lo cual estas regiones tienen un rango de clasificación de acuerdo a su intensidad, Tabla 5 y 6 respectivamente. La región Niño 1+2 describe un evento La Niña con anomalías iguales o menores a -0.8, y El Niño con anomalías iguales o mayores a 0.3, por un mínimo de 3 meses consecutivos (Trasmonte & Silva, 2008). La región Niño 3.4, es utilizada para el cálculo del índice ONI, el cual describe un evento La Niña cuando las anomalías son iguales o menores a -0.5 y El Niño cuando las anomalías son iguales o mayores a 0.5, por un periodo mínimo de 5 meses (NOAA, 2017).

Anomalía Niño 1+2	Intensidad
-0.8 a -0.99	Niña débil
-1.0 a -1.39	Niña moderada
-1.4 a -2.3	Niña fuerte
≥ 0.3	Niño

Tabla 5. Clasificación Niño o Niña de la región Niño 1+2. Fuente: Trasmonte & Silva, 2008.

Anomalía Niño 3.4	Intensidad
Anomalía 0.5 a 0.9 o -0.5 a -0.9	Evento débil
Anomalía 1.0 a 1.4 o -1.0 a -1.4	Evento moderado
Anomalía 1.5 a 1.9 o -1.5 a -1.9	Evento fuerte
Anomalía ≥ 2 o ≤ -2	Evento muy fuerte

Tabla 6. Clasificación de los eventos del fenómeno ENOS. Fuente: NOAA.

Para este estudio las anomalías de la región Niño 3 y Niño 4 se clasificarán de igual manera que la región Niño 3.4 (Tabla 6).



2.2 Evaluar el grado de relación de la precipitación y vegetación con el fenómeno ENOS.

2.2.1 Correlación cruzada

La correlación cruzada permite correlacionar series temporales en tiempo simultáneo y con desfase de tiempo, ya que al tratarse de variables climáticas estas generalmente no presentan una relación simultánea, sino una variable influye sobre otra pero en un tiempo posterior. Para realizar el cálculo de la correlación cruzada primero se realiza la prueba de estacionariedad, ya que es necesario que la serie de tiempo tenga estabilidad estadística a través del tiempo, por lo cual debe ser estacionaria (Guevara, 2014). La prueba de estacionalidad se realizó utilizando la prueba KPSS (Kwiatkowski et al, 1992) y la prueba de raíz unitaria ADF (Dickey & Fuller, 1981).

- *Serie temporal estacionaria*

Una serie temporal es una secuencia de datos u observaciones, ordenadas y equidistantes de acuerdo a una variable (Mauricio, 2007), en el caso de este estudio la serie se ordena de acuerdo a la fecha y con un mes de distancia entre cada dato. Para que una serie temporal sea estacionaria debe cumplir ciertas condiciones como: no presentar un cambio sistemático en la media, lo cual se refleja en la ausencia de tendencias, al igual que no haya cambio en la varianza.

- *Descripción de la prueba Dickey Fuller aumentado (ADF)*

Es una prueba que utiliza la raíz unitaria contrastando la hipótesis nula de raíz unitaria con la hipótesis alternativa de estacionariedad (Alviar et al, 2006; Glen, 2017). Al ser una prueba estadística se utiliza el valor de p para su interpretación, este valor describe la probabilidad de ocurrencia de la hipótesis nula en un 95%, y un 5% de probabilidad de que se rechace esta hipótesis y se acepte la hipótesis alternativa (Econterms, 2017), por lo cual si la prueba ADF da un valor menor a 0.05 la serie es estacionaria.

- *Descripción de la prueba Kwiatkowski–Phillips–Schmidt–Shin (KPSS)*

Esta prueba describe si una serie temporal es estacionaria, basándose en la regresión lineal, para la ejecución de esta prueba se plantea como hipótesis nula la estacionariedad (Glen, 2017), interpretándose mediante el valor de p , el mismo que debe ser mayor a 0.05 para que la hipótesis nula sea aceptada y la serie de tiempo se considere estacionaria.

- *Proceso para convertir una serie no estacionaria en estacionaria*

Las series que no son estacionarias deben ser convertidas en estacionarias, para lo cual se usa un proceso de diferenciación. El cual comprende en realizar una resta entre los datos de la serie de tiempo, el cual dependiendo de la escala temporal puede ser mensual, trimestral o anual, para este estudio se utiliza escala mensual, realizándose una resta mes a mes (Arnaud Gras, 1981):

$$\nabla x_{t+1} = x_{t+1} - x_t$$

Ecuación 14.



Donde:

X_{t+1} = es el mes siguiente (mes $x+1$)

X_t = es el mes inicial (mes x)

- *Significancia de la correlación cruzada*

Las gráficas de correlación cruzada presentan una línea entrecortada la cual representa un 95% de significancia, aceptándose como correlaciones estadísticamente significativas únicamente a aquellas que superen los umbrales de esta línea, el valor de esta línea se calcula mediante un procedimiento empírico, en el cual el valor absoluto de la correlación debe ser mayor que a

$$\frac{1.96}{\sqrt{n - |k|}}$$

Ecuación 15.

Dónde: n es el número de observaciones y k es el desfase (Guevara, 2014).

2.3 Caracterizar la dinámica de la precipitación y vegetación durante los eventos El Niño y La Niña, mediante el análisis de series temporales

Mediante el análisis grafico de las series temporales, se caracteriza la dinámica de los índices SPI y NDVI de cada subcuenca, durante los meses de relación con los eventos El Niño y La Niña según los índices SPI, TNI y anomalías de las regiones de la temperatura superficial del mar.

CAPITULO 3: RESULTADOS

3.1 Caracterizar el comportamiento y tendencia de la precipitación, vegetación y anomalías e índices del fenómeno ENOS mediante series temporales y gráficas.

3.1.1 Precipitación

La precipitación está representada por el índice SPI. En las dos subcuenca en estudio el índice SPI es similar, Figura 3. En la subcuenca Tomebamba se presentan picos más pronunciados entre el 2008 y 2009.

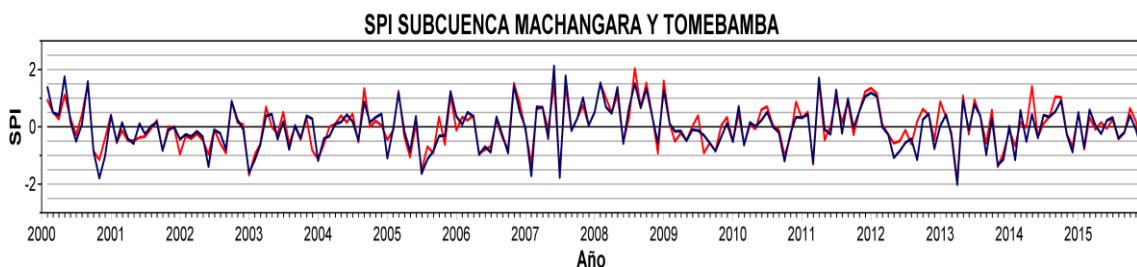


Figura 3. SPI mensual del 2000 al 2015 de las subcuenca Machángara (Azul) y Tomebamba (Rojo).
Fuente: INAMHI. Realizado por: Autora.

Los meses extremadamente húmedos para cada subcuenca no coinciden en la fecha de ocurrencia, en la subcuenca Machángara se da en junio del 2007, mientras que en la subcuenca Tomebamba se da un año más tarde en agosto. El número de meses muy húmedos si coinciden (Tabla 7), aunque las fechas difieren, siendo iguales únicamente cuatro de ellas, septiembre del 2000, febrero y agosto del 2008, y abril del 2011. Los meses moderadamente húmedos son más numerosos, especialmente en la subcuenca Tomebamba. Coinciendo en fecha solo siete, marzo del 2005, diciembre del 2005, mayo del 2008, julio del 2011, diciembre del 2011, enero y febrero del 2012.

Los meses secos fueron mayores en la subcuenca Machángara al compararla con la subcuenca Tomebamba, incluyendo un mes extremadamente seco (abril del 2013), rango al cual no llegan los valores de SPI de la subcuenca Tomebamba. Los meses severamente secos son pocos, coincidiendo en fecha solo dos de ellos, noviembre del 2000 y febrero del 2007. Los meses moderadamente secos son mayores en la subcuenca Machángara, a pesar de ello, solo 4 coinciden en fecha, enero del 2004, octubre del 2010, marzo del 2011 y noviembre del 2013.

Clasificación	Machángara	Tomebamba
Extremadamente húmedo	1	1
Muy húmedo	6	6
Modernamente húmedo	12	16
Normal	153	157
Moderadamente seco	13	7
Severamente seco	5	4
Extremadamente seco	1	0

Tabla 7. Resumen del índice SPI de las subcuenca Machángara y Tomebamba del periodo 2000-2015.
Realizado por: Autora.

De acuerdo a las series de tiempo y la línea de tendencia del índice SPI, este tiene tendencia nula en la subcuenca Machángara (Figura 4), lo cual indica que la precipitación no ha tenido variaciones significativas y se mantiene dentro de sus rangos habituales. Mientras en la subcuenca Tomebamba la tendencia del índice SPI es creciente (Figura 5), lo cual indica que en el periodo de estudio en esta subcuenca la precipitación ha incrementado.

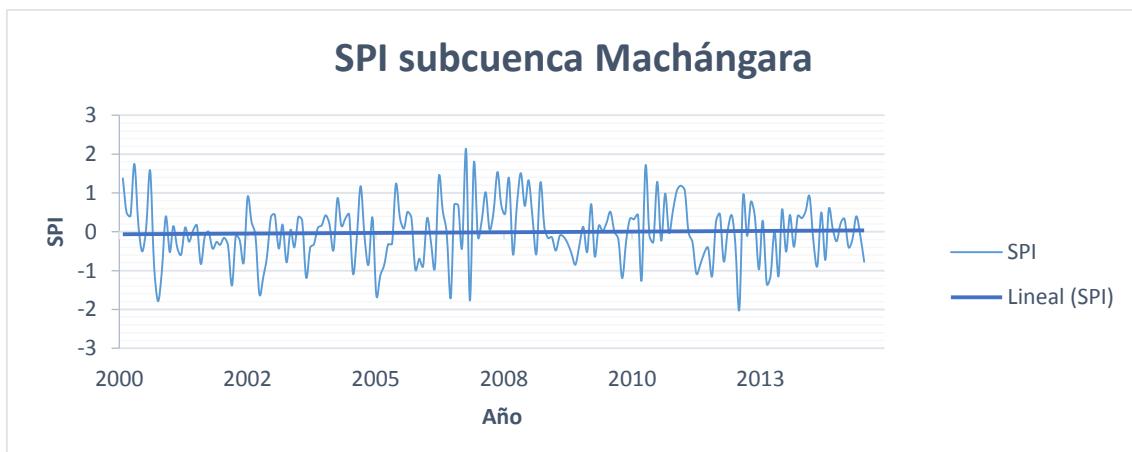


Figura 4. Tendencia del índice SPI de la subcuenca Machángara durante el periodo 2000-2015. Realizado por: Autora.

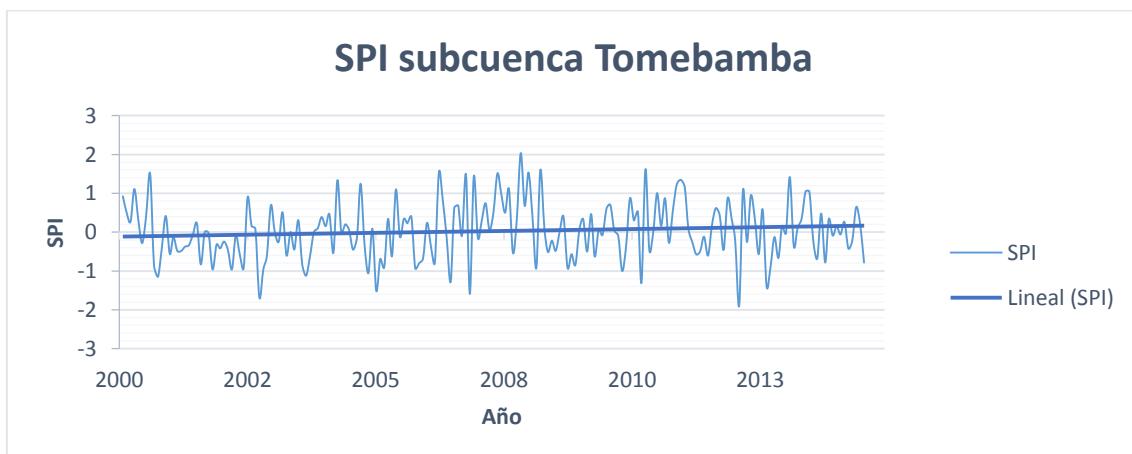


Figura 5. Tendencia del índice SPI de la subcuenca Tomebamba durante el periodo 2000-2015.
Realizado por: Autora.

3.1.2 Vegetación

El índice NDVI en las dos subcuenca es similar, ya que estas subcuenca están juntas y forman parte de la cuenca alta del Río Paute, su vegetación es prácticamente igual por las condiciones topográficas y climáticas. De acuerdo a la Figura 6, una variación significativa se da en los primeros meses del 2013, donde el índice NDVI de la subcuenca Tomebamba se incrementa.

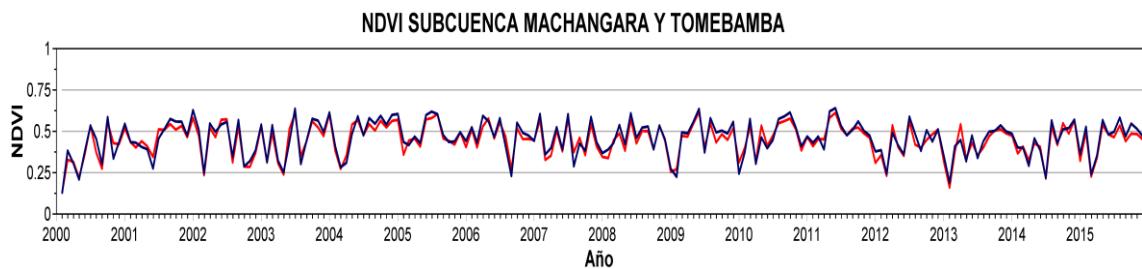


Figura 6. NDVI mensual del 2000 al 2015 de las subcuenca Machángara (Azul) y Tomebamba (Rojo).

Fuente: MOD13Q1. Realizado por: Autora.

En las subcuenca en estudio el índice NDVI refleja que la vegetación es moderada la mayor parte de meses entre el 2000 y 2015, seguida de sana y vigorosa, y con menor número de meses con vegetación escasa, sin llegar a valores críticos ni suelo desnudo.

COBERTURA	Machángara	Tomebamba
Cuerpos de agua, nubes, nieve	0	0
Suelo desnudo sin cobertura	0	0
Valor crítico de la vegetación	0	0
Vegetación escasa	20	15
Vegetación moderada	101	111
Vegetación sana y vigorosa	70	65

Tabla 8. Resumen NDVI de las subcuenca Machángara y Tomebamba. Realizado por: Autora.

El índice NDVI de la subcuenca Machángara y Tomebamba tiene tendencia nula de acuerdo a la Figura 7 y 8 respectivamente, lo cual indica que la vegetación se ha mantenido constante durante el periodo de estudio, además se mantiene en valores superiores a 0.2, lo cual indica que son subcuenca con buena vegetación.

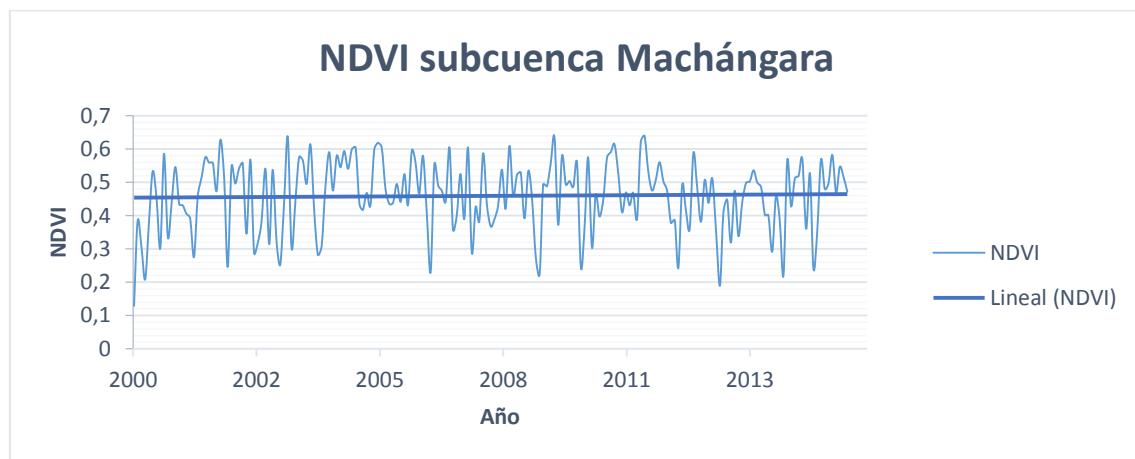
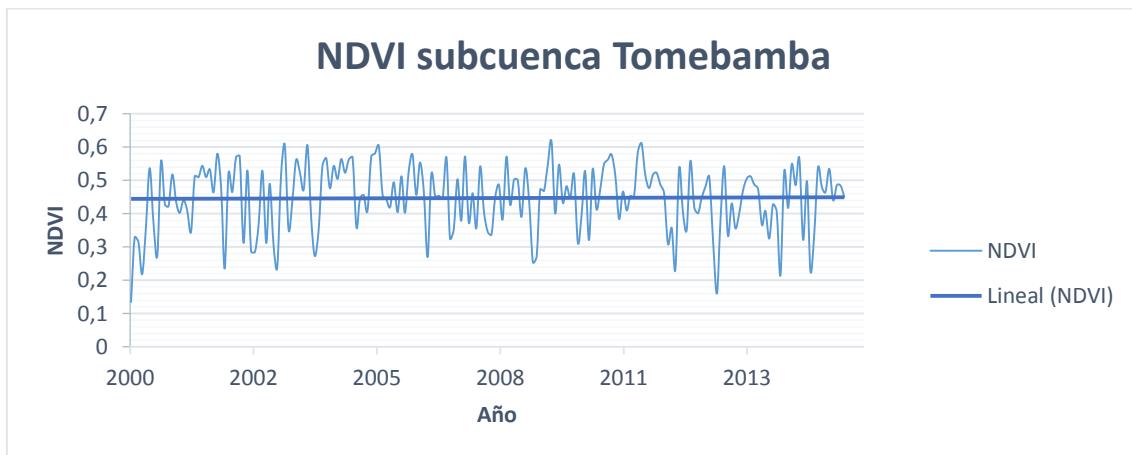


Figura 6. Tendencia del índice NDVI de la subcuenca Machángara durante el periodo 2000-2015.

Realizado por: Autora.



*Figura 7. Tendencia del índice NDVI de la subcuenca Tomebamba durante el periodo 2000-2015.
Realizado por: Autora.*

3.1.3 SOI

La serie temporal del índice SOI tiene eventos sobre lo normal (La Niña) y eventos bajo lo normal (El Niño), así también su intensidad y duración es variante como se observa en la Figura 9.

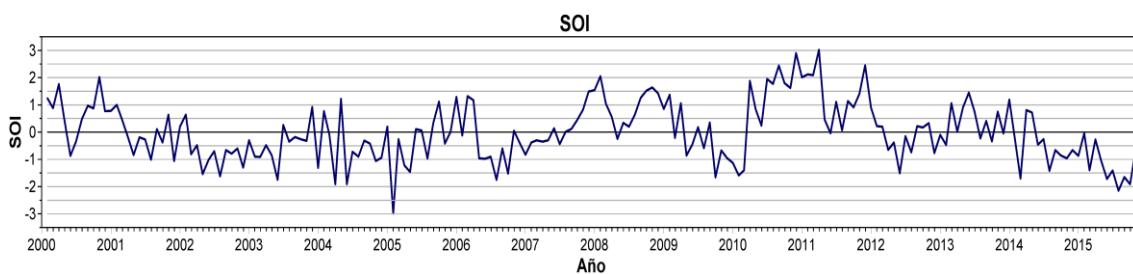


Figura 8. Índice SOI mensual del período 2000-2015. Fuente: NOAA. Realizado por: Autora.

Con el índice SOI se tiene igual número de eventos La Niña y El Niño durante el período de estudio, generalmente se dan dos eventos La Niña, seguidos de dos eventos El Niño, la duración máxima de los eventos es de 10 meses y la mínima de 5 meses, teniendo mayor número de eventos intensos, únicamente 3 eventos fueron moderados, Tabla 9.

EVENTO	INICIO	FINAL	DURACION	CLASIFICACIÓN
Niña	Sep-00	Feb-01	6 meses	Niña moderada
Niño	May-02	Dic-02	8 meses	Niño intenso
Niño	May-06	Oct-06	6 meses	Niño moderado
Niña	Nov-07	Abr-08	6 meses	Niña intensa
Niña	Ago-08	Feb-09	7 meses	Niña intensa
Niño	Oct-09	Mar-10	6 meses	Niño intenso
Niña	Jul-10	Abr-11	10 meses	Niña intensa
Niña	Sep-11	Ene-12	5 meses	Niña intensa
Niño	Ago-14	Ene-15	6 meses	Niño moderado
Niño	May-15	Dic-15	8 meses	Niño intenso

Tabla 9. Eventos La Niña y El Niño de acuerdo al índice SOI durante el periodo 2000-2015. Realizado por: Autora.

El índice SOI tiene tendencia nula (Figura 10), lo cual indica que este índice se mantiene constante dentro de su rango de variación habitual durante el periodo de estudio.

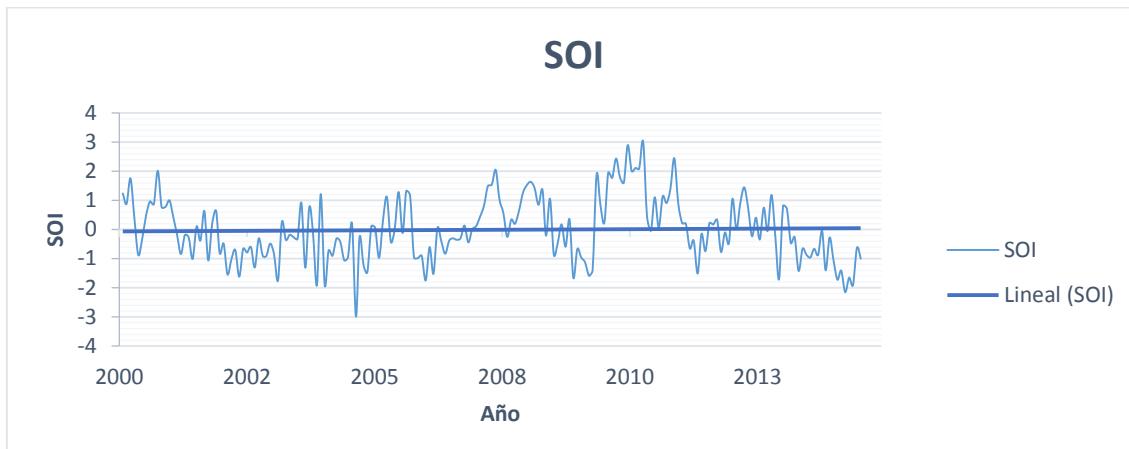


Figura 9. Tendencia del índice SOI durante el periodo 2000-2015. Realizado por: Autora.

3.1.4 TNI

El índice TNI tiene eventos largos, como se puede observar en la Figura 11, las anomalías negativas son eventos La Niña y las anomalías positivas son eventos El Niño, manteniéndose durante periodos más largos en anomalías negativas que en positivas, así también el número de eventos La Niña son mayores a los eventos El Niño.

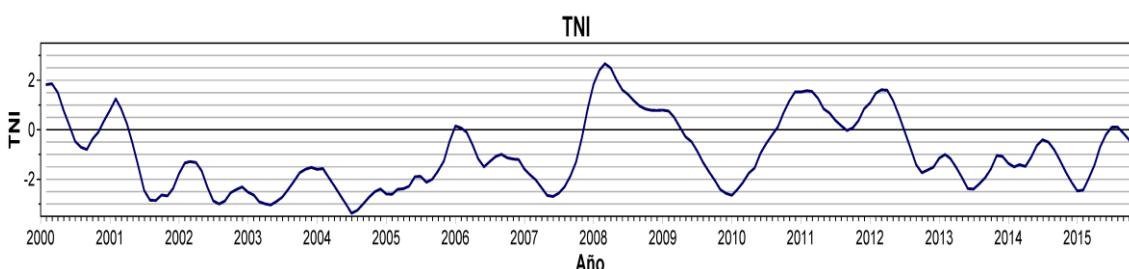


Figura 10. Índice TNI mensual del periodo 2000-2015. Fuente: NOAA. Realizado por: Autora.

Los eventos La Niña que se presentan durante el periodo de estudio son cuatro, mientras El Niño son tres, Tabla 10. La Niña de mayo del 2001 a diciembre del 2005 es el más largo con duración de 56 meses de acuerdo al índice TNI, seguido de La Niña de agosto del 2012 a mayo del 2015 con duración de 34 meses. El Niño de diciembre del 2007 a marzo del 2009 es el más largo con duración de 16 meses.

EVENTO	INICIO	FINAL	DURACION
Niña	May-01	Dic-05	56 meses
Niña	Abr-06	Oct-07	19 meses
Niño	Dic-07	Mar-09	16 meses

Niña	Jun-09	Jul-10	14 meses
Niño	Oct-10	Jun-11	9 meses
Niño	Dic-11	Jun-12	7 meses
Niña	Ago-12	May-15	34 meses

Tabla 10. Eventos La Niña y El Niño de acuerdo al índice TNI durante el periodo 2000-2015. Realizado por: Autora.

De acuerdo a la Figura 12, el índice TNI tiene tendencia creciente, aún que se mantiene en las anomalías negativas pero en los últimos años del periodo de estudio su tendencia ha sido ir hacia las anomalías positivas, esto ya que los eventos La Niña han reducido su duración y sus valores no sobrepasan la anomalía -2.5, como se daba en los primeros años cuando las anomalías alcanzaban valores de -3.4.

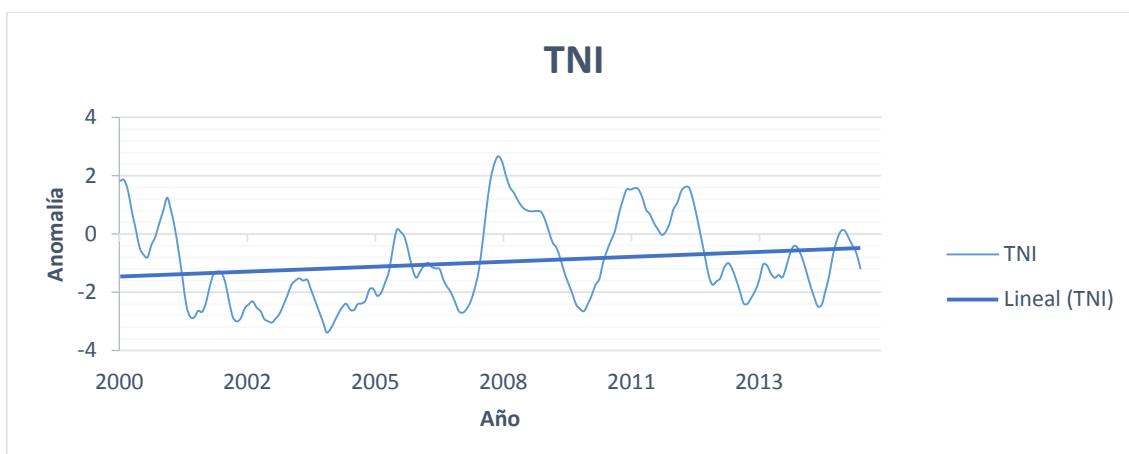


Figura 11. Tendencia del índice TNI durante el periodo 2000-2015. Realizado por: Autora.

3.1.5 Niño 1+2

La región Niño 1+2 es la más cercana a la costa ecuatorial, presenta un comportamiento variante (Figura 13), con anomalías pronunciadas mayormente en la fase fría (La Niña), y un pico pronunciado al final del periodo de estudio, fase cálida, lo cual indica que se presentó un Niño fuerte en estos últimos meses.

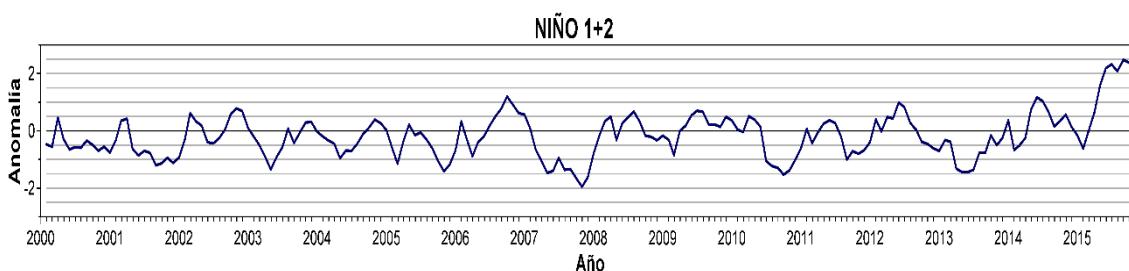


Figura 12. Anomalías de la región Niño 1+2 mensual del periodo 2000-2015. Fuente: NOAA. Realizado por: Autora.

Durante el periodo de estudio 2000-2015 en la región Niño 1+2 se presentaron seis fenómenos La Niña y siete fenómenos El Niño. La Niña tiene una duración máxima de 10 meses, y una duración mínima de 3 meses, El Niño tiene una duración máxima de 9 meses y una duración mínima de 3 meses. La Niña de acuerdo a su intensidad

presento un fenómeno débil, tres moderados y dos fuertes, Tabla 11. Los fenómenos El Niño no tienen clasificación según su intensidad de acuerdo a la referencia bibliográfica utilizada en este estudio.

EVENTO	INICIO	FINAL	DURACION	CLASIFICACIÓN
Niña	Sep-01	Ene-02	5 meses	Niña moderada
Niño	Oct-02	Dic-02	3 meses	Niño
Niña	Abr-03	Jun-03	3 meses	Niña débil
Niña	Oct-05	Dic-05	3 meses	Niña moderada
Niño	Ago-06	Ene-07	6 meses	Niño
Niña	Abr-07	Ene-08	10 meses	Niña fuerte
Niño	Jul-08	Sep-08	3 meses	Niño
Niño	Jun-09	Ago-09	3 meses	Niño
Niña	Jul-10	Dic-10	6 meses	Niña moderada
Niño	Abr-12	Jul-12	4 meses	Niño
Niña	Abr-13	Jul-13	4 meses	Niña fuerte
Niño	May-14	Ago-14	4 meses	Niño
Niño	Abr-15	Dic-15	9 meses	Niño

Tabla 11. Eventos La Niña y El Niño de acuerdo a la región Niño 1+2 durante el periodo 2000-2015.

Realizado por: Autora.

En la región Niño 1+2 las anomalías tienen tendencia creciente (Figura 14), lo cual indica un ligero incremento en las anomalías positivas, lo cual sería igual a un incremento en la temperatura en esta región del mar, evidenciándose principalmente en el número de fenómenos El Niño que se han presentado en los últimos años de este estudio.

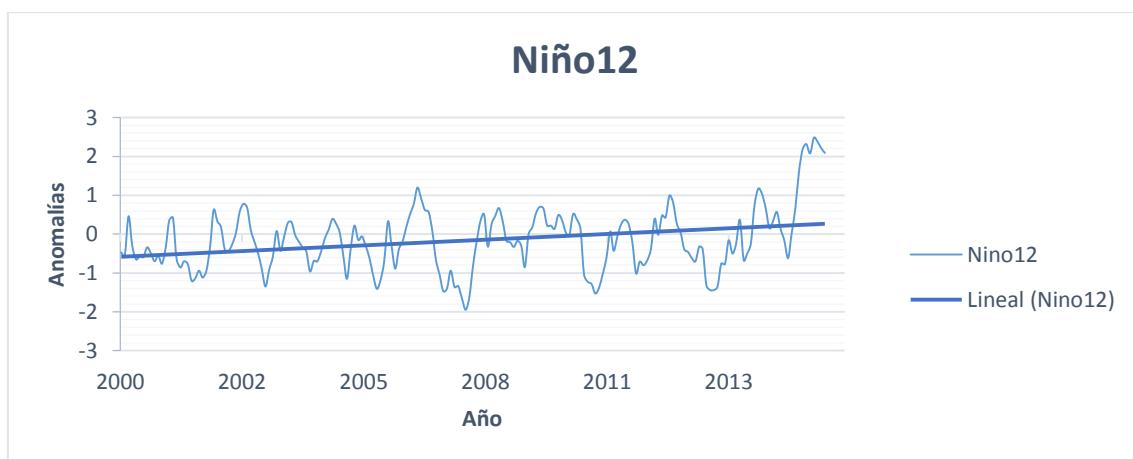


Figura 13. Tendencia de las anomalías de la región Niño 1+2 durante el periodo 2000-2015. Realizado por: Autora.

3.1.6 Niño 3

La región Niño 3 presenta anomalías con picos generalmente no muy marcados. Los fenómenos La Niña se diferencian en las anomalías negativas, estas no alcanzan valores inferiores a -2. Los fenómenos El Niño se diferencian en las anomalías

positivas, estas por lo general no superan el valor 1.5, únicamente lo supera al final de este estudio alcanzando un valor superior a 2.5, Figura 15.

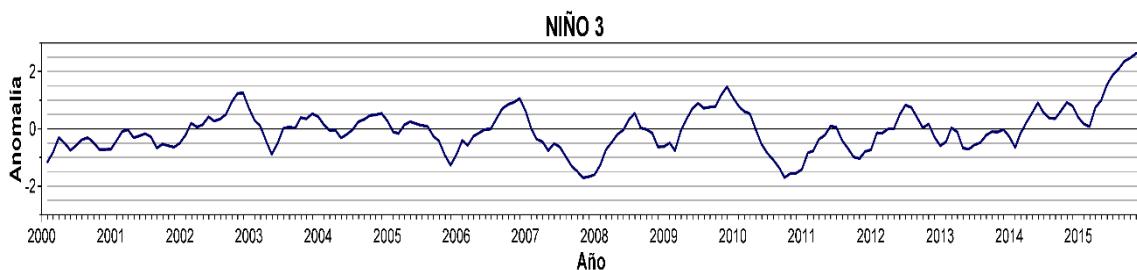


Figura 14. Anomalías de la región Niño 3 mensual del periodo 2000-2015. Fuente: NOAA. Realizado por: Autora.

En la región Niño 3 los fenómenos El Niño y La Niña se presentaron en igual número durante el periodo de estudio, cuatro fenómenos de cada uno, La Niña con una duración máxima de 13 meses y una duración mínima de 5 meses, El Niño con una duración máxima de 11 meses y una duración mínima de 5 meses. De acuerdo a la intensidad La Niña presento dos fenómenos débiles y dos fuertes, mientras El Niño presento tres fenómenos débiles y un fenómeno fuerte, Tabla 12.

EVENTO	INICIO	FINAL	DURACION	CLASIFICACIÓN
Niña	Sep-01	Ene-02	5 meses	Niña débil
Niño	Sep-02	Ene-03	5 meses	Niño débil
Niño	Sep-06	Ene-07	5 meses	Niño débil
Niña	Abr-07	Abr-08	13 meses	Niña fuerte
Niño	Jun-09	Abr-10	11 meses	Niño débil
Niña	Jun-10	Mar-11	10 meses	Niña fuerte
Niña	Sep-11	Ene-12	5 meses	Niña débil
Niño	Abr-15	Dic-15	9 meses	Niño fuerte

Tabla 12. Eventos La Niña y El Niño de acuerdo a la región Niño 3 durante el periodo 2000-2015.
Realizado por: Autora.

Las anomalías de la región Niño 3 durante el periodo de estudio presenta tendencia creciente (Figura 16), lo cual indica un ligero incremento en las anomalías positivas.

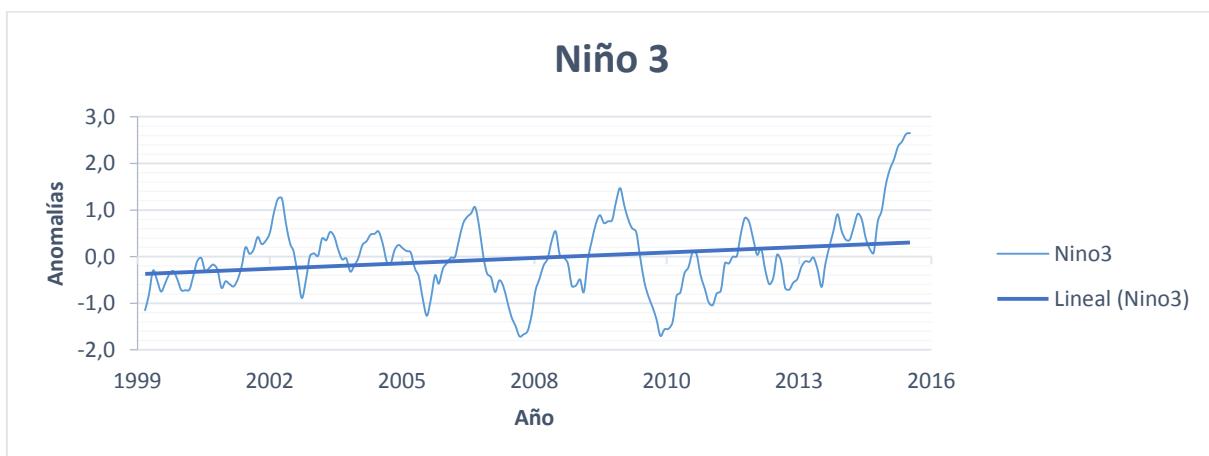


Figura 15. Tendencia de las anomalías de la región Niño 3.4 durante el periodo 2000-2015. Realizado por: Autora.

3.1.7 Niño 3.4

La región Niño 3.4 presenta picos pronunciados en las anomalías positivas y negativas (Figura 17), siendo las anomalías negativas más pronunciadas en los años 2008 y 2011, y las anomalías positivas en los años 2010 y 2015.

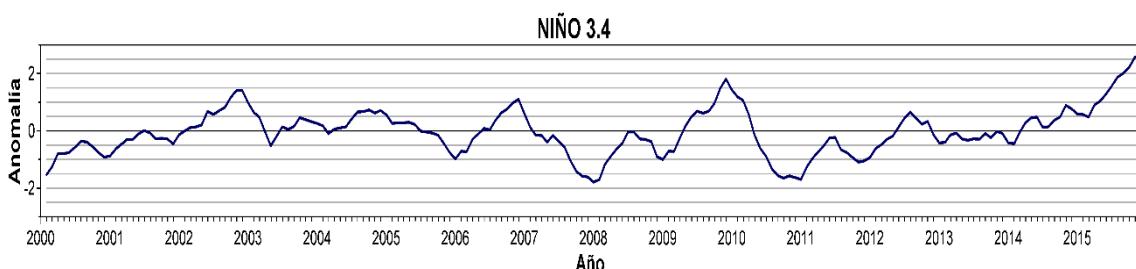


Figura 16. Anomalías de la región Niño 3.4 mensual del periodo 2000-2015. Fuente: NOAA. Realizado por: Autora.

En la región Niño 3.4 se presentaron cinco fenómenos La Niña y cinco fenómenos El Niño, con una duración máxima de 12 y 11 meses respectivamente, y una duración mínima de 6 y 5 meses respectivamente. En esta región las anomalías presentaron un comportamiento semejante en todos los fenómenos, las anomalías iniciaron débiles, luego se incrementaron a moderadas y finalmente alcanzaron la intensidad fuerte y muy fuerte en el caso de El Niño de octubre del 2014 a diciembre del 2015. La Niña en los primeros años de estudio fue débil, luego fue fuerte y en su último fenómeno fue débil, mientras El Niño inicio débil, luego fuerte y al final del estudio alcanzo la intensidad máxima de muy fuerte, Tabla 12.

EVENTO	INICIO	FINAL	DURACION	CLASIFICACIÓN
Niña	Feb-00	Jul-00	6 meses	Niña débil
Niña	Oct-00	Mar-01	6 meses	Niña débil
Niño	Jun-02	Mar-03	10 meses	Niño débil
Niño	Ago-04	Ene-05	6 meses	Niño débil
Niño	Sep-06	Ene-07	5 meses	Niño débil

Niña	Ago-07	May-08	10 meses	Niña fuerte
Niño	Jun-09	Abr-10	11 meses	Niño moderada
Niña	Jun-10	May-11	12 meses	Niña fuerte
Niña	Ago-11	Mar-12	8 meses	Niña débil
Niño	Oct-14	Dic-15	15 meses	Niño muy fuerte

Tabla 13. Eventos La Niña y El Niño de acuerdo a la región Niño 3.4 durante el periodo 2000-2015.
Realizado por: Autora.

En la región Niño 3.4 las anomalías presentan una mínima tendencia creciente, lo cual indica un incremento en las anomalías positivas, especialmente al final del periodo de estudio, Figura 18.

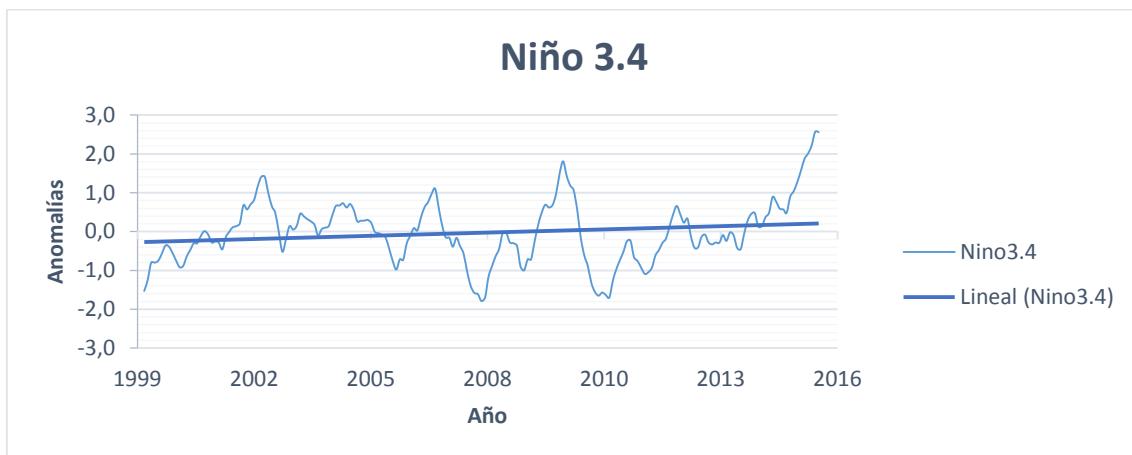


Figura 17. Tendencia de las anomalías de la región Niño 3.4 durante el periodo 2000-2015. Realizado por:
Autora.

3.1.8 Niño 4

En la región Niño 4 las anomalías no presentan picos marcados, La Niña se presenta con anomalías negativas, las mismas que no tienen valores inferiores a -2, mientras El Niño se presenta con anomalías positivas, las mismas que no superan el valor 2, Figura 19.

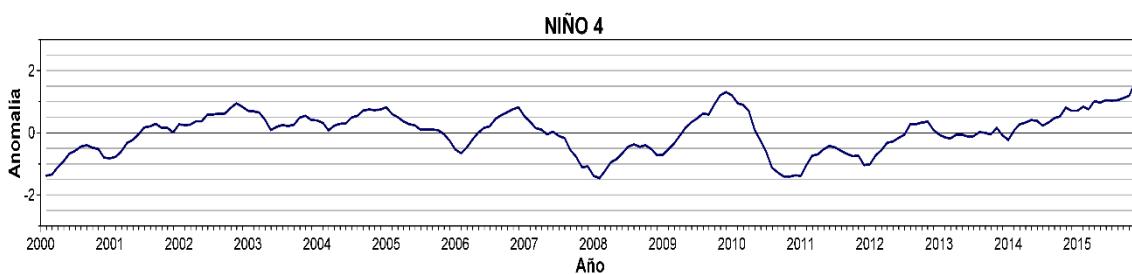


Figura 18. Anomalías de la región Niño 4 mensual del periodo 2000-2015. Fuente: NOAA. Realizado por:
Autora.

Durante el periodo de estudio se dan diez fenómenos ENOS, de los cuales cinco son La Niña y cinco El Niño, La Niña con una duración máxima de 11 meses y una duración mínima de 6 meses, y El Niño con una duración máxima de 16 meses y una duración mínima de 6 meses. De acuerdo a la intensidad de los fenómenos se

presentaron dos Niñas débiles, tres Niñas moderadas, tres Niños débiles y dos Niños moderados, Tabla 14.

EVENTO	INICIO	FINAL	DURACION	CLASIFICACIÓN
Niña	Feb-00	Jul-00	6 meses	Niña moderada
Niña	Oct-00	Mar-01	6 meses	Niña débil
Niño	Jun-02	Mar-03	10 meses	Niño débil
Niño	Jul-04	Mar-05	9 meses	Niño débil
Niño	Ago-06	Ene-07	6 meses	Niño débil
Niña	Sep-07	Jul-08	11 meses	Niña moderada
Niño	Jul-09	Abr-10	10 meses	Niño moderado
Niña	Jul-10	May-11	10 meses	Niña moderado
Niña	Jul-11	Mar-12	9 meses	Niña débil
Niño	Sep-14	Dic-15	16 meses	Niño moderado

Tabla 14. Eventos La Niña y El Niño de acuerdo a la región Niño 4 durante el periodo 2000-2015.
Realizado por: Autora.

Las anomalías de la región Niño 4 tienen una ligera tendencia creciente (Figura 20), indicando un pequeño incremento en las anomalías positivas, especialmente al final del periodo de estudio.

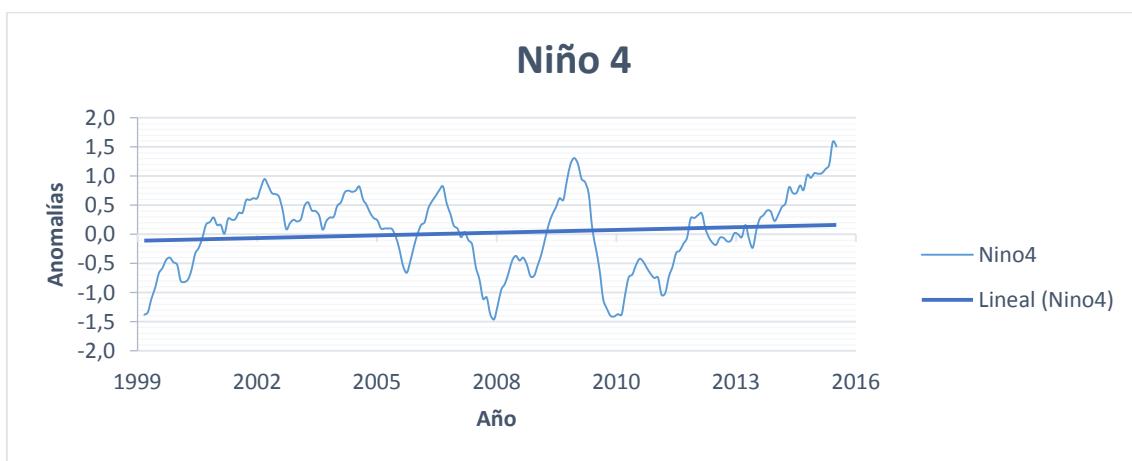


Figura 19. Tendencia de las anomalías de la región Niño 4 durante el periodo 2000-2015. Realizado por: Autora.

3.1.9 Comparación entre índices y las cuatro regiones de la temperatura superficial del mar

La comparativa de índices ENOS demuestra coincidencia para las cuatro regiones de la temperatura superficial del mar analizado, como se puede observar en la figura 21. Los fenómenos no se presentan en las cuatro regiones en las mismas fechas, varían entre 1 y 4 meses, su duración tampoco es la misma. El fenómeno La Niña más largo

(13 meses) se presenta en la región Niño 3 y el fenómeno El Niño más largo (16 meses) se presenta en la región Niño 4.

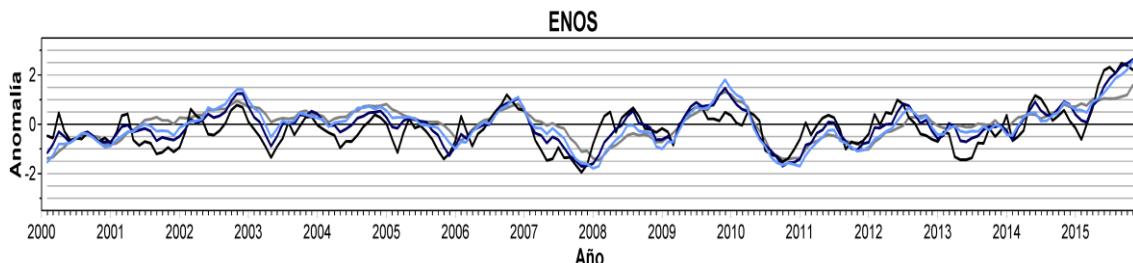


Figura 20. Anomalías de las cuatro regiones de la temperatura superficial del mar, periodo 2000-2015. Niño 1+2 (Negro), Niño 3 (Azul), Niño 3.4 (Celeste), Niño4 (Gris). Fuente: NOAA. Realizado por: Autora.

Los fenómenos ENOS tienen una variación más significativa entre los índices SOI y TNI, y las anomalías de las regiones de la temperatura superficial del mar (Figura 22), representada este último por la región Niño 3.4, ya que esta región es la más utilizada, especialmente para el cálculo del índice ONI. El índice TNI presenta los fenómenos más largos. La región Niño 3.4 y el índice SOI se contraponen, ya que en la región Niño 3.4 el fenómeno El Niño se presenta cuando las anomalías positivas sobrepasan el umbral de lo normal y en el índice SOI el fenómeno El Niño se presenta cuando las anomalías negativas sobrepasan el umbral de lo normal. El índice SOI y las anomalías de la región Niño 3.4 coinciden en 3 fenómenos El Niño (Tabla 15) y 3 fenómenos La Niña (Tabla 16). Cuando en el índice SOI y en las cuatro regiones se presenta un fenómeno La Niña, en el índice TNI se presenta un fenómeno El Niño y viceversa.

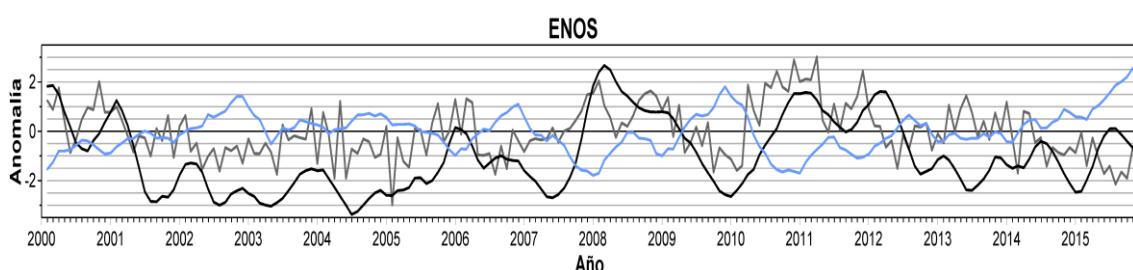


Figura 21. Anomalías de la región Niño 3.4 (Celeste), índice SOI (Gris) e índice TNI (Negro), periodo 2000-2015. Fuente: NOAA. Realizado por: Autora.

Niño 2002-2003, este fenómeno se presenta en el índice SOI y las cuatro regiones de temperatura superficial del mar, en el índice SOI se presenta más temprano (mayo 2002), seguido de la región Niño 1+2 donde se presenta a partir de octubre del 2002, luego se presenta en las regiones Niño 3.4 y Niño 4 a partir de junio 2002 y finalmente se presenta en la región Niño 3 a partir de septiembre del mismo año. En el índice SOI y la región Niño 1+2 finaliza en diciembre del 2002, en las regiones Niño 3.4 y Niño 4 finaliza en marzo del 2003 y en la región Niño 3 finaliza en enero del 2003.

Niño 2004-2005, este fenómeno se presenta en las regiones Niño 3.4 y Niño 4. En la región Niño 3.4 es más corto, dura 6 meses e inicia en agosto del 2004 y finaliza en enero del 2005. En la región Niño 4 dura 9 meses, inicia en julio del 2004 y finaliza en marzo del 2005.



Niño 2006-2007. Este fenómeno se presenta en las cuatro regiones de la temperatura superficial del mar, en las regiones Niño 1+2 y Niño 4 se presenta a partir de agosto del 2006, mientras que en las regiones Niño 3 y Niño 3.4 se presenta a partir de septiembre del mismo año. En las cuatro regiones este fenómeno finaliza en enero del 2007.

Niño 2009-2010. Este fenómeno se presenta en las cuatro regiones de la temperatura superficial del mar y el índice SOI, en las regiones Niño 1+2, Niño 3 y Niño 3 se presenta a partir de junio del 2009 y en la región Niño 4 se presenta a partir de junio del mismo año. Más tarde se presenta en el índice SOI (octubre del mismo año). En la región Niño 1+2 dura 3 meses, finalizando en agosto del 2009, en las regiones Niño 3, Niño 3.4 y Niño 4 finaliza en abril del 2010, y en el índice SOI dura 6 meses, finalizando en marzo del 2010.

Niño 2014-2015. Este fenómeno se presenta en las cuatro regiones y el índice SOI. En las regiones Niño 3.4 y Niño 4 se presenta unos meses antes que en las otras dos regiones, en septiembre y agosto del 2014 respectivamente, en las regiones Niño 1+2 y Niño 3 se presenta a partir de abril del 2015, y en el índice SOI se presenta a partir de mayo del 2015. En este estudio se considera que este fenómeno finaliza en diciembre del 2015, ya que el periodo de estudio es hasta diciembre del 2015, por lo cual no se conoce si los eventos duran más allá de esta fecha.

	EVENTO	INICIO	FINAL	DURACION
SOI	Niño	may-02	dic-02	8 meses
	Niño	may-06	oct-06	6 meses
	Niño	oct-09	mar-10	6 meses
	Niño	ago-14	ene-15	6 meses
	Niño	may-15	dic-15	8 meses
TNI	Niño	dic-07	mar-09	16 meses
	Niño	oct-10	jun-11	9 meses
	Niño	dic-11	jun-12	7 meses
Niño 1+2	Niño	oct-02	dic-02	3 meses
	Niño	ago-06	ene-07	6 meses
	Niño	jul-08	sep-08	3 meses
	Niño	jun-09	ago-09	3 meses
	Niño	abr-12	jul-12	4 meses
	Niño	may-14	ago-14	4 meses
	Niño	abr-15	dic-15	9 meses
Niño 3	Niño	sep-02	ene-03	5 meses
	Niño	sep-06	ene-07	5 meses
	Niño	jun-09	abr-10	11 meses
	Niño	abr-15	dic-15	9 meses
Niño 3.4	Niño	jun-02	mar-03	10 meses
	Niño	ago-04	ene-05	6 meses
	Niño	sep-06	ene-07	5 meses



	Niño	jun-09	abr-10	11 meses
	Niño	oct-14	dic-15	15 meses
Niño 4	Niño	jun-02	mar-03	10 meses
	Niño	jul-04	mar-05	9 meses
	Niño	ago-06	ene-07	6 meses
	Niño	jul-09	abr-10	10 meses
	Niño	sep-14	dic-15	16 meses

Tabla 15. Fenómenos El Niño de acuerdo a los índices SOI y TNI, y las cuatro regiones de la temperatura superficial del mar.

Niña 2000. En las regiones Niño 3.4 y Niño 4 se presenta el fenómeno La Niña, para la cual se considera su fecha de inicio en febrero del 2000, siendo la misma fecha de inicio de este estudio, y finaliza en julio del mismo año en las dos regiones.

Niña 2000-2001. Este fenómeno se presenta en las regiones Niño 3.4 y Niño 4, y en el índice SOI. En las dos regiones inicia y finaliza en la misma fecha (octubre del 2000 a marzo del 2001), y en el índice SOI se presenta un mes antes, finalizando de igual manera un mes antes.

Niña 2001-2002. Este fenómeno se presenta en las regiones Niño 1+2 y Niño 3, inicia y finaliza en la misma fecha, septiembre del 2001 a enero del 2002.

Niña 2007-2008. Este fenómeno se presenta en las cuatro regiones y el índice SOI. En las regiones Niño 1+2 y Niño 3 se presenta a partir de abril del 2007, cuatro meses después se presenta en la región Niño 3.4 (agosto 2007) , en la región Niño 4 se presenta un mes después de la región Niño 3.4 y en el índice SOI se presenta a partir de noviembre del 2007. La duración de este fenómeno es variada, en la región Niño 1+2 dura 10 meses, finaliza en enero del 2008. En la región Niño 3 dura 13 meses y finaliza en abril del 2008. En la región Niño 3.4 dura 10 meses y finaliza en mayo del 2008 y en la región Niño 4 dura 11 meses, finalizando en julio del 2008. En el índice SOI dura 6 meses, finalizando en abril del 2008.

Niña 2010-2011. Este fenómeno se presenta en las cuatro regiones y el índice SOI. En la región Niño 3 y Niño 3.4 inicia en junio del 2010, mientras que en las regiones Niño 1+2 y Niño 4, y el índice SOI inicia un mes después. Al ser de duración variada, finalizan en fechas diferentes, en la región Niño 1+2 finaliza en diciembre del 2010, luego de 6 meses de duración. En la región Niño 3 finaliza en marzo del 2011, luego de 10 meses de duración. En la región Niño 3.4 y Niño 4 finaliza en la misma fecha (mayo del 2011), luego de una duración de 12 y 11 meses respectivamente. En el índice SOI finaliza luego de 10 meses de duración en abril del 2011.

Niña 2011-2012. Este fenómeno se presenta en tres regiones y el índice SOI. En la región 4 se presenta en julio del 2011, un mes después se presenta en la región Niño 3.4, y en la región Niño 3 y el índice SOI se presenta a partir de septiembre del 2011. En la región Niño 3.4 y Niño 4 finaliza en marzo del 2012, mientras que en la región Niño 3 y el índice SOI finaliza en enero del 2012.

	EVENTO	INICIO	FINAL	DURACION
SOI	Niña	sep-00	feb-01	6 meses
	Niña	nov-07	abr-08	6 meses
	Niña	ago-08	feb-09	7 meses
	Niña	jul-10	abr-11	10 meses
	Niña	sep-11	ene-12	5 meses
TNI	Niña	may-01	dic-05	56 meses
	Niña	abr-06	oct-07	19 meses
	Niña	jun-09	jul-10	14 meses
	Niña	ago-12	may-15	34 meses
Niño 1+2	Niña	sep-01	ene-02	5 meses
	Niña	abr-03	jun-03	3 meses
	Niña	oct-05	dic-05	3 meses
	Niña	abr-07	ene-08	10 meses
	Niña	jul-10	dic-10	6 meses
	Niña	abr-13	jul-13	4 meses
Niño 3	Niña	sep-01	ene-02	5 meses
	Niña	abr-07	abr-08	13 meses
	Niña	jun-10	mar-11	10 meses
	Niña	sep-11	ene-12	5 meses
Niño 3.4	Niña	feb-00	jul-00	6 meses
	Niña	oct-00	mar-01	6 meses
	Niña	ago-07	may-08	10 meses
	Niña	jun-10	may-11	12 meses
	Niña	ago-11	mar-12	8 meses
Niño 4	Niña	feb-00	jul-00	6 meses
	Niña	oct-00	mar-01	6 meses
	Niña	sep-07	jul-08	11 meses
	Niña	jul-10	may-11	10 meses
	Niña	jul-11	mar-12	9 meses

Tabla 16. Fenómenos La Niña de acuerdo a los índices SOI y TNI, y las cuatro regiones de la temperatura superficial del mar.

3.2 Evaluar el grado de relación de la precipitación y vegetación con el fenómeno ENOS.

Las gráficas de correlación cruzada que se presentan a continuación tienen correlación positiva y negativa, siendo aceptadas como correlaciones significativas únicamente las que presenten un 95% de confianza, esto representado por la línea entrecortada de las gráficas, las mismas que se ubican en 0.14 y -0.14, para las correlaciones positivas y negativas respectivamente. Para este estudio únicamente se consideraran los desfases temporales positivos, desde el retraso 0 que sería una relación instantánea, hasta los 18 meses anteriores (retraso 18).

En la Figura 23 se observan los correlogramas de la correlación cruzada entre los índices SOI, TNI y las anomalías de las cuatro regiones de la temperatura superficial del mar con el índice SPI de la subcuenca Tomebamba. En la Figura 23 (A) se presentan correlaciones positivas significativas en los retraso 0, 1, 3 y 6 lo cual indica que el índice SOI se relaciona con la precipitación de la subcuenca Tomebamba de manera directa en esos retrasos, si el índice SOI se incrementa el índice SPI también, y viceversa. Lo mismo ocurre con las anomalías de la temperatura de la región Niño 1+2 (C), la correlación es positiva y significativa en retraso 9, relacionándose de manera directa. En los correlogramas B, D, E y F ocurre lo contrario, las correlaciones son negativas, por lo cual si el índice TNI o las anomalías de las regiones Niño 3, Niño 3.4 y Niño 4 incrementan el índice SPI disminuye y viceversa. El índice TNI se relaciona con el índice SPI en el retraso 13 y 14. Las anomalías de la región Niño 3 se relaciona con el índice SPI en retraso 0. Las anomalías de la región Niño 3.4 se relacionan con el índice SPI entre el retraso 0 y 5, y las anomalías de la región Niño 4 se relacionan con el índice SPI entre el retraso 0 y 6.

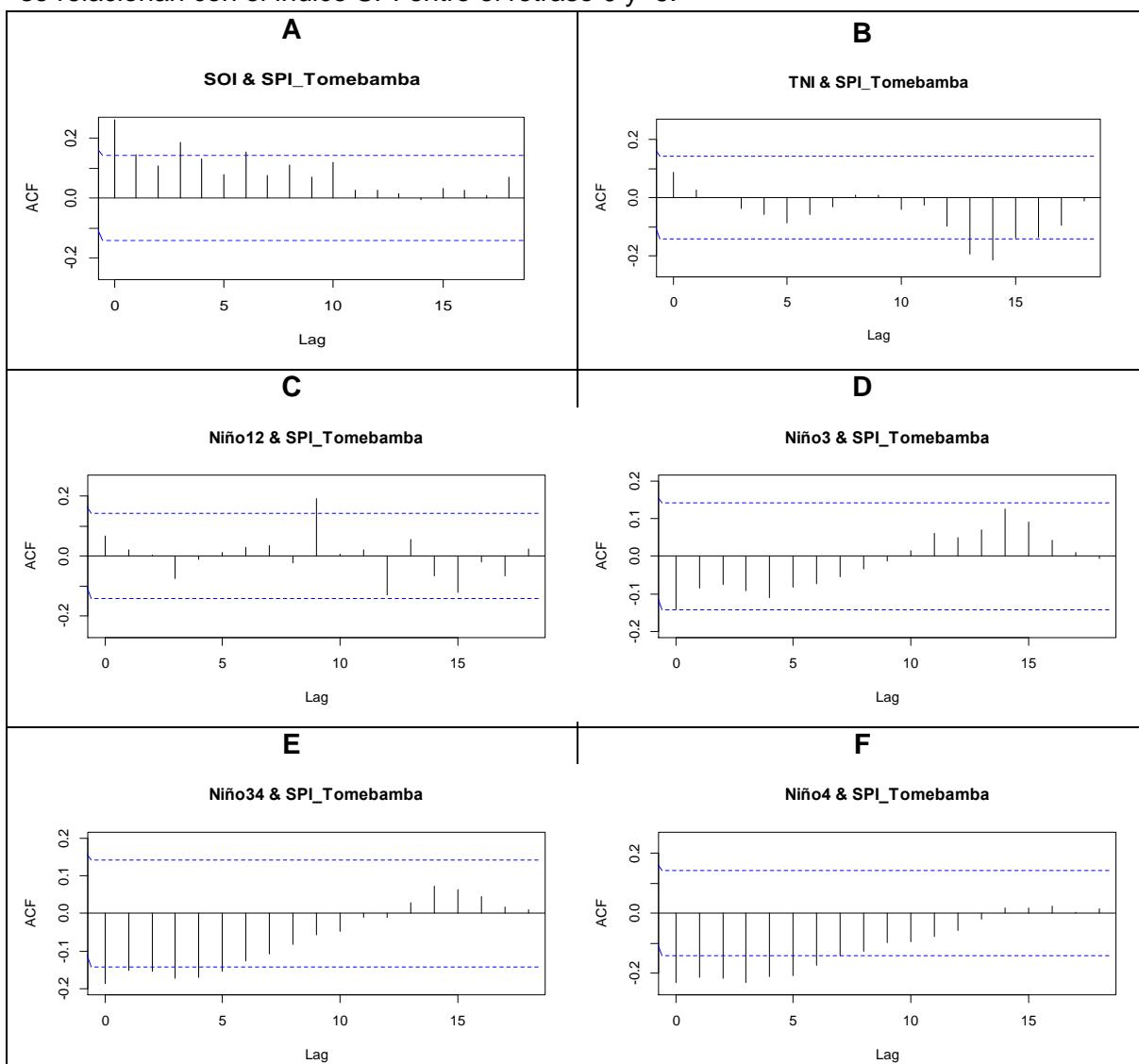


Figura 22. Correlaciones de los índices y anomalías relacionadas al fenómeno ENOS con el índice SPI de la subcuenca Tomebamba. Realizado por: Autora.

El índice SPI de la subcuenca Tomebamba se relaciona con los dos índices del fenómeno ENOS y las cuatro regiones de la temperatura superficial del mar. El índice SPI tiene relaciones significativas con las anomalías de las regiones Niño 3.4 y Niño 4 en un mayor número de retrasos y con las anomalías Niño 1+2 y Niño 3 únicamente en un retraso. La relación más significativa positiva se presenta con el índice SOI en el retraso 0 con un valor de 0.263 y la relación menos significativa negativa se presenta con el mismo índice en el retraso 1 con un valor de 0.147. La relación más significativa negativa se presenta con el índice TNI en el retraso 13 con un valor de -0.194 y la relación menos significativa negativa se presenta con la región Niño 3 en el retraso 0 con un valor de -0.140 (Tabla 17).

	RETRASO	CORRELACIÓN
SOI	0	0.263
	1	0.147
	3	0.188
	6	0.155
TNI	13	-0.194
	14	-0.213
Niño 1+2	9	0.193
Niño 3	0	-0.140
Niño 3.4	0	-0.187
	1	-0.151
	2	-0.155
	3	-0.173
	4	-0.171
	5	-0.153
Niño 4	0	-0.232
	1	-0.213
	2	-0.217
	3	-0.232
	4	-0.210
	5	-0.208
	6	-0.171

Tabla 17. Correlaciones significativas de los índices y anomalías relacionadas al fenómeno ENOS con el índice SPI de la subcuenca Tomebamba. Realizado por: Autora.

En la Figura 24 se observan los correlogramas de la correlación cruzada entre los índices SOI, TNI y las anomalías de las cuatro regiones de la temperatura superficial del mar con el índice SPI de la subcuenca Machángara, en la Figura 24 (A) se presentan correlaciones positivas significativas en Retraso 0, Retraso 1 y Retraso 3, lo cual indica que el índice SOI se relaciona con el índice SPI de manera directa, si el índice SOI incrementa el índice SPI también y viceversa. Los correlogramas B, D, E y F corresponden a correlaciones negativas, de las cuales el índice TNI se relaciona con el índice SPI de manera inversa entre los retraso 12 y retraso 16. Las anomalías de la

región Niño 3 se relacionan con el índice SPI únicamente en retraso 0. Las anomalías de la región Niño 3.4 se relaciona con el índice SPI entre los retrasos 0 y 4, y las anomalías de la región Niño 4 se relacionan con el índice SPI entre los retrasos 0 y 7. Las anomalías de la región Niño 1+2 tienen una correlación significativa positiva y dos correlaciones significativas negativas (C).

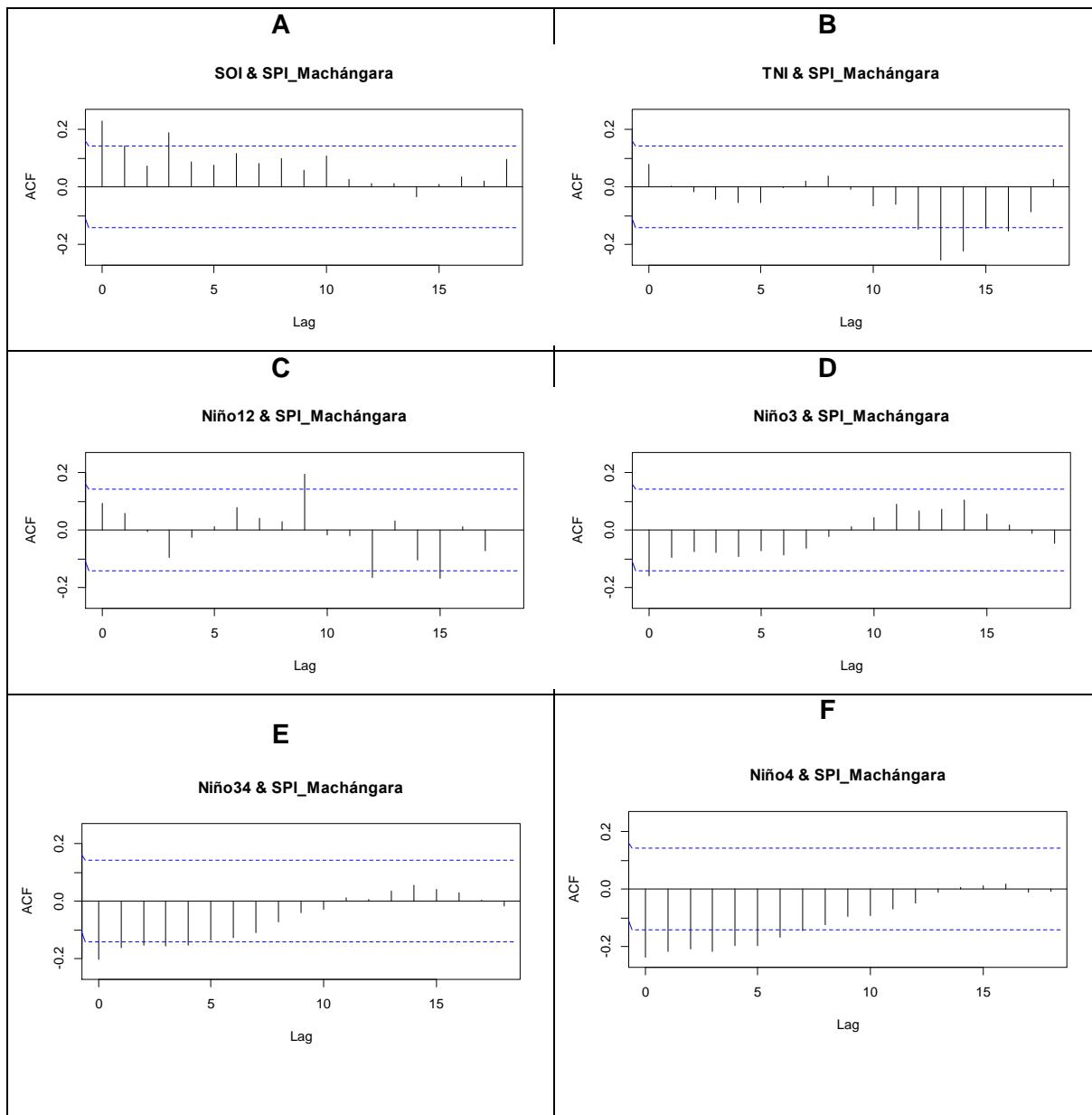


Figura 23. Correlaciones de los índices y anomalías relacionadas al fenómeno ENOS con el índice SPI de la subcuenca Machángara. Realizado por: Autora.

El índice SPI de la subcuenca Machángara se relaciona de manera significativa con los dos índices ENOS y las cuatro regiones de la temperatura superficial del mar. Este índice se relaciona en mayor número de retrasos con el índice TNI y las regiones Niño 3.4 y Niño 4, mientras que con la región Niño 3 se relaciona únicamente en el retraso

0. La relación más significativa positiva se presenta con el índice SOI en el retraso 0 con un valor de 0.231 y la menos significativa positiva se presenta con el mismo índice en el retraso 1 con un valor de 0.144. La relación más significativa negativa se presenta con la región Niño 4 en el retraso 0 con un valor de -0.237 y la correlación menos significativa negativa se presenta con la misma región en el retraso 7 con un valor de -0.143 (Tabla 18).

	RETRASO	CORRELACIÓN
SOI	0	0.231
	1	0.144
	3	0.189
TNI	12	-0.147
	13	-0.255
	14	-0.221
	15	-0.144
	16	-0.152
Niño 1+2	9	0.197
	12	-0.163
	15	-0.168
Niño 3	0	-0.159
Niño 3.4	0	-0.202
	1	-0.161
	2	-0.153
	3	-0.156
	4	-0.153
Niño 4	0	-0.237
	1	-0.215
	2	-0.209
	3	-0.217
	4	-0.197
	5	-0.195
	6	-0.166
	7	-0.143

Tabla 18. Correlaciones significativas de los índices y anomalías relacionadas al fenómeno ENOS con el índice SPI de la subcuenca Machángara. Realizado por: Autora.

En la Figura 25 se observan los correlogramas de la correlación cruzada entre los índices SOI, TNI, las anomalías de las cuatro regiones de la temperatura superficial del mar con el índice NDVI de la subcuenca Tomebamba, en la Figura 25 (A) no se presentan correlaciones significativas entre el los índices SOI y NDVI, lo cual indica que el índice SOI no se relaciona con la vegetación en esta subcuenca, de igual manera ocurre con las regiones Niño 3 (D), Niño 3.4 (E), Niño 4 (F). El índice TNI y las anomalías de la región Niño 1+2 si se relacionan con la vegetación, el índice TNI (B) presenta relación positiva con el índice NDVI en los retrasos 2 y 3, por lo cual la vegetación incrementa 2 o 3 meses posteriores al incremento del índice TNI y

viceversa, mientras las anomalías de la región Niño 1+2 presentan relación negativa con la vegetación en el retraso 9, por lo cual la vegetación se incrementa cuando las anomalías de esta región se reducen y viceversa.

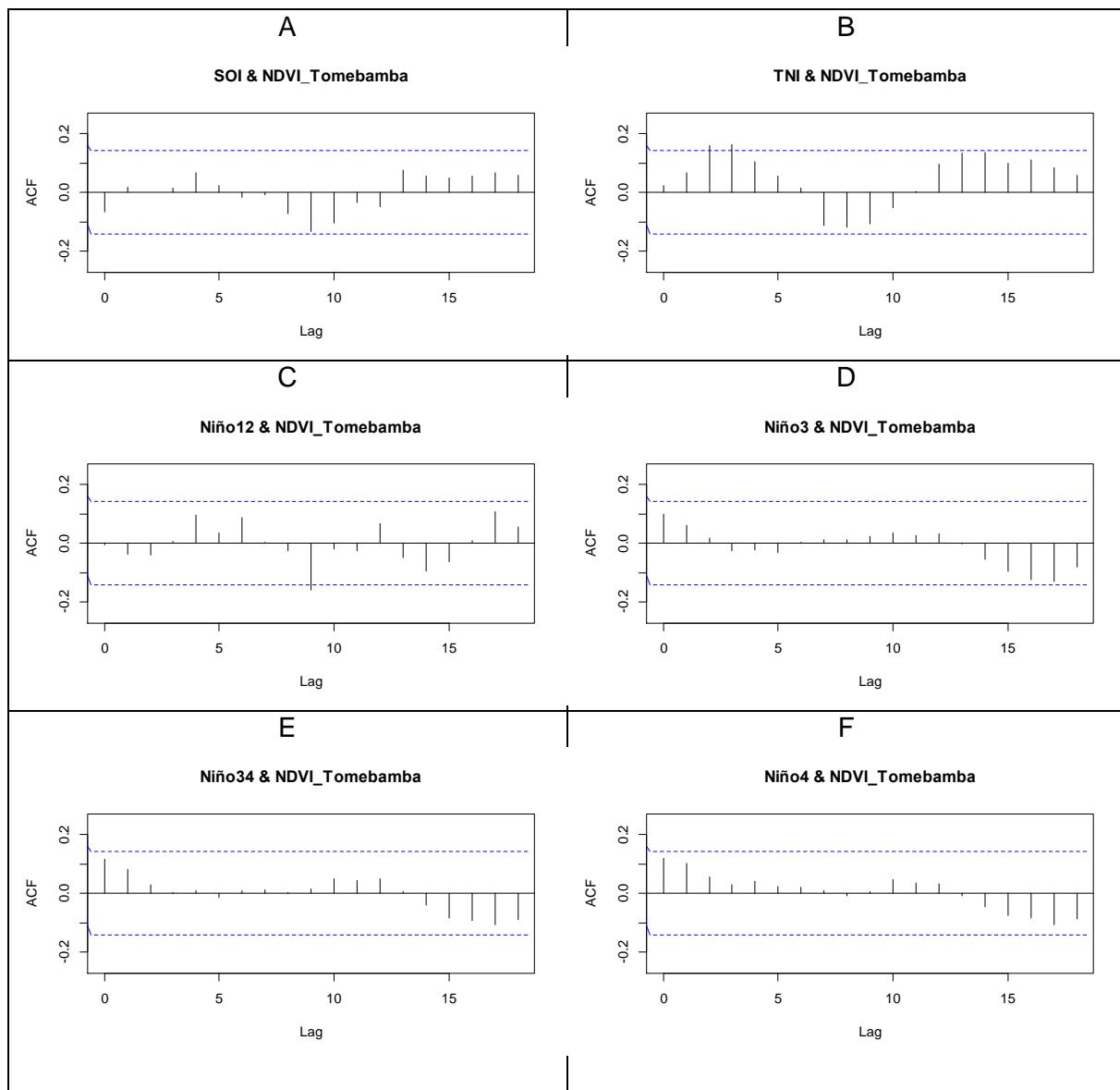


Figura 24. Correlaciones de los índices y anomalías relacionadas al fenómeno ENOS con el índice NDVI de la subcuenca Tomebamba. Realizado por: Autora.

El índice NDVI de la subcuenca Tomebamba se relaciona de manera significativa con el índice TNI y la región Niño 1+2. Con el índice TNI la relación es positiva en los retrasos 2 y 3, mientras que con las anomalías de la región Niño 1+2 la relación es negativa en el retraso 9 (Tabla 19).

	RETRASO	CORRELACIÓN
TNI	2	0.161
	3	0.165
Niño 1+2	9	-0.158

Tabla 19. Correlaciones significativas de los índices y anomalías relacionadas al fenómeno ENOS con el índice NDVI de la subcuenca Tomebamba. Realizado por: Autora.

En la Figura 26 se observan los correogramas de la correlación cruzada entre los índices SOI, TNI, las anomalías de las cuatro regiones de la temperatura superficial del mar con el índice NDVI de la subcuenca Machángara, en la Figura 26 (A, B, D, E, F) no se presentan correlaciones cruzadas significativas, lo contrario ocurre en la Figura 26(C) donde si se presenta una correlación cruzada significativa, las anomalías de la región Niño 1+2 se relacionan con la vegetación de la subcuenca Machángara de manera inversa, lo cual indica que cuando las anomalías de esta región se incrementan la vegetación disminuye y viceversa.

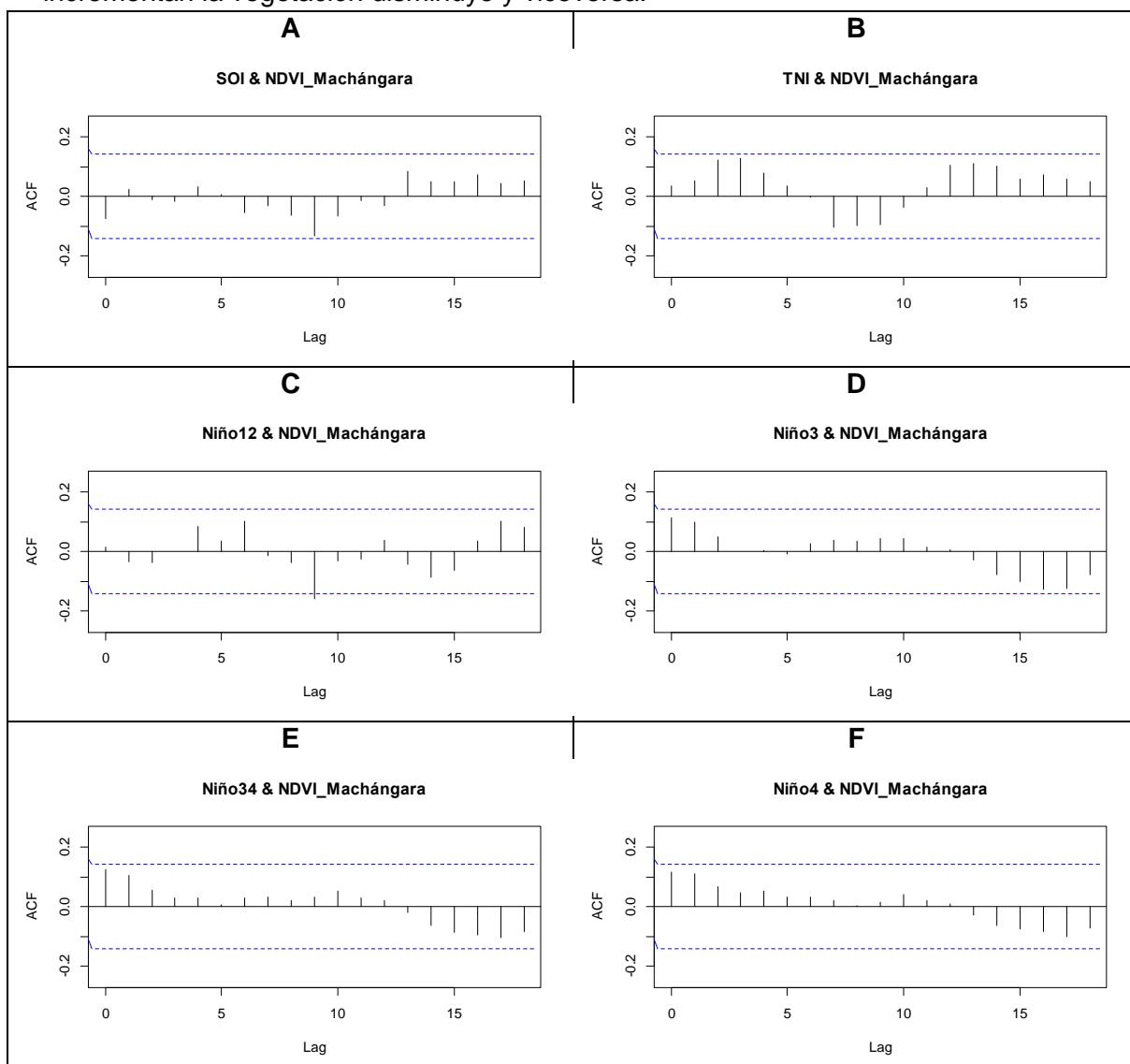


Figura 25. Correlaciones de los índices y anomalías relacionadas al fenómeno ENOS con el índice NDVI de la subcuenca Machángara. Realizado por: Autora.

El índice NDVI de la subcuenca Machángara se relaciona únicamente con las anomalías de la región Niño 1+2, estableciéndose una relación negativa significativa de -0.158 en el retraso 9, Tabla 18.

	RETRASO	CORRELACIÓN
Niño 1+2	9	-0.158

Tabla 20. Correlaciones significativas de los índices y anomalías relacionadas al fenómeno ENOS con el índice NDVI de la subcuenca Machángara. Realizado por: Autora.

En la Figura 27 se observan los correlogramas de la correlación cruzada entre el índice SPI y el índice NDVI de la subcuenca Tomebamba (A) y la subcuenca Machángara (B), en los dos correlogramas se observa una única relación significativa entre los dos índices en retraso 0, lo cual indica que la precipitación influye de manera inmediata sobre la vegetación, la misma que es inversa, por lo cual al incrementarse el índice SPI el índice NDVI se reduce y viceversa.

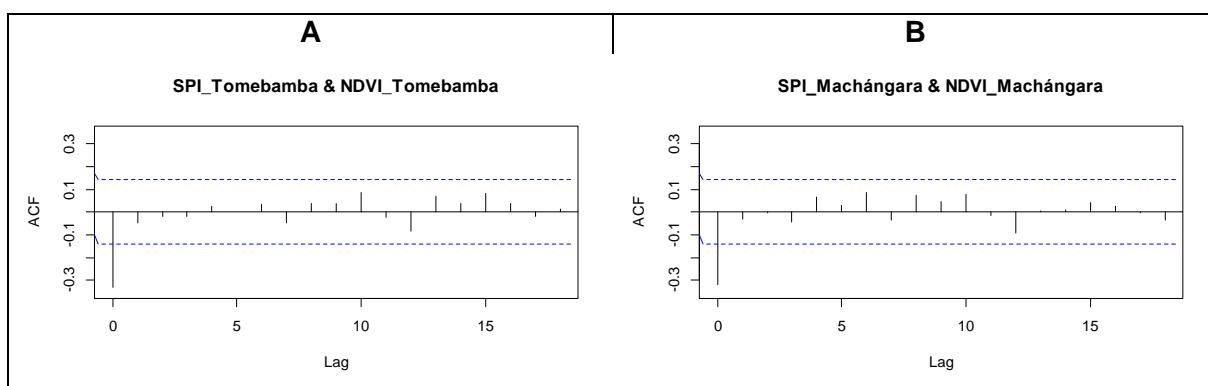


Figura 26. Correlación entre los índices SPI y NDVI de la subcuenca Tomebamba y Machángara.
Realizado por: Autora.

El índice NDVI de las subcuenca Tomebamba y Machángara presenta una correlación negativa significativa con el índice SPI de su respectiva subcuenca, esta correlación es mayor en la subcuenca Tomebamba con -0.329, siendo también la relación más significativa de este estudio, Tabla 21.

	RETRASO	CORRELACIÓN
SPI – NDVI Tomebamba	0	-0.329
SPI-NDVI Machángara	0	-0.319

Tabla 21. Correlación significativas entre los índices SPI y NDVI de la subcuenca Tomebamba y Machángara. Realizado por: Autora.

3.3 Caracterizar la dinámica de la precipitación y vegetación durante los eventos El Niño y La Niña, mediante el análisis de series temporales.

3.3.1 Dinámica de precipitación de la subcuenca Tomebamba

El índice SPI de la subcuenca Tomebamba se relaciona con el índice SOI, TNI y anomalías de las cuatro regiones de la temperatura superficial del mar. El índice SOI



se relaciona con el índice SPI cuando este último varía entre sequia severa y extremadamente húmedo. Cuando el índice SOI evidencia un fenómeno La Niña el índice SPI en los retrasos 0, 1, 3 y 6 describe la variación de este índice, incrementándose hasta valores que se clasifican entre moderadamente húmedos y extremadamente húmedos. Lo contrario ocurre cuando en el índice SOI se evidencia un fenómeno El Niño, ya que el índice SPI en los retrasos 0, 1, 3 y 6 disminuye, clasificándose entre seco y sequía severa.

El índice TNI se relaciona haciendo que el índice SPI varíe entre moderadamente húmedo y severamente seco, los dos primeros fenómenos La Niña ocasionaron que se incremente la precipitación 13 y 14 meses (retraso 13 y 14) posteriores al fenómeno, clasificándose el índice SPI como moderadamente húmedo, lo cual se repite en el último fenómeno de La Niña (Ago-12/May-15). El fenómeno El Niño se relaciona de manera contraria, se reduce la precipitación 13 y 14 meses posteriores al fenómeno, clasificándose el SPI como severamente seco durante estos meses.

La región El Niño 1+2 se relaciona con el índice SPI con un retraso de 9 meses a partir del fenómeno, durante el periodo de estudio 2000 – 2015 las anomalías de esta región únicamente se relacionaron con el índice SPI en dos ocasiones, la primera disminuyendo la precipitación durante el fenómeno La Niña y la segunda incrementando la precipitación durante El Niño.

Los fenómenos presentados en la región Niño 3 se relacionan con el índice SPI en el mismo mes en que se presenta el fenómeno (retraso 0), cuando se presenta un fenómeno La Niña, el índice SPI se clasifica entre moderadamente húmedo y muy húmedo, mientras que cuando se presenta un fenómeno El Niño, el índice SPI se clasifica como severamente seco, esto durante el periodo de estudio.

Los fenómenos presentados en la región Niño 3.4 se relacionaron simultáneamente y hasta 5 meses posteriores, cuando en la región Niño 3.4 se presentan fenómenos La Niña el índice SPI se clasifica entre moderadamente húmedo y extremadamente húmedo, lo cual indica un incremento en la precipitación en la subcuenca durante los meses de relación, lo contrario ocurre cuando se presentan fenómenos El Niño, la precipitación se reduce, ocasionando que el índice SPI se clasifique entre moderadamente seco y extremadamente seco.

La región Niño 4 se relaciona con el índice SPI entre 0 y 5 meses posteriores a la ocurrencia del fenómeno, cuando en la región Niño 4 se presentan fenómenos La Niña el índice SPI se clasifica entre moderadamente húmedo y extremadamente húmedo. Lo contrario ocurre evidenciándose una disminución en la precipitación en los meses posteriores al fenómeno, cuando se presentan fenómenos El Niño, el índice SPI se clasifica entre moderadamente húmedo y severamente húmedo.

La variación del índice SPI durante los meses que se relaciona con los fenómenos ENOS no son prolongadas, la variación se da entre uno y dos meses antes de volver a su rango normal. El índice SPI está relacionado con los dos índices y las anomalías de la región Niño 3, Niño 3.4 y Niño 4 de la misma manera, el fenómeno La Niña se presenta se relaciona con el incrementos en la precipitación, y el fenómeno El Niño se



relaciona con las sequias. Las anomalías de la región Niño 1+2 influyen de manera contraria.

3.3.2 Dinámica de la precipitación de la subcuenca Machángara

El índice SPI de la subcuenca Machángara se relaciona con los dos índices y las anomalías de las cuatro regiones de la temperatura superficial del mar. La relación entre el índice SOI y el índice SPI es el mismo mes de presentarse el fenómeno ENOS, y con 1 y 3 meses de retraso, cuando ocurren fenómenos La Niña el índice SPI se clasifica entre moderadamente húmedo y muy húmedo, evidenciándose un incremento en la precipitación en estos meses, mientras que cuando ocurren fenómenos El Niño el índice SPI se clasifica como severamente seco, evidenciándose la reducción de la precipitación en el mismo mes que ocurre el fenómeno, y un mes y tres meses posteriores.

El índice TNI se relaciona entre 12 y 16 meses posteriores, por lo cual la precipitación se ve afectada un año después. Cuando se presentan fenómenos La Niña el índice SPI varía entre moderadamente húmedo y extremadamente húmedo a partir del año de ocurrido el fenómeno, lo contrario ocurre con los fenómenos El Niño, ya que al presentarse se da una disminución en la precipitación e inclusive la ausencia de precipitación haciendo que el índice SPI varié entre moderadamente seco y extremadamente seco a partir del año de ocurrido el fenómeno.

Las anomalías de la región Niño 1+2 se relacionan con el índice SPI de manera positiva y negativa, por lo cual al presentarse algunos fenómenos El Niño se dieron sequias y en otros casos se dieron lluvias, mientras que los fenómenos La Niña en todos los casos provocaron incremento en la precipitación. Las anomalías de la región Niño 3 se relacionan con la precipitación de forma inmediata, tres de los fenómenos presentados en esta región se relacionaron con el índice SPI, cuando se presentan los fenómenos La Niña el índice SPI se clasifica entre moderadamente húmedo y extremadamente húmedo. Lo contrario ocurre cuando se presenta el fenómeno El Niño, ya que este fenómeno se relaciona con las sequías, clasificándose el índice SPI como severamente seco.

Los fenómenos ocurridos en la región Niño 3.4 se relacionan de forma inmediata y hasta 4 meses después de ocurrido el fenómeno, los fenómenos La Niña se relacionan con el incremento en la precipitación, clasificándose el índice SPI entre moderadamente húmedo y muy húmedo. Los fenómenos El Niño se relacionan con las sequias, clasificándose el índice SPI entre moderadamente seco y severamente seco. Finalmente la región Niño se relaciona de inmediato y hasta 7 meses después de ocurrido el fenómeno, los fenómenos La Niña se relacionan con la lluvia, clasificándose el índice SPI entre moderadamente húmedo y muy húmedo, mientras que el índice SPI se clasifica como severamente seco cuando se relaciona con fenómenos El Niño.

La variación del índice SPI no es prolongada, se mantiene uno o dos meses antes de volver a valores normales. Los dos índices y las anomalías de las cuatro regiones de la temperatura superficial influyen de la misma manera, La Niña se relaciona con el



incremento en la precipitación y El Niño se relaciona con las sequias, únicamente las anomalías de la región Niño 1+2 evidencian un incremento en la precipitación cuando se presenta un fenómeno El Niño.

3.3.3 Dinámica de la vegetación de la subcuenca Tomebamba

La vegetación de la subcuenca Tomebamba se relaciona con el índice TNI, las anomalías de la región Niño 1+2 y el índice SPI de la misma subcuenca. Cuando el índice TNI evidencia un fenómeno La Niña el índice NDVI desciende, generándose que este índice se clasifique entre vegetación escasa y moderada. El índice NDVI se incrementa cuando está relacionado con un fenómeno El Niño, clasificándose como vegetación sana, esto 2 o 3 meses posteriores al fenómeno. El índice SPI se relaciona de manera similar, ya que cuando ocurre un fenómeno La Niña este índice se incrementa y el índice NDVI desciende, clasificándose como vegetación moderada, mientras que cuando hay ausencia de precipitación el índice NDVI se incrementa clasificándose como vegetación sana.

Las anomalías de la región Niño 1+2 se relacionan con 9 meses de retraso con el índice NDVI, 9 meses después de presentarse un fenómeno La Niña el índice NDVI se incrementa hasta su valor máximo, clasificándose como vegetación sana, y al presentarse un fenómeno El Niño el índice NDVI 9 meses después desciende clasificándose entre vegetación escasa y moderada.

3.3.4 Dinámica de la vegetación de la subcuenca Machángara

La vegetación de la subcuenca Machángara está relacionado con las anomalías de la región Niño 1+2 y el índice SPI de la misma subcuenca durante el periodo de estudio. Las anomalías de la región Niño 1+2 se relacionan con 9 meses de retraso a partir del fenómeno, al presentarse un fenómeno La Niña el índice NDVI 9 meses después incrementa clasificándose como vegetación sana, lo contrario ocurre 9 meses después de presentarse un fenómeno El Niño, ya que el índice NDVI disminuye clasificándose como vegetación escasa y moderada.

El índice SPI se relaciona en los meses de ocurrido los fenómenos, en los meses más lluviosos el índice NDVI disminuye clasificándose como vegetación moderada, mientras que en los meses de sequias el índice NDVI incrementa clasificándose como vegetación sana.

CAPITULO 4: DISCUSIÓN

4.1 Comparación entre subcuenca

Para el cumplimiento de los objetivos planteados hemos estudiado las subcuenca Machángara y Tomebamba, las mismas que forman parte de la cuenca alta del Río Paute. En cada subcuenca hemos analizado la dinámica de la precipitación y vegetación, además de la relación entre la precipitación y vegetación con el fenómeno ENOS. Estas subcuenca se encuentran juntas, tienen rasgos de altitud y vegetación similares.

La precipitación está representada por el índice SPI, el mismo que en la subcuenca Tomebamba se mantiene el 82% de los meses en el rango normal y en la subcuenca Machángara se mantiene el 80% de los meses en el rango normal. En la subcuenca Machángara se dio un mes extremadamente húmedo y un mes extremadamente seco. En la subcuenca Tomebamba únicamente se dio un mes extremadamente húmedo, estos eventos extremos en las dos subcuenca no coinciden en fechas. El mes extremadamente húmedo de la subcuenca Machángara fue junio del 2007, un año más tarde en agosto del 2008 se dio en la subcuenca Tomebamba. Y el mes extremadamente seco de la subcuenca Machángara se dio en abril del 2013.

La vegetación está representada por el índice NDVI. Este índice se clasifica como vegetación moderada en la subcuenca Machángara en un 53% de los meses de estudio, mientras que en la subcuenca Tomebamba este porcentaje sube a 58%. La siguiente clasificación del índice NDVI que mayor porcentaje de meses se mantiene es la vegetación vigorosa, con un 37% en la subcuenca Machángara y un 34% en la subcuenca Tomebamba. Y la que menos meses se mantiene es la vegetación escasa con apenas el 10% en la subcuenca Machángara y un 8% en la subcuenca Tomebamba.

En cuanto a la relación entre el fenómeno ENOS y la precipitación, el mayor número de relaciones se presentó entre el fenómeno ENOS y el índice SPI de la subcuenca Machángara, con un número total de 25 relaciones, de las cuales 8 fueron con las anomalías de la región Niño 4, 5 fueron con el índice TNI y las anomalías de la región Niño 3.4, 3 fueron con el índice SPI y las anomalías de la región Niño 1+2 y 1 fue con las anomalías de la región Niño 3. Entre el fenómeno ENOS y el índice SPI de la subcuenca Tomebamba se presentaron 21 relaciones, de las cuales el mayor número de relaciones se presentaron con la región Niño 4 con 7 relaciones, 6 con las anomalías de la región Niño 3.4, seguida de 4 relaciones con el índice SOI, 2 relaciones con el índice TNI y una relación con las anomalías de la región Niño 1+2 y Niño 3. La región Niño 4 es la que más se relaciona con la precipitación de las dos subcuenca en estudio, y la región Niño 3 es la que menos se relaciona. La principal diferencia entre estas relaciones se da con el índice TNI y la región Niño 1+2, ya que con la precipitación de la subcuenca Tomebamba tiene 2 y 1 relaciones respectivamente, mientras que con la precipitación de la subcuenca Machángara tiene 5 y 3 relaciones respectivamente, siendo esta última subcuenca la que mayor relación tiene con el fenómeno ENOS.



La relación entre el fenómeno ENOS y la vegetación, es mucho menor que entre el fenómeno ENOS y la precipitación. La vegetación de la subcuenca Tomebamba es la que mayor número de relaciones presenta, se relaciona con el índice TNI dos veces y una vez con la región Niño 1+2. Y la vegetación de la subcuenca Machángara únicamente se relaciona con la región Niño 1+2 una vez.

4.2 Comparación con otros estudios

El objetivo principal de este estudio es establecer la relación entre el fenómeno ENOS, el índice SPI y el índice NDVI de la subcuenca Machángara y Tomebamba, se busca conocer esta relación ya que el fenómeno ENOS es un fenómeno que genera eventos extremos como inundaciones y sequías en diversas partes del mundo. Los fenómenos El Niño (Fase cálida) se relacionan con el incremento de precipitación en las zonas costeras del Ecuador, Perú y Colombia principalmente, siendo la zona costera la más afectada ha sido la más estudiada para conocer la influencia del fenómeno ENOS sobre las variables climatológicas como precipitación y temperatura. Uno de los múltiples estudios realizados sobre este tema es el estudio de Rau (2015), en el cual concluyó que el fenómeno El Niño genera que la precipitación se incremente durante los meses de influencia en la costa de Perú.

La correlación entre el fenómeno ENOS y la precipitación también se ha investigado en todo el mundo a diferentes escalas. Como ejemplos tenemos el estudio de Chiodi & Harrison (2015) , en el cual establecen una conexión fuerte entre los procesos que controlan las anomalías globales de precipitación estacional y los eventos de El Niño y La Niña. Así también Xu et al. (2004), en el cual establecen que el fenómeno ENOS en su fase fría (La Niña) provoca la disminución de la precipitación, generando condiciones de sequía, mientras que en la fase cálida (El Niño) la precipitación se incrementa, dando una correlación positiva, en las dos fases del fenómeno ENOS. Resultados similares obtuvieron Ogutu et al (2008).

Las subcuencas Machángara y Tomebamba se encuentran en la zona andina del Ecuador, por lo cual el fenómeno ENOS se relaciona de manera diferente, el fenómeno El Niño se relaciona con la disminución en la precipitación, mientras que el fenómeno La Niña se relaciona con el incremento en la precipitación. Estos resultados son similares a los obtenidos en el estudio realizado por Serrano et al. (2016) durante el periodo 1965-2012, en el cual se relacionaron los índices El Niño 3.4 y El Niño 1+2 y otros procesos de circulación atmosférica, con la precipitación registrada en estaciones meteorológicas ubicadas en la cadena andina (sierra) y en las llanuras occidentales (costa) del Ecuador. Los principales resultados obtenidos en este estudio evidencian que las condiciones calidad de la temperatura superficial del mar favorecen las condiciones secas en la cadena andina y favorecen las condiciones húmedas en las llanuras occidentales

La relación entre el fenómeno ENOS y la vegetación ha sido menos estudiada, en el estudio realizado por Maita (2015) durante el periodo 2000-2014, sugiere que el fenómeno ENOS se relaciona con la vegetación, ya que la serie temporal del índice EVI, tiene un comportamiento similar al índice MEI que describe los fenómenos ENOS. Los resultados de este estudio no coinciden con los resultados obtenidos con el índice



NDVI en este estudio, aunque en los dos estudios se esté relacionando la vegetación con el fenómeno ENOS, se utilizan índices diferentes, pudiendo deberse a esto la variación en los resultados. En este estudio el índice NDVI se relaciona con el índice TNI y las anomalías de la región Niño 1+2 en la subcuenca Tomebamba y con las anomalías de la región Niño 1+2 en la subcuenca Machángara, pero no de manera lineal como en el estudio de Maita, se relacionan con un retraso de 1 y 2 meses para el índice TNI y 9 meses para las anomalías de la región Niño 1+2 en la subcuenca Tomebamba y en la subcuenca Machángara con un retraso de 9 meses con las anomalías de la región Niño 1+2.



CAPITULO 5: CONCLUSIONES

Este estudio se enfocó en buscar si existe relación entre el fenómeno ENOS y los índices SPI y NDVI de las subcuenca Machángara y Tomebamba, así también si existe relación entre el índice SPI y NDVI de cada subcuenca en estudio durante el periodo 2000 - 2015. Los datos utilizados fueron mensuales, los mismos que se utilizaron para realizar series de tiempo con sus respectivas gráficas y correlaciones cruzadas con un retraso máximo de 18 meses.

El primer objetivo fue caracterizar el comportamiento y tendencia de la precipitación, vegetación y anomalías e índices del fenómeno ENOS, con lo cual se pudo identificar los meses más lluviosos y los más secos, y el estado de la vegetación de cada subcuenca, de igual manera se identificaron los fenómenos El Niño y La Niña que se presentaron durante el periodo de estudio. La dinámica de la precipitación en las dos subcuenca es similar, la mayor parte de los meses de estudio permanecieron en rangos normales, con pequeñas variaciones, la precipitación de la subcuenca Tomebamba presento tendencia creciente durante el periodo de estudio. La vegetación permanece en rangos que describen a la vegetación como moderada más de la mitad de meses de estudio, lo cual indica que las dos subcuenca tienen variaciones constantes de vegetación, ya que se clasificó como vigorosa en un buen número de meses de estudio, sin embargo también se presentaron pocos meses con vegetación escasa. La precipitación y vegetación tienen comportamiento diferente, siendo la vegetación la más variante. Los fenómenos El Niño y La Niña se presentan en fechas similares en las cuatro regiones de la temperatura superficial del mar y el índice SOI, variando con el comportamiento del índice TNI, ya que este último es el que presenta fenómenos más prolongados, los eventos más extremos se presentaron de acuerdo al índice SOI, mientras que con el índice TNI y las cuatro regiones de la temperatura superficial del mar los eventos se clasificaron mayormente como débiles. El índice TNI y las anomalías de las cuatro regiones de la temperatura superficial del mar durante el periodo de estudio presentan tendencia creciente, evidenciándose un ligero incremento en la temperatura del mar.

El segundo objetivo fue evaluar el grado de relación de la precipitación y vegetación con el fenómeno ENOS y el grado de relación entre la precipitación y vegetación de cada subcuenca, con lo cual se pudo establecer las relaciones estadísticamente significativas positivas y negativas entre estas variables, presentándose el mayor número de relaciones significativas entre el fenómeno ENOS y la precipitación.

El tercer objetivo fue caracterizar la dinámica de la precipitación y vegetación durante los eventos El Niño y La Niña, mediante el análisis de series temporales. Teniendo ya identificados los meses en que se dieron los fenómenos El Niño y La Niña, y el tipo de relación que estos fenómenos tienen con la precipitación y vegetación, se pudo identificar la dinámica de precipitación y vegetación al estar relacionadas con el fenómeno ENOS. La precipitación incrementa y disminuye de acuerdo a las fases del fenómeno ENOS, cuando el fenómeno ENOS se presenta en su fase cálida (El Niño) la precipitación disminuye, y cuando el fenómeno ENOS se presenta en su fase fría



(La Niña) la precipitación aumenta, mientras que la vegetación disminuye en los meses lluviosos y aumenta en ausencia de lluvia.

El fenómeno ENOS a pesar de tener mayor relación con la precipitación de zonas costeras como se evidencian en diferentes estudios, se pudo comprobar que también se relaciona con la precipitación de zonas andinas, sin embargo la relación encontrada en este estudio fue contraria a la de zonas costeras, ya que la fase cálida del fenómeno ENOS se relaciona con el incremento de la precipitación en las zonas costeras y lo contrario ocurre con la fase fría, ya que la precipitación disminuye. Los estudios que evidencien la relación entre el fenómeno ENOS y la vegetación son escasos, inclusive solo han llegado a suponer que existe una relación. En este estudio se puede concluir que si existen relaciones estadísticamente significativas entre el fenómeno ENOS y la vegetación de las dos subcuencas en estudio.

La relación entre la precipitación y vegetación es la relación más significativa del estudio, cuando la precipitación incrementa la vegetación disminuye, esto debido a que se están utilizando índices y especialmente a que se utilizan imágenes satelitales basadas en la reflectancia de la vegetación. La reflectancia es mayor en días soleados, ya que estos días están despejados y la vegetación en presencia de radiación solar incrementa su actividad fotosintética, en los días lluviosos la actividad fotosintética disminuye y también existen interferencias como la misma lluvia y las nubes, por lo cual la reflectancia disminuye.

Con los resultados obtenidos en este estudio se tiene información base para que las autoridades locales y nacionales puedan tomar decisiones sobre el manejo de las cuencas hídricas en estudio, además esta información puede ser utilizada como base para estudios con metodologías más complejas e incluir nuevas variables como la temperatura y caudales. La metodología utilizada en este estudio también puede ser utilizada en otras cuencas para conocer si su comportamiento es similar o contrario a las subcuencas Machángara y Tomebamba de acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio.



6. Referencias

- Abramowitz, M., & Stegun, I. A. (1965). *Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical table* (Vol. 2172). Dover New York.
- Alviar Ramírez, M., Granda Carvajal, C., Guillermo Pérez Puerta, L., & Ochoa, D. (2006). *La curva ambiental de Kuznets para la calidad del agua: Un análisis de su validez mediante raíces unitarias y cointegración*.
- Arnau Gras, J. (1981). *Uso de los modelos de «series temporales» como técnicas de análisis de los diseños conductuales*. Recuperado a partir de
<http://deposit.ub.edu/dspace/handle/2445/24044>
- Carchi, E. (2015). *Elaboración de un balance hídrico de la Cuenca del Río Machangara*.
- Chiodi, A. M., & Harrison, D. E. (2015). *Global Seasonal Precipitation Anomalies Robustly Associated with El Niño and La Niña Events-An OLR Perspective**,+. *Journal of Climate*, 28(15), 6133-6159. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00387.1>
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de teledetección espacial*. Recuperado a partir de
<http://files.especializacion-tig.webnode.com/200001110-8750e88486/FUNDAMENTOS-DE-TELEDETECCION-EMILIO-CHUVIECO.pdf>
- Cordova, K. (2012). *GEOTECNOLOGÍA ESPACIAL APLICADA AL ESTUDIO DEL FENÓMENO DE ISLAS TÉRMICAS URBANAS. Una contribución al estudio de la dinámica socioambiental de las islas de calor urbano en la ciudad de Caracas*.
- Curtis, S. (2008). *The El Niño–Southern Oscillation and Global Precipitation*. *Geography Compass*, 2(3), 600-619. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2008.00105.x>



- Cuya, M. O. A. (2016). *Variación del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en relación con la gradiente altitudinal en las lomas de Atocono*. Lima-Perú.
- Davinson, A., Melo, L., & Parra, D. (2016). *Impactos de los fenómenos climáticos sobre el precio de los alimentos en Colombia. Ensayos sobre Política Económica*, 146-158. <https://doi.org/10.1016/j.espe.2016.03.003>
- Dickey, D. A., & Fuller, W. A. (1981). *Likelihood Ratio Statistics for Autoregressive Time Series with a Unit Root*. *Econometrica*, 49(4), 1057-1072. <https://doi.org/10.2307/1912517>
- Econterms. (2017). *P-value Dictionary Definition*. Recuperado 4 de enero de 2018, a partir de <https://www.thoughtco.com/definition-of-p-value-1148041>
- FAO. (2002). *Relaciones Tierra-Agua en Cuencas Hidrográficas Rurales*. <http://www.fao.org/docrep/005/y3618s/y3618s00.htm>
- FAO (2003). *Manual Curso Análisis Espacial Arcview 8.2*.
- Galarza, D. P. (2016). *Evaluación meteorológica de la cuenca del Río Machángara*.
- Giner, C., Martínez, B., Gilabert, M., & Alcaraz-Segura, D. (2012). *Tendencias en el verdor de la vegetación y en la producción primaria bruta de las áreas forestales en la España peninsular (2000-2009)*. *Revista de Teledetección*, 38, 51-64.
- Giraldo, R. (2002). *Introducción a la Geoestadística. Teoría y aplicación*. Bogotá: Departamento de estadística. Universidad Nacional de Colombia.
- Glen, S. (2017). KPSS Test: Definition and Interpretation. <http://www.statisticshowto.com/kpss-test/>
- Guevara, J. (2014). *Uso correcto de la correlación cruzada en Climatología: el caso de la presión atmosférica entre Taití y Darwin*. *Terra Nueva Etapa*, XXX(47). Recuperado a partir de <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=72132516006>



- Hanley, D. E., Bourassa, M. A., O'Brien, J. J., Smith, S. R., & Spade, E. R. (2003). *A Quantitative Evaluation of ENSO Indices. Journal of Climate, 16(8), 1249-1258.* [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)16<1249:AQEOEI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)16<1249:AQEOEI>2.0.CO;2)
- Hilari, V. H. (2010). *Identificación y análisis multitemporal de cuatro bofedales en el Altiplano Norte del Departamento de La Paz (Ulla Ulla, Ancoraimes, Peñas y Tuni Condoriri)*. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz (Bolivia). Facultad de Agronomía.
- Jiménez, M. del C. (2011). *Anexo del Informe Técnico: Elaboración de un boletín con información hidroclimática de los mares de México.* Recuperado a partir de <http://www.inapesca.gob.mx/portal/documentos/publicaciones/BOLETINES/hidroclimatico/INDICES-CLIMATICOS.pdf>.
- Juste, R. P., González, A. G., & Díaz, J. Q. (2012). *Métodos y diseños de investigación en educación*. Editorial UNED.
- Kwiatkowski, D., Phillips, P. C. B., Schmidt, P., & Shin, Y. (1992). *Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root: How sure are we that economic time series have a unit root. Journal of Econometrics, 54(1), 159-178.* [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(92\)90104-Y](https://doi.org/10.1016/0304-4076(92)90104-Y)
- López, L. A. (2013). *Caracterización de la sequía en la cuenca del Río Mayo.* Recuperado a partir de http://biblioteca.itson.mx/dac_new/tesis/734_lopez_luis.pdf
- Loyo, R. (2015). *TELECONEXIONES DE ÍNDICES OCÉANO-ATMOSFÉRICOS DE EL NIÑO/OSCILACIÓN DEL SUR (ENOS) A LAS ANOMALÍAS DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA EN MÉXICO.*



- Maita, A. (2015). *Dinámica espacio temporal del Índice de Vegetación Mejorado (EVI) en los Ecosistemas del sur del Ecuador.* Recuperado a partir de
<http://dspace.uazuay.edu.ec:8080/handle/datos/4933>
- Mas, J. F. (2011). Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio.
Instituto Nacional de Ecología.
- Mauricio, J. A. (2007). Análisis de series temporales. *Universidad Complutense de Madrid.*
- McPhaden, M. J., Zebiak, S. E., & Glantz, M. H. (2006). *ENSO as an Integrating Concept in Earth Science.* *Science*, 314(5806), 1740-1745.
<https://doi.org/10.1126/science.1132588>
- Mendoza, G. E. (2013). *Análisis de series de tiempo de índice de vegetación EVI 2006-2011 para caracterizar el cultivo del arroz a partir de imágenes MODIS.*
- Mora, D. E., & Willems, P. (2011). *Decadal oscillations in rainfall and air temperature in the Paute River Basin—Southern Andes of Ecuador. Theoretical and Applied Climatology*, 108(1-2), 267-282. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0527-4>
- National Centers for Environmental Information (NCEI). (2018). *Equatorial Pacific Sea Surface Temperatures.* Recuperado a partir de
<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/sst/#oni>
- NOAA. (2017). *Working Group on Surface Pressure.* Recuperado 27 de noviembre de 2017, a partir de https://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/
- Ogutu, J. O., Piepho, H.-P., Dublin, H. T., Bhola, N., & Reid, R. S. (2008). *El Niño-Southern Oscillation, rainfall, temperature and Normalized Difference Vegetation Index fluctuations in the Mara-Serengeti ecosystem.* *African Journal of Ecology*, 46(2), 132-143. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2028.2007.00821.x>



- Paredes, F., Millano, J. L., & Guevara, E. (2008). *Análisis espacial de las sequías meteorológicas en la región de Los Llanos de Venezuela durante el período 1961-1996. Revista de Climatología*, 8.
- Pesáñez, J. D. (2015). *Propuesta de modelo de gestión de la subcuenca del río Tomebamba, como herramienta de manejo integrado y conservación*. Recuperado a partir de
<http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/4576/1/11063.pdf>
- Rau, P. (2015). *El Fenómeno El Niño y su influencia sobre las precipitaciones en Perú, nuevas perspectivas. Hidráulica Selección de Principales Artículos*.
- Roldán, A. K. (2012). *Identificación de indicadores océano-atmosféricos de mayor representatividad durante la niña 2010-2011 en Colombia*.
instname:Universidad Santo Tomás. Recuperado a partir de
<http://repository.usta.edu.co/handle/11634/2641>
- Serrano, V., Aguilar, E., Martínez, R., Hernández, N., Molina, C., Sanchez Lorenzo, A. Nieto, R. (2016). *The complex influence of ENSO on droughts in Ecuador. Climate Dynamics*, 1-23. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3082-y>
- Trasmonte, G., & Silva, Y. (2008). *Evento La Niña: propuesta de definición y clasificación según las anomalías de temperatura de la superficie del mar en el área niño 1+2*.
- Trenberth, K. E., Caron, J. M., Stepaniak, D. P., & Worley, S. (2002). *Evolution of El Niño–Southern Oscillation and global atmospheric surface temperatures. Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D8), AAC 5-1.
<https://doi.org/10.1029/2000JD000298>
- Tucker, C. J. (1978). *A comparison of satellite sensor bands for vegetation monitoring. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Recuperado a partir de
<https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19790029780>



- Vacca, A., Cadier, E., Gomez, G., & Jornadas en Ciencias de la Tierra, 3., Quito (ECU), 1994/11/16-19. (1994). *Inundaciones y sequias en el Ecuador : proyecto INAMHI-ORSTOM*. En H. Lachowicz, G. Plaza, & R. Cornejo (Eds.), *Terceras jornadas en ciencias de la tierra : resumenes*. Quito: EPN. Recuperado a partir de <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010042867>
- Vallejo, E. C. (2014). *Análisis de las crecidas presentadas en los ríos Tarqui, Yanuncay y Tomebamba desde 1997 hasta 2011*.
- Weier, & Herring, D. (2000, agosto 30). *Measuring Vegetation (NDVI & EVI)*. Recuperado a partir de <https://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/>
- Xu, Z. X., Takeuchi, K., & Ishidaira, H. (2004). *Correlation between El Niño–Southern Oscillation (ENSO) and precipitation in South-east Asia and the Pacific region. Hydrological Processes*, 18(1), 107-123. <https://doi.org/10.1002/hyp.1315>
- Zambrano, E. (1996). *El Niño*. Recuperado a partir de <http://www.oceandocs.org/handle/1834/2225>