



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**EFFECTOS DEL FENÓMENO “EL NIÑO” SOBRE LOS RECURSOS
HÍDRICOS DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO SAMALÁ, GUATEMALA**

Edwin Alberto Zárate de León

Asesorado por el Ing. Claudio César Castañón Contreras

Guatemala, abril de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EFFECTOS DEL FENÓMENO “EL NIÑO” SOBRE LOS RECURSOS
HÍDRICOS DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO SAMALÁ, GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

EDWIN ALBERTO ZÁRATE DE LEÓN

ASESORADO POR EL ING. CLAUDIO CÉSAR CASTAÑÓN CONTRERAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, ABRIL DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
EXAMINADOR	Ing. Nicolás de Jesús Guzmán Sáenz
EXAMINADORA	Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EFFECTOS DEL FENÓMENO “EL NIÑO” SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO SAMALÁ, GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 8 de mayo de 2017.

Edwin Alberto Zárate de León

Guatemala 29 de septiembre de 2020

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Coordinador, área de hidráulica
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Estimado Ingeniero Aguilar:

Reciba un cordial saludo, esperando que sus labores sean de éxito, por este medio me permito informarle que he asesorado al estudiante EDWIN ALBERTO ZÁRATE DE LEÓN, quien se identifica con registro universitario 2384 55211 1013, en su trabajo de graduación que lleva por título EFECTOS DEL FENÓMENO "EL NIÑO" SOBRE LOS RECURSOS HIDRICOS DE LA CUENCA ALTA DEL RIO SAMALA, GUATEMALA.

Luego de haber propuesto correcciones y el estudiante haberlas realizado, APRUEBO este trabajo de graduación para que el mismo sea sometido a su consideración y posteriormente a su aprobación final.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Claudio César Castañón Contreras
Ingeniero Civil
Col. 5,829
Ing. Claudio Cesar Castañón Contreras
Asesor



Guatemala, 07 de octubre de 2,020


Ingeniero
Pedro Antonio Aguilar Polanco
Director de Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Aguilar Polanco:

Le informo que he revisado la tesis graduación, **EFFECTOS DEL FENOMENO “EL NIÑO” SOBRE LOS RECURSOS HIDRICOS DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO SAMALÁ, GUATEMALA**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil **Edwin Alberto Zárate de León, CUI:238452111013**, Registro Académico: 201313810, quien contó con la asesoría de **el Ing. Claudio César Castañón Contreras**, considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS



FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
U S A C

Ing. Rafael Enrique Morales Ochoa
Revisor del Departamento de Hidráulica

/mrrm.

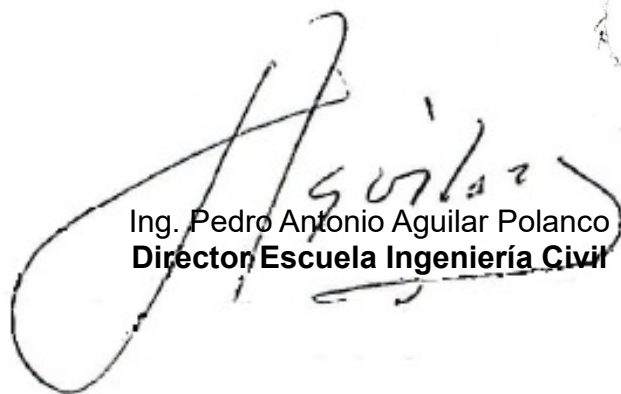




Guatemala, 08 de octubre de 2020
DEIC-TG-EIC-013-2020/paap

El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ingeniero Claudio Cesar Castañón Contreras y del revisor del Departamento de Hidráulica, Ingeniero Rafael Enrique Morales Ochoa, al trabajo de graduación del estudiante Edwin Alberto Zárate de León, **EFFECTOS DEL FENOMENO “EL NIÑO” SOBRE LOS RECURSOS HIDRICOS DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO SAMALÁ, GUATEMALA**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Director Escuela Ingeniería Civil



Interesado
Asesor
Jefe del Departamento de Hidráulica



DTG. 147.2021.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **EFFECTOS DEL FENOMENO "EL NIÑO" SOBRE LOS RECURSOS HIDRICOS DE LA CUENCA ALTA DEL RIO SAMALA, GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Edwin Alberto Zárate de León**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, abril de 2021

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por su gracia y misericordia en mi vida.

Mis padres

Jerónima de León Lux y Alejandro Zárate Coché, son la fuente de inspiración constante que me apoyan incondicionalmente.

Mis hermanos

Luis, Enma y Lesbia Zárate.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por la vida, y su misericordia en brindarme la oportunidad de conocimiento y aprendizaje constante.
- Mis padres** Por su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida, y su ejemplo de superación constante, el triunfo es para ellos.
- Mis hermanos** Por estar a mi lado en todo momento, demostrando su afecto y aprecio incondicional.
- Mi asesor** Ing. Claudio Cesar Castañón Contreras por compartir su conocimiento y tiempo incondicional durante la realización de este trabajo de graduación.
- Mis amigos** Por su apoyo constante durante nuestra formación académica.
- Pueblo de Guatemala** Por brindar la oportunidad de crecimiento profesional y desarrollo académico para cualquier persona que anhele cumplir sus metas universitarias.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. FENÓMENO EL NIÑO/OSCILACIÓN DEL SUR.....	1
1.1. Descripción del fenómeno	1
1.2. Antecedentes.....	3
1.3. Monitoreo.....	7
2. OBJETO DE ESTUDIO	13
2.1. Cuenca del río Salamá	13
2.1.1. Ubicación geográfica	14
2.1.2. Delimitación de la cuenca	15
2.1.3. Características morfométricas	17
2.1.4. Estaciones hidrométricas de la cuenca	17
3. METODOLOGÍA ESTADÍSTICA	19
3.1. Correlaciones	19
3.1.1. Coeficiente de correlación de Pearson	20
3.2. Correlación múltiple.....	22
3.3. Correlación canónica.....	22
3.4. Varianza y covarianza	23

3.4.1.	Varianza	24
3.4.2.	Covarianza	24
3.5.	Tablas de contingencia	25
3.6.	Prueba exacta de Fisher	26
4.	VARIABLES DE ESTUDIO	29
4.1.	Hidrología de la cuenca.....	29
4.1.1.	Precipitación.....	29
4.1.2.	Caudal.....	36
4.2.	Nivel oceánico.....	37
4.2.1.	Temperatura superficial del mar.....	38
4.3.	Nivel atmosférico.....	40
4.3.1.	Presión atmosférica.....	40
5.	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	43
5.1.	Precipitación.....	43
5.2.	Caudal.....	61
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	65
	CONCLUSIONES.....	71
	RECOMENDACIONES	73
	BIBLIOGRAFÍA.....	75

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ciclo El Niño.....	3
2.	Descripción de regiones de El Niño para monitorear las temperaturas de las aguas superficiales del océano pacifico tropical ..	10
3.	Comportamiento ONI- periodo 1980-2017	11
4.	Comportamiento IOS – periodo 1980-2017.....	11
5.	Delimitación cuenca alta del río Samalá y sus municipios	15
6.	Polígonos de Thiessen cuenca alta del río Samalá	30
7.	Comportamiento histórico mensual de la precipitación en la cuenca alta del río Samalá, periodo 1980 – 2017.....	30
8.	Comportamiento histórico mensual de la precipitación en la estación Tonicapán, periodo 1980 – 2017	31
9.	Comportamiento histórico mensual de la precipitación en la estación Cuatro Caminos, periodo 1980 – 2017	32
10.	Comportamiento histórico mensual de la precipitación en la estación Zunil, periodo 1980 – 2017	33
11.	Comportamiento histórico mensual de la precipitación en la estación Santa María de Jesús, periodo 1980 – 2017	34
12.	Comportamiento histórico mensual de la precipitación en la estación Labor Ovalle, periodo 1980 – 2017.....	35
13.	Ubicación de estaciones hidrométricas en la cuenca alta del río Samalá.....	36
14.	Comportamiento histórico mensual del caudal en la estación El Túnel, periodo 1980 – 2017	37
15.	TSM estándar El Niño región 1+2	38

16.	TSM estándar El Niño región 3	39
17.	TSM estándar El Niño región 4	39
18.	TSM estándar El Niño región 3.4	40
19.	Comportamiento de la presión atmosférica	41
20.	Presión atmosférica Darwin 1980-2017	42
21.	Presión atmosférica Tahití 1980-2017	42
22.	Comportamiento de la precipitación durante el evento de El Niño	59
23.	Comportamiento de la precipitación durante el evento de ENSO- neutral.....	59
24.	Comportamiento de la precipitación durante el evento de La Niña.....	60

TABLAS

I.	Registro de días sin lluvia en las estaciones durante agosto de 2015....	6
II.	Hidroeléctricas ubicadas en la cuenca alta del río Samalá.....	14
III.	Departamentos / municipios ubicados en la cuenca alta del río Samalá	16
IV.	Características morfométricas de la cuenca alta del río Samalá	17
V.	Estaciones hidrométricas de la cuenca alta del río Samalá.....	18
VI.	Variables para análisis en la cuenca alta del río Samalá.....	20
VII.	Tabla de contingencia para evaluación de la precipitación y el fenómeno El Niño	25
VIII.	Tabla de contingencia y prueba exacta de Fisher para evaluación de la precipitación y el fenómeno “El Niño”	27
IX.	Probabilidad de ocurrencia del fenómeno El Niño durante abril periodo 1970 – 2017	44
X.	Probabilidad de ocurrencia del fenómeno El Niño durante mayo periodo 1970 – 2017	45
XI.	Probabilidad de ocurrencia del fenómeno El Niño durante junio periodo 1970 – 2017	46

XII.	Probabilidad de ocurrencia del fenómeno El Niño durante julio periodo 1970 – 2017	47
XIII.	Probabilidad de ocurrencia del fenómeno El Niño durante agosto periodo 1970 – 2017	48
XIV.	Probabilidad de ocurrencia del fenómeno El Niño durante septiembre periodo 1970 – 2017	49
XV.	Probabilidad de ocurrencia del fenómeno El Niño durante octubre periodo 1970 – 2017	50
XVI.	Probabilidad de ocurrencia del fenómeno El Niño y la precipitación durante noviembre periodo 1970 – 2017.....	51
XVII.	Correlación múltiple con variables TSM estándar, IOS anomalía y la precipitación	55
XVIII.	Modelos matemáticos para la evaluación de la precipitación en base a la correlación múltiple con tres meses de rezago para la TSM absoluta e IOS anomalía	56
XIX.	Probabilidad de ocurrencia del fenómeno El Niño y la precipitación promedio en la cuenca alta del río Samalá	57
XX.	Correlación múltiple entre la precipitación, TSM estándar e IOS anomalía, sobre la cuenca alta del río Samalá	60
XXI.	Modelo matemático para la evaluación de la precipitación sobre la cuenca alta del río Samalá para la TSM absoluta e IOS anomalía	61
XXII.	Prueba de Fisher y tablas de contingencia para el caudal en la cuenca alta del río Samalá	62
XXIII.	Correlación múltiple con variables TSM absoluta, IOS anomalía y el caudal.....	63
XXIV.	Modelo matemático para la evaluación del caudal sin meses de rezago para la TSM absoluta e IOS anomalía	63
XXV.	Meses en condiciones secas asociadas a El Niño.....	65
XXVI.	Meses en condiciones neutras asociadas a El Niño	66

XXVII.	Meses con condiciones lluviosas asociadas a El Niño.	66
XXVIII.	Meses en condiciones secas asociadas a La Niña.....	67
XXIX.	Meses en condiciones neutras asociadas a La Niña	68
XXX.	Meses en condiciones lluviosas asociadas a La Niña	68

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
N	Cantidad de muestra
r	Coefficiente de correlación de Pearson
°C	Grados centígrados
Km	Kilómetro
Km²	Kilómetro cuadrado
M³/S	Metros cúbicos por segundo
MB	Milibares
mm	Milímetros de lluvia
X	Variable independiente 1
Y	Variable independiente 2
Gwh	Vatios

GLOSARIO

Batitermógrafo	Instrumento consistente en un termómetro que permite medir y representar gráficamente la temperatura del agua de mar a distintas profundidades.
Boyas	Son señales flotantes situadas en el mar que comúnmente se encuentran ancladas al fondo. Pueden servir para distintas finalidades.
Caudal	Volumen de agua que fluye a través de una sección transversal de un río o canal en la unidad de tiempo.
Cuenca	Es el área geográfica por donde transita el agua hacia una corriente principal y luego hacia un punto común de salida, es también el territorio en el que ocurre el ciclo hidrológico.
El Niño	Fenómeno climático a gran escala de la atmósfera oceánica vinculado a un calentamiento periódico en las temperaturas de la superficie del mar en el Pacífico ecuatorial central y este-central.
INDE	Instituto Nacional de Electrificación.

Insivumeh	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
IOS	Está diseñado para medir la fuerza y la fase de la oscilación del sur. Se calcula utilizando desviaciones de lo normal en la diferencia de presión de aire superficial entre Tahití, Polinesia Francesa y Darwin, Australia.
La Niña	Enfriamiento periódico de las temperaturas de la superficie del océano en el pacífico ecuatorial central y este-central que ocurre cada 3 a 5 años.
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration,</i> Administración Nacional Oceánica y Atmosférica.
ONI	Se utiliza para identificar eventos cálidos (El Niño) y fríos (La Niña) en el océano Pacífico tropical. Se calcula como la media móvil de tres meses de las anomalías de la temperatura superficial del mar para la región “El Niño” 3.4.
Precipitación	Es la caída de agua desde la atmósfera hacia la superficie terrestre. La precipitación forma parte del ciclo del agua que mantiene el equilibrio y sustento de todos los ecosistemas.
TOGA	Programa de investigación sobre los océanos tropicales y la atmósfera mundial.

TSM

Temperatura superficial del mar.

Vientos alisios

Son vientos regulares y moderados, se encuentran a los 30° de latitud en dirección al ecuador, donde una parte de masa de aire retrocede de nuevo en dirección a la baja presión del ecuador en vez de proseguir hacia los polos.

RESUMEN

En la siguiente investigación, se describe el análisis del comportamiento de la precipitación y caudal en la cuenca alta del río Samalá, y su relación con los fenómenos de El Niño y de La Niña.

Fueron utilizados como variables independientes los índices oceanito-atmosféricos: ONI, IOS, y la temperatura superficial del mar (TSM), para determinar el comportamiento del fenómeno a través de tablas de contingencia, además, se efectuaron correlaciones múltiples para determinar la relación entre las variables independientes del fenómeno y la precipitación sobre la cuenca.

Las tablas de contingencia fueron analizadas con los percentiles 0,33 (indicador de eventos secos en la precipitación y caudal, 0,66 (indicador de los eventos lluviosos en la precipitación y caudal) y el intervalo de $0,33 < \text{media} < 0,66$ (indicador de eventos neutros en la precipitación y caudal). Así mismo, fue analizado el comportamiento de ONI, con valores de -0,5 (para eventos de El Niño), +0,5 (para eventos de La Niña) y el intervalo de $-0,5 < 0 < +0,5$ (para eventos de ENSO-neutral).

Las correlaciones múltiples fueron analizadas por el coeficiente de correlación de Pearson para cada una de las estaciones hidrométricas y la cuenca general, que permitió generar un modelo matemático que logra definir el comportamiento de la precipitación y caudal a través de las variables IOS anomalía, y la TSM estándar.

OBJETIVOS

General

Determinar los efectos de El Niño/oscilación del Sur (ENOS) sobre los recursos hídricos, a través de datos históricos en las estaciones hidrométricas ubicadas en la cuenca alta del río Samalá.

Específicos

1. Determinar las principales características morfométricas y fisiográficas de la cuenca alta del río Samalá hasta la Hidroeléctrica Santa María.
2. Realizar un análisis de correlación estadística, para determinar la relación del índice oceánico El Niño (ONI por sus siglas en inglés) y la precipitación de la cuenca alta del río Samalá.
3. Realizar un análisis de correlación estadística, para determinar la Relación del Índice Oceánico El Niño (ONI por sus siglas en inglés) y el caudal de la cuenca alta del río Samalá.
4. Realizar un análisis de correlación estadística, para determinar la relación del índice de oscilación del sur (IOS por sus siglas en inglés) y la precipitación de la cuenca alta del río Samalá.

5. Realizar un análisis de correlación estadística, para determinar la relación del índice de oscilación del sur (IOS por sus siglas en inglés) y el caudal de la cuenca alta del río Samalá.

6. Encontrar un modelo matemático que determine el comportamiento de la precipitación y caudal en la cuenca alta del río Samalá, a través de las variables independientes que inciden en el comportamiento de El Niño/oscilación del sur (ENOS).

INTRODUCCIÓN

El fenómeno El Niño-oscilación del sur (ENOS), también denominado El Niño en su fase cálida y La Niña en su fase fría, es un fenómeno que provoca una variabilidad climatológica a escala mundial, el cual se produce en ciclos de tres a siete años a través de la zona ecuatorial del océano Pacífico.

El Niño es provocado por la variación en los cambios de temperatura superficial del mar (TSM), y la reducción de los vientos alisios, que se comportan transportando las corrientes marítimas de las costas del pacífico ecuatorial hacia el pacífico occidental (en condiciones normales).

Cuando existe la reducción de los vientos alisios y el incremento de la temperatura superficial del mar (TSM), en el pacífico occidental provoca que el mar sea de menor densidad y que las corrientes marítimas sean invertidas del pacífico occidental hacia el pacífico ecuatorial, provocando que la zona de alta presión se convierta en zona de baja presión, y denote la variabilidad entre la precipitación de América Central y Suramérica.

En Guatemala, es de gran importancia realizar estudios que proyecten los efectos que el fenómeno El Niño provoca en las regiones del país, considerando que incide en la reducción en la precipitación a nivel nacional y, por lo tanto, provoca la reducción en caudales y recarga hídrica subterránea, que ocasionan el desabastecimiento de agua potable en las diferentes regiones del país. La reducción de caudales incide en la reducción de energía hidráulica y provoca reducción en los cultivos a nivel nacional.

Por lo tanto, es necesario conocer los parámetros que puedan predecir el comportamiento del fenómeno e informar a las autoridades competentes para el abastecimiento óptimo del recurso hídrico en sus regiones.

En la siguiente investigación, se analiza la influencia del fenómeno El Niño sobre la región de la cuenca alta del río Samalá, y determinar si existe una correlación que influya en la alteración de la precipitación y el caudal en el área de estudio.

Se analizará a través de la recopilación de información de precipitación en 5 estaciones de influencia y una estación de caudal sobre la cuenca alta del río Samalá, la información está comprendida desde 1980 hasta 2017. Los datos recabados, serán analizados a través de modelos estadísticos cuantitativos para determinar la incidencia de ENOS sobre los recursos hídricos de la cuenca alta del río Samalá.

El capítulo uno presenta las características del fenómeno El Niño, los antecedentes y estudios realizados en Guatemala para determinar su influencia y efectos producidos, además del monitoreo que actualmente se utiliza para determinar las características y eventualidades en que se produce este fenómeno. Es importante mencionar que, a través del tiempo, el estudio de ENOS se ha intensificado y actualmente existen parámetros que ayudan a verificar la probabilidad de ocurrencia de este fenómeno.

El capítulo dos indica las características de la morfometría de la cuenca, áreas de influencia y la ubicación de las estaciones hidrométricas que aportarán la información de precipitación y caudal para el análisis estadístico.

El capítulo tres describe los modelos estadísticos por utilizar para el análisis de la información de cada estación hidrométrica y los índices de El Niño. Así mismo, describe las regiones y parámetros aceptables para determinar la incidencia del fenómeno sobre las variables dependientes de precipitación y caudal de la cuenca.

En el capítulo cuatro y cinco se analizarán las variables independientes, por el fenómeno El Niño, la temperatura superficial del mar (TSM), el índice oceánico (ONI), índice oscilación del sur (IOS)) y por el área de influencia. Se analizarán las variables de la precipitación y el caudal en las estaciones hidrométricas de la cuenca, para determinar un modelo matemático que permita calcular la precipitación y caudal a través de la temperatura superficial del mar (TSM) y el índice de oscilación del sur (IOS)

El capítulo seis incluye el análisis de resultados obtenidos de los modelos estadísticos realizados, contemplando una tabla de ocurrencia de los eventos de El Niño, La Niña y los meses en los cuales se presentan con mayor incidencia.

1. FENÓMENO EL NIÑO/OSCILACIÓN DEL SUR

El nombre del fenómeno fue dado con base a las observaciones realizadas por los pescadores del norte del Perú a fines del siglo XIX, en el que apreciaron que todos los años hacia finales de diciembre, cerca de la navidad, solía ocurrir un incremento en la temperatura del agua del mar, la cual era observable a lo largo de la costa norte.

Este calentamiento y ocurrencia del fenómeno provocaba una disminución en el ascenso de las aguas profundas con alto contenido de nutrientes y que radicaba directamente en la disminución de la pesca en esa área. Por lo tanto, atribuyeron este calentamiento a la llegada de una corriente marina de aguas cálidas a la que llamaron la corriente de El Niño.¹

1.1. Descripción del fenómeno

El término El Niño se refiere al fenómeno climático a gran escala entre la atmósfera y el océano, vinculado a un calentamiento periódico en las temperaturas de la superficie del mar en el Pacífico ecuatorial central y este-central, representa la fase cálida del ciclo El Niño / oscilación del sur (ENOS), y a veces se le conoce como un episodio cálido del Pacífico. El Niño se refirió originalmente a un calentamiento anual de las temperaturas de la superficie del mar a lo largo de la costa oeste de América del Sur tropical.

¹ SENAMHI, *El Fenómeno El Niño en el Perú*, 2014. <http://www.minam.gob.pe/notas-de-prensa/el-senamhi-presenta-informe-anual-2014-ante-la-llegada-del-fenomeno-el-nino/>.

El Centro de Predicción Climática de la Agencia del Océano y la Atmósfera (CPC por sus siglas en inglés), que es parte del Servicio Meteorológico Nacional de Estados Unidos de América, declara el inicio de un episodio de El Niño cuando la anomalía de temperatura en la superficie del mar promedio de 3 meses excede 0,5 °C en el Pacífico ecuatorial de la región 3,4 (entre 5° N-5° S y 170° W-120°W)²

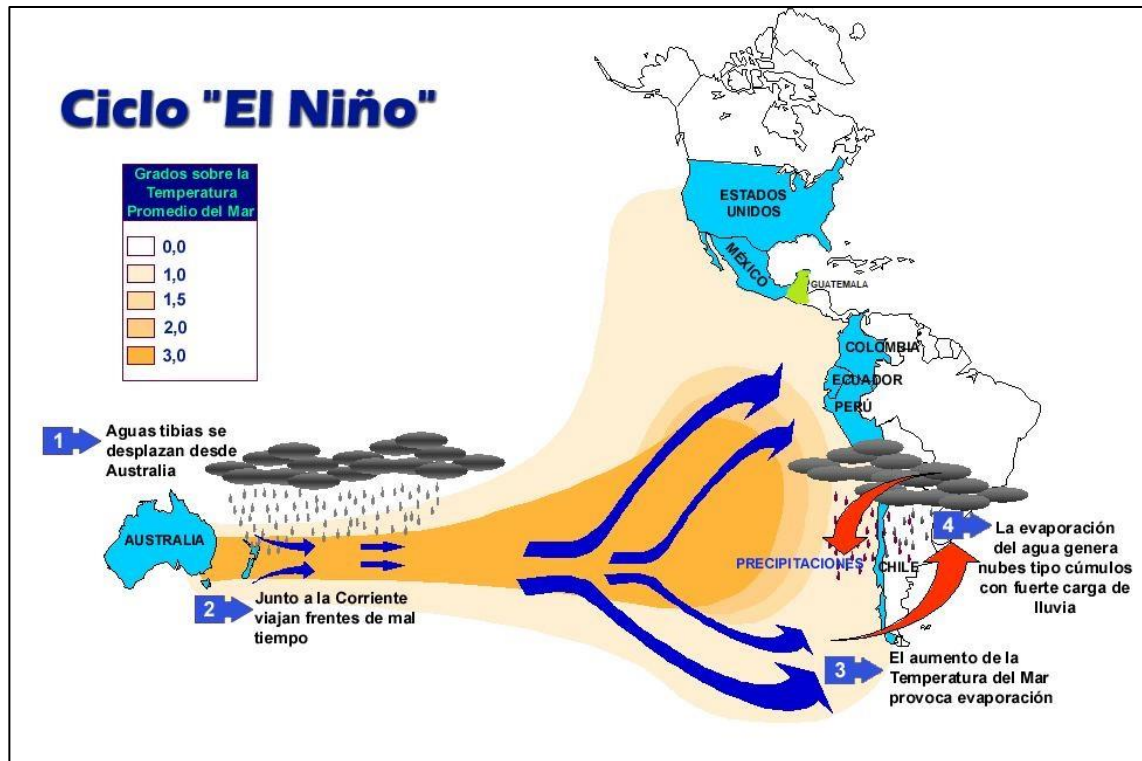
El Niño y La Niña, son fenómenos naturales que resultan de las interacciones entre la superficie del océano y la atmósfera sobre el Pacífico tropical. Los cambios en las temperaturas de la superficie del océano afectan los patrones de lluvia tropical y los vientos atmosféricos sobre el océano Pacífico, que a su vez impactan las temperaturas y las corrientes oceánicas.

Los patrones de lluvia tropical relacionados con El Niño y La Niña causan cambios en los patrones climáticos en todo el mundo. Los episodios de El Niño y La Niña generalmente ocurren cada 3-5 años. Sin embargo, en el registro histórico este intervalo ha variado de 2 a 7 años.

El Niño suele durar entre 9 y 12 meses, y La Niña suele durar entre 1 y 3 años. Ambos tienden a desarrollarse durante marzo a junio, alcanzan una intensidad máxima durante diciembre-abril y luego se debilitan durante mayo-julio. Sin embargo, los episodios prolongados de El Niño han durado 2 años e incluso hasta 3 o 4 años.

² National Weather Service Climate Prediction Center. *Preguntas frecuentes de El Niño y La Niña*. https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensofaq.shtml#pred.mon.

Figura 1. Ciclo El Niño



Fuente: Cuanto y como. *Cuánto dura el fenómeno de El Niño*. <https://cuantoycomo.com/cuanto-dura-el-fenomeno-el-nino/>. Consulta: 02 de febrero de 2020.

1.2. Antecedentes

En 1920, el científico inglés Gilbert Walker tratando de pronosticar las lluvias monzónicas en la India, examinó las condiciones de presión atmosférica de estaciones meteorológicas en Sur América, el norte de Australia e Indonesia.

Walker encontró que cuando la presión era baja en Australia e Indonesia (Pacífico oeste) aumentaba en Tahití (Pacífico central) y viceversa. Gilbert

Walker concluyó que existe una oscilación de la presión atmosférica a nivel del mar en el Pacífico ecuatorial, de forma tal que cuando sube en el este disminuye en el oeste y cuando aumenta en el oeste, baja en el este.

La cuantificación de esta manifestación atmosférica se hace por medio del Índice de Oscilación del Sur (IOS) que es calculado por la diferencia de anomalías de presión atmosférica entre Darwin en Australia y Tahití en el Pacífico Central.³

Sin embargo, fue hasta en la década de 1980 cuando la comunidad científica y los distintos gobiernos se ven obligados a dar atención a este fenómeno, debido al gran episodio de El Niño 1982-1983. Quince años más tarde, en 1997-1998, se repitió un episodio de mayor magnitud, denominado por la comunidad científica como el fenómeno del siglo. Sus impactos superaron los 96000 millones de dólares.⁴

En Guatemala se han realizado diferentes estudios para determinar la influencia del fenómeno El Niño en diferentes regiones, como lo indica el documento publicado para la generación de energía hidráulica en Chixoy, denominado: *El Fenómeno de El Niño y su impacto en la generación hidroeléctrica de Chixoy*.

Durante los efectos producidos por El Niño en 2009 y 2010, cuya anomalía máxima alcanzó un valor de +1,6 °C, el caudal registrado entre mayo y octubre del embalse del Pueblo Viejo de Chixoy, fue de 57,7 m³ /s, mientras que el promedio histórico (1980- 2008) corresponde a 85,9 m³ /s.

Debido a esta baja disponibilidad hídrica en el semestre, la generación de la central hidroeléctrica Chixoy se limitó a 816 GWh, lo que significó un déficit

³ FLORES Roberto y José RETANA. *“El Niño, una revisión bibliográfica.* <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20911/El+Ni%C3%B1o%2C%20una+revisi%C3%B3n+bibliogr%C3%A1fica>.

⁴ JONAS, Dobias. *“El fenómeno El Niño y su impacto en la generación hidroeléctrica Chixoy.* <http://www.cnee.gov.gt/pdf/informacion/EINinoImpactoChixoy082015.pdf>.

aproximado de 211 GWh en comparación con un año promedio, como fue en 2013 cuando se generaron 1,027GWh durante el semestre análogo. Este déficit de energía hidroeléctrica fue cubierto con generación a base de búnker.⁵

Por lo tanto, la producción de energía a través de este medio generó un incremento en los gases de efecto invernadero además de un incremento en el costo de la distribución del servicio hacia las comunidades, afectando directamente a la economía guatemalteca.

De acuerdo con el análisis climatológico efectuado por el Departamento de Investigación y Servicios Climáticos de INSIVUMEH en el *Boletín Climático No. 10-2015 Condiciones de Agosto, evolución del fenómeno de El Niño y la perspectiva climática de septiembre de 2015*.

El fenómeno El Niño, en 2015, fue catalogado como uno de los eventos de mayor incidencia a nivel nacional, considerando una irregularidad en la época lluviosa en toda la región del país, como lo describe el siguiente cuadro de análisis de días sin lluvia en diferentes estaciones durante agosto de 2015.

⁵ ELÍAS, José. *El País*. "La sequía devasta Guatemala".
https://elpais.com/internacional/2015/08/22/actualidad/1440196284_337185.html.

Tabla I. **Registro de días sin lluvia en las estaciones durante agosto de 2015**

No.	Estación	Días sin lluvia	No.	Estación	Días sin lluvia
1	Pasabien, Zacapa	22	20	Potrero Carrillo, Jalapa	19
2	Albores	22	21	Labor Ovalle, Quetzaltenango	19
3	San Agustín Acasaguastlán, El Progreso	21	22	Playa Grande, Ixcán, El Quiché	19
4	San Jerónimo, Baja Verapaz	21	23	El Pato, Sayaxché, Petén	19
5	San Pedro Ayampuc, Guatemala	21	24	Quezada, Jutiapa	19
6	Huehuetenango	21	25	El Porvenir, Libertad, Petén	18
7	Champerico, Retalhuleu	21	26	La Unión, Zacapa	18
8	San Agustín Chixoy, Chisec, Alta Verapaz	20	27	Santiago Atitlán, Sololá	18
9	Las Vegas, Livingston, Izabal	20	28	Santa Cruz, El Quiché	18
10	La Fragua, Estanzuela, Zacapa	20	29	Poptún, Petén	18
11	Cubulco, Alta Verapaz	20	30	Jalapa	18
12	San Martín Jilotepeque, Chimaltenango	20	31	El Tigre, La Libertad, Petén	18
13	Santa Cruz Balanyá, Chimaltenango	20	32	Cenizas, Siquinalá, Escuintla	18
14	Chuitinamit, Sacapulas, El Quiché	20	33	Telenán, Panzos	18
15	Aereopuerto, Puerto San José, Escuintla	20	34	Chinique	18
16	Tecún Umán, Uytulá, San Marcos	20	35	Caserío el pinal	18
17	Totonicapán, Totonicapán	20	36	Bethel, La Libertad, Petén	17
18	Chachacúm, San José, Petén	20	37	Cobán, Alta Verapaz	17
19	Camotan, Chiquimula	19	38	INSIVUMEH, Guatemala	17

Fuente: elaboración propia, con información tomada de:

http://www.insivumeh.gob.gt/meteorologia/boletin_climatico/Boletin%20climatico%2010-2015.pdf. Consulta: 1 de junio de 2020.

Las prolongadas sequías que afectan al llamado Corredor Seco centroamericano, que comprende desde las deprimidas provincias del este de Guatemala hasta la frontera de Nicaragua con Costa Rica, han puesto de nuevo sobre el tapete una de las lacras más dolorosas de la región: la extrema vulnerabilidad del campesinado ante la irregularidad de la lluvia, que se traduce en cosechas perdidas y, en consecuencia, en hambre.

En Guatemala, el fenómeno tiene cifras: 296 817 familias que, según estadísticas de la Secretaría de Seguridad Alimentaria y Nutricional del Ministerio de Agricultura y del Programa Mundial de Alimentos de la ONU (PMA), en total alrededor de un millón de personas, de ellas 176 182 niños cuyos padres difícilmente pueden ofrecerles un plato de comida al día. El país

presenta uno de los índices de desnutrición infantil más altos del mundo: la mitad de sus niños padece desnutrición crónica, según el Unicef.⁶

El análisis del fenómeno El Niño a través de métodos estadísticos cuantitativos han sido utilizados en diferentes investigaciones que ayudan a determinar la influencia de este fenómeno en los recursos hídricos de diferentes cuencas en Guatemala.

Además del análisis del fenómeno El Niño en la generación de energía hidráulica en Chixoy, se realizó el análisis de *Efectos del fenómeno “El niño” en los recursos hídricos de la cuenca del río Chixoy* por Andrea Ester Rodríguez Alvarado, utilizando el método de correlaciones lineales y múltiples para determinar la influencia del fenómeno El Niño en la cuenca del río Chixoy.

Así mismo, en el estudio realizado por María Laura del Carmen de León de León (2017) denominado *Efectos del fenómeno el niño en los recursos hídricos en la subcuenca del río Aguacapa*, fue implementado la misma metodología para determinar los efectos producidos por el fenómeno en la región de la subcuenca del río Aguacapa.

1.3. Monitoreo

Gran parte del conocimiento actual sobre este fenómeno se obtuvo a partir de mediados de la década de 1980, cuando comenzó a desarrollarse el Programa de investigación sobre los océanos tropicales y la atmósfera mundial (TOGA), que culminó a mediados de la década de 1990.

⁶ ELÍAS, José. *El País*. “La sequía devasta Guatemala”. https://elpais.com/internacional/2015/08/22/actualidad/1440196284_337185.html.

Durante este experimento mundial TOGA, en el Pacífico tropical se midieron la temperatura del mar (superficial y a diferentes profundidades), el nivel del mar, la salinidad, y otros, usando gran variedad de medios: satélites, boyas fondeadas, boyas a la deriva y batitermógrafos no recuperables.

Esta enorme variedad de datos permitió calibrar y usar complejos modelos matemáticos que simulan el comportamiento del océano y de la atmósfera, así como los denominados modelos acoplados océano-atmósfera.⁷

Actualmente los científicos de NOAA y otras agencias utilizan una variedad de herramientas y técnicas para monitorear y pronosticar los cambios en el océano pacífico y el impacto de esos cambios en los patrones climáticos globales en el océano pacífico tropical.

El Niño se detecta por muchos métodos, incluidos los satélites, las boyas amarradas, las boyas a la deriva, el análisis del nivel del mar y las boyas desechables. Muchos de estos sistemas de observación oceánica eran parte del programa de la Atmósfera Global del Océano Tropical (TOGA) y ahora están evolucionando hacia un sistema operativo de observación de El Niño / oscilación del sur (ENSO).

NOAA también opera un barco de investigación, el KA'IMIMOANA, que se dedica a dar servicio al componente de red de atmósfera tropical del océano (TAO) del sistema de observación.

Los modelos de computadora grandes del océano y la atmósfera global, como los de los Centros Nacionales de Predicción Ambiental de NOAA, parte del Servicio Meteorológico Nacional, utilizan datos del sistema de observación

⁷ MARTELO, María Teresa. *El fenómeno El Niño*. p. 48-55.

ENSO como entrada para predecir El Niño. Se utilizan otros modelos para la investigación de El Niño, como los del Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos de NOAA y otras instituciones de investigación no gubernamentales.⁸

Los indicadores utilizados para medir la probabilidad de ocurrencia del fenómeno de El Niño y La Niña, están basados en la Temperatura Superficial del Mar (TSM), el índice oceánico (ONI) y el Índice de Oscilación del Sur (IOS) las cuales se miden en cuatro regiones muy bien definidas en la franja tropical del océano Pacífico.

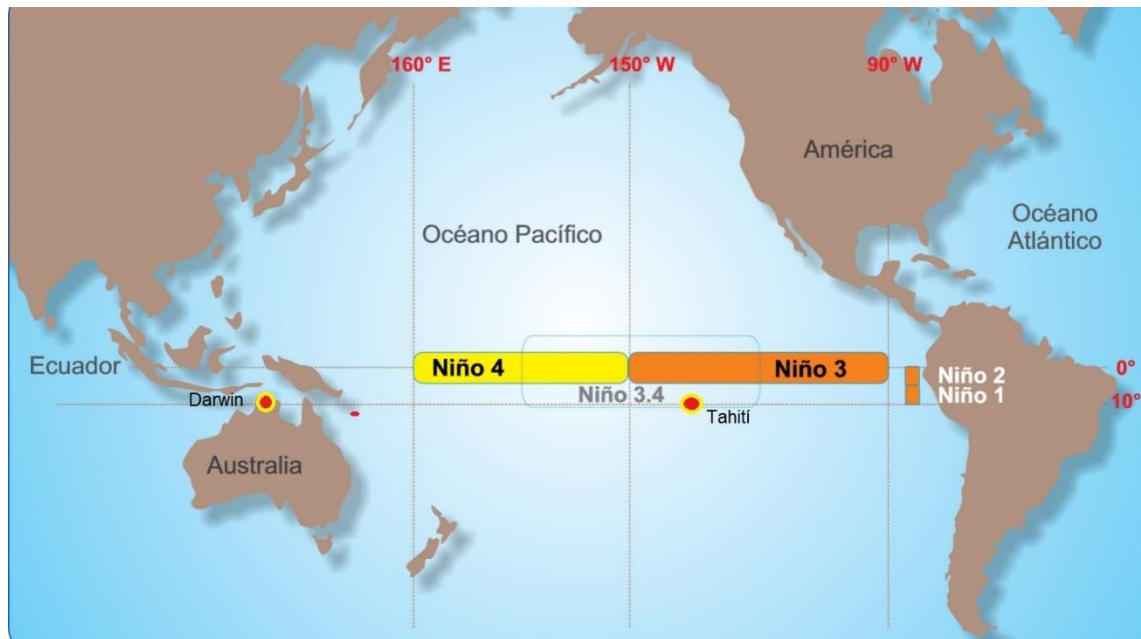
- Región occidental (Región El Niño 4): entre las latitudes 5° norte y 5° sur y las longitudes 160° este y 150° oeste.
- Región central (Región El Niño 3): entre las latitudes 5° norte y 5° sur y las longitudes 90° y 150° oeste.
- Región centro-occidental (Región El Niño 3.4): entre las latitudes 5° norte y 5° sur y las longitudes 120° y 170° oeste.
- Región oriental: (Región El Niño 1+2): Entre las latitudes 0° y 10° sur y las longitudes 90° y 80° oeste.⁹

En cada una de estas regiones se mide la temperatura de la superficie del mar en grados Celsius y se determinan sus anomalías, estableciendo la región con mayor incidencia en El Niño 3,4.

⁸ National Weather Service Climate Prediction Center. *Preguntas frecuentes sobre El Niño y la Niña*. https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensofaq.shtml#p_red_mon.

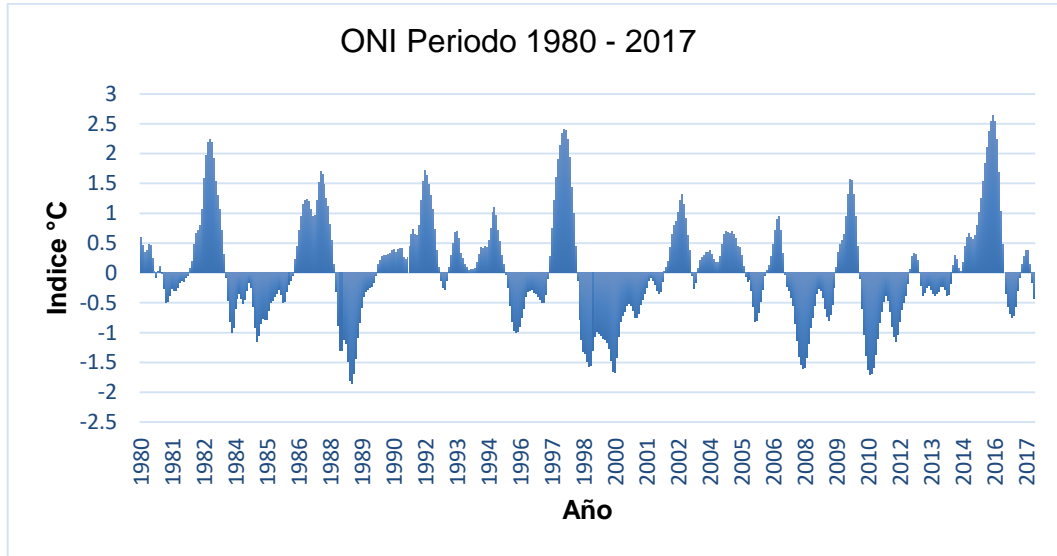
⁹ RAMÍREZ, Carlos. *Variabilidad climática local y su relación con eventos del fenómeno El Niño-oscilación del sur (ENSO) En la Vertiente del Pacífico*. p.18.

Figura 2. Descripción de regiones de El Niño para monitorear las temperaturas de las aguas superficiales del océano pacífico tropical



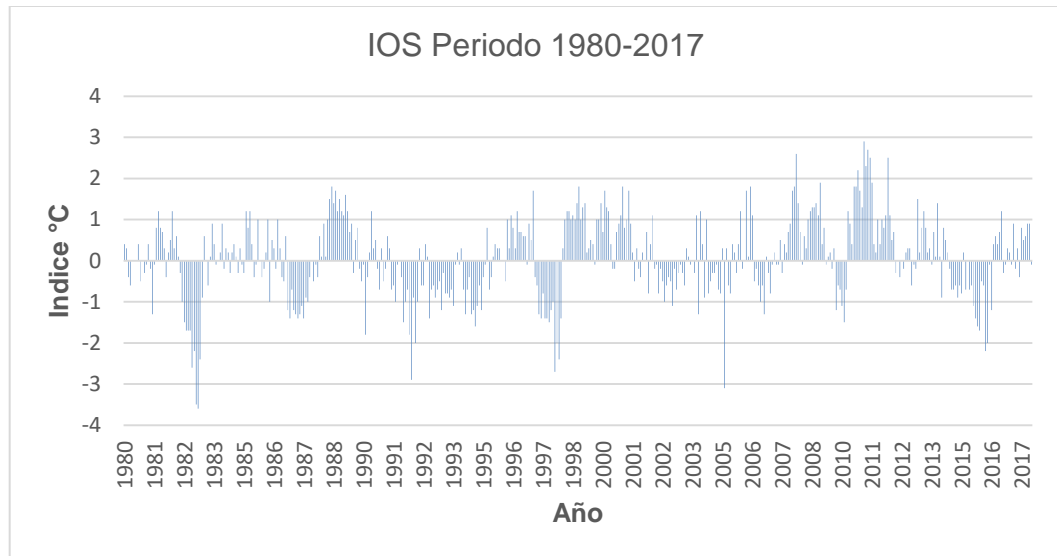
Fuente: SENAMHI Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. *El fenómeno El Niño en el Perú*. http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/07/Dossier-El-Ni%C3%B1o-Final_web.pdf. Consulta: 10 de febrero de 2020.

Figura 3. **Comportamiento ONI- periodo 1980-2017**



Fuente: elaboración propia, con datos de NOAA.

Figura 4. **Comportamiento IOS – periodo 1980-2017**



Fuente: elaboración propia, datos de NOAA.

Los registros del comportamiento mensual y anual de la temperatura superficial del mar (TSM), el índice oceánico (ONI) y el Índice de Oscilación del Sur (IOS), se pueden consultar en la siguiente dirección:

- <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>.
- https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php.

2. OBJETO DE ESTUDIO

2.1. Cuenca del río Salamá

La cuenca del río Salamá presenta un perfil de altitudes muy variado, con distribución de montañas en diferentes rumbos y altos volcanes, lo que influye en la lluvia.

Existe un cañón hacia la parte sur en jurisdicción de Cantel y Zunil, donde llegan los vientos contralisios, que transportan grandes volúmenes de vapor de agua que originan precipitaciones orográficas en la zona de la boca costa, donde son frecuentes las precipitaciones anuales entre 2000-4000 milímetros.

10

Muchos de los efluentes en la cuenca se originan a una altitud promedio de 3 000 msnm en la Sierra Madre. Sus fuertes pendientes cambian bruscamente a pendientes menores en la planicie costera, lo que genera un riesgo de inundaciones en la parte baja.¹¹

En el área de la cuenca alta, operan tres hidroeléctricas, que permiten el abastecimiento de energía eléctrica hacia el occidente del país.

¹⁰ DARDÓN, Jacobo; MORALES Cecilia. *¿Por qué tanta destrucción?; Las amenazas naturales y estructurales: Sistematización de la vulnerabilidad, la negligencia y la exclusión regional del altiplano occidental de la tormenta asociada Stan.* p. 37.

¹¹ CATHALAC. *Plan de adaptación Municipal hacia la adaptación Hídrica. Santa Cruz Muluá, Guatemala* p. 24.

Tabla II. **Hidroeléctricas ubicadas en la cuenca alta del río Samalá**

HIDROÉLECTRICAS UBICADAS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO SAMALÁ					
No.	Nombre	Río	Cota	Ubicación / Municipio	Capacidad Instalada en MW
1	Santiaguito, Hidroeléctrica Canadá	Samalá	1423.50 - 1016.00	Zunil y Quetzaltenango	47.40
2	Planta Hidroeléctrica Santa María	Samalá	1540.00 - 1426.00	Zunil y Quetzaltenango	6.88
3	Hidroeléctrica Cuevamaría	Samalá	2295.00 - 1250.00	Cantel y Quetzaltenango	9.30

Fuente: elaboración propia, con datos Dirección General de Energía, Departamento de Desarrollo Energético.

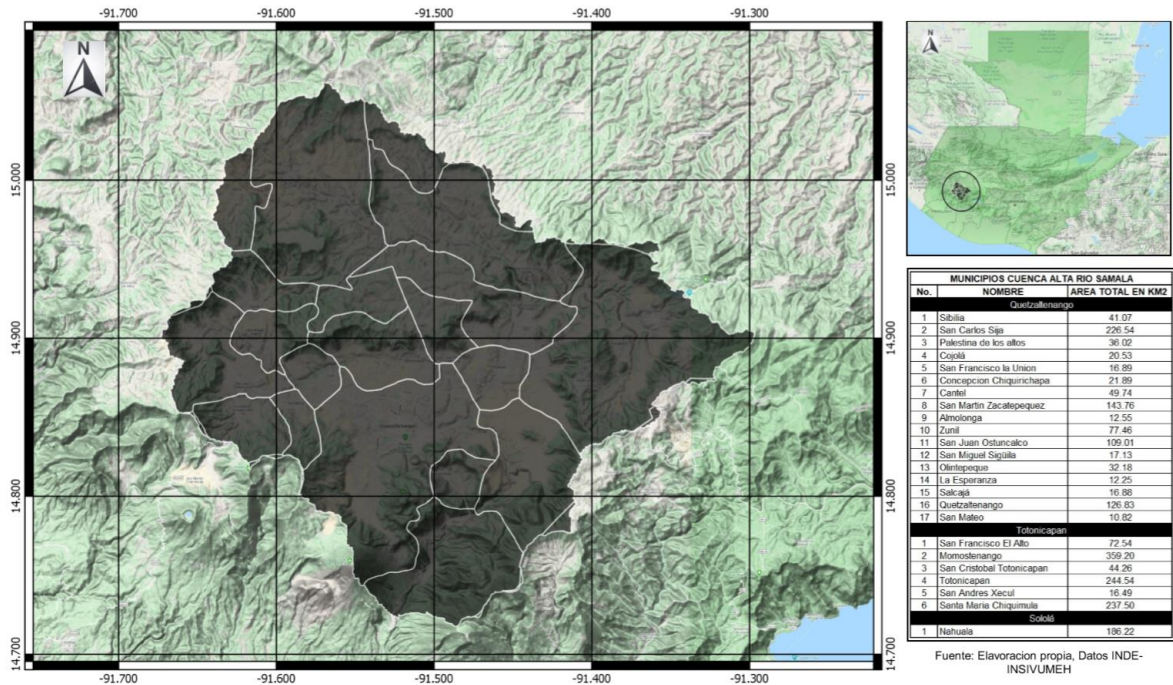
2.1.1. Ubicación geográfica

La cuenca del río Samalá se ubica entre los paralelos 14° 09' y 15° 03' de latitud norte y los meridianos 91° 17' y 91° 49' de longitud oeste. Es una de las 38 cuencas del país y se ubica en la vertiente del Pacífico.

La parte alta de la cuenca, conocida como cabecera de la cuenca hidrográfica. En esta subcuenca se da la mayor captación del agua de lluvias y ayuda con la regulación y suministro de agua, tanto en términos de cantidad como de calidad de agua. Todas las acciones que se realice en esta parte de la cuenca ya sean benéficas o perjudiciales a los recursos naturales, tendrán sus repercusiones en el resto de la cuenca.¹²

¹² Consorcio SEDEPEM/ALDES. GT. *Diagnóstico de la cuenca alta del río Samalá, Guatemala.* p. 2.

Figura 5. Delimitación cuenca alta del río Samalá y sus municipios



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 3.40.

2.1.2. Delimitación de la cuenca

La cuenca alta del río Samalá, posee una extensión territorial aproximada de 807 km² hasta la hidroeléctrica Santa María, que representa el 54 % de la superficie de la cuenca general. La cuenca colinda al oeste con las cuencas del río Ocosito, río Naranja y Cuilco; al norte con la cuenca del río Chixoy y al este, con las cuencas del Nahualate y Sis-Icán.

La cuenca alta del río Samalá, cuenta con tres departamentos delimitados en 24 municipios, establecidos en la siguiente tabla.

Tabla III. **Departamentos / municipios ubicados en la cuenca alta del río Samalá**

DEPARTAMENTOS Y MUNICIPIOS CUENCA ALTA DEL RÍO SAMALÁ			
No.	Departamento	Nombre	Área (Km2)
1	Quetzaltenango	Quetzaltenango	41.07
2	Quetzaltenango	San Carlos Sija	226.56
3	Quetzaltenango	Sibilia	41.07
4	Quetzaltenango	Palestina de los Altos	36.03
5	Quetzaltenango	Cajolá	20.53
6	Quetzaltenango	San Francisco la Unión	16.89
7	Quetzaltenango	San Juan Ostuncalco	109.04
8	Quetzaltenango	San Miguel Sigüila	17.13
9	Quetzaltenango	Olintepeque	32.18
10	Quetzaltenango	La Esperanza	12.25
11	Quetzaltenango	Salcajá	16.88
12	Quetzaltenango	San Mateo	10.82
13	Quetzaltenango	Concepción Chiquirichapa	21.90
14	Quetzaltenango	Cantel	49.73
15	Quetzaltenango	San Martin Sacatepequez	143.79
16	Quetzaltenango	Almolonga	12.55
17	Quetzaltenango	Zunil	77.46
18	Totonicapán	Momostenango	359.16
19	Totonicapán	San María Chiquimula	237.44
20	Totonicapán	San Francisco el Alto	72.64
21	Totonicapán	San Cristobal Totonicapán	244.54
22	Totonicapán	Totonicapán	244.47
23	Totonicapán	San Andrés Xecul	16.49
24	Sololá	Nahualá	186.19

Fuente: elaboración propia.

2.1.3. Características morfométricas

Las características físicas de una cuenca tienen una relación estrecha con el comportamiento de los caudales que transitan por ella. Los parámetros morfométricos de una cuenca integran un conjunto de estimaciones realizadas, en la mayoría de los casos, al iniciar un estudio hidrológico, con fines de aprovechamiento o control.¹³

En la siguiente tabla, se especifican las características morfométricas que conforman la cuenca alta del río Samalá:

Tabla IV. **Características morfométricas de la cuenca alta del río Samalá**

Características	Parámetros	
Área de la cuenca	807,00	Km ²
Perímetro	192,92	Km
Cota mínima	1 525,00	Msnm
Cota máxima	3 726,00	Msnm
Longitud cauce principal	46,76	Km

Fuente: elaboración propia.

2.1.4. Estaciones hidrométricas de la cuenca

En la siguiente tabla, se describen las estaciones hidrométricas por utilizar basados en la recolección de datos de precipitación y caudal recolectados desde 1980 hacia 2017.

¹³ LUX CARDONA, Benjamín. *Conceptos básicos de morfometría de cuencas hidrográficas*. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/1/Conceptos%20b%C3%A1sicos%20de%20Morfometr%C3%ADa%20de%20Cuencas%20Hidrogr%C3%A1ficas.pdf>.

Tabla V. **Estaciones hidrométricas de la cuenca alta del río Samalá**

ESTACIONES HIDROMÉTRICAS DE ESTUDIO EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO SAMALÁ			
NOMBRE DE ESTACIÓN PRECIPITACIÓN	LATITUD	LONGITUD	DEPARTAMENTO
Totonicapán	14° 54' 20" N	91° 22' 20" O	Totonicapán
Cuatro Caminos	14° 55' 40" N	91° 26' 50" O	Totonicapán
Zunil	14° 45' 26" N	91° 30' 04" O	Quetzaltenango
Santa María de Jesús	14° 43' 30" N	91° 31' 30" O	Quetzaltenango
Labor Ovalle	14° 54' 00" N	91° 31' 00" O	Quetzaltenango
CAUDAL			
El túnel	14° 45' 18" N	91° 30' 10" O	Quetzaltenango

Fuente: elaboración propia, con datos del INDE e INSIVUMEH.

3. METODOLOGÍA ESTADÍSTICA

3.1. Correlaciones

Estudia el grado de asociación o dependencia entre las dos variables. Es decir, estudiar la correlación significa analizar hasta qué punto es significativa la dependencia de una variable con la otra.

De esta manera, por ejemplo, cuando exista una dependencia funcional entre ambas variables diremos que tenemos una correlación perfecta (por ejemplo, radio y área de un círculo). Cuando, por el contrario, no exista ninguna dependencia entre las variables diremos que no hay correlación (ejemplo, primera letra del apellido y altura de un individuo).

El caso más interesante es el intermedio, cuando es posible que exista alguna correlación, aunque no perfecta, que habrá que cuantificar.¹⁴

Entre las correlaciones, existen diversos tipos las cuales están enfocadas en verificar la relación entre variables, como es el caso de la correlación lineal. Esta estudiará el grado en que la nube de puntos representada en un diagrama de dispersión se acerca a una recta.

Cuanto mejor se aproxime dicha nube a una recta, mayor será el grado de correlación lineal. De esta forma, el estudio de la correlación lineal está íntimamente ligado al de la regresión lineal.

¹⁴ GORGAS GARCÍA, Francisco; CARDIEL LÓPEZ, Nicolás; ZAMORANO CALVO, Jaime. *Estadística básica para estudiantes de ciencias*. p. 190.

En el siguiente cuadro, se especifican las variables independientes por utilizar, que corresponden al fenómeno El Niño, y las variables dependientes correspondientes al área de estudio, para determina la relación que existe entre dichas variables y determinar sus efectos producidos en los recursos hídricos de la cuenca alta del río Samalá.

Tabla VI. **Variables para análisis en la cuenca alta del río Samalá**

Variables Independientes		
Fenómeno	Variable	Descripción
El Niño	TSM Estándar	Temperatura Superficial del Mar Estándar
	TSM Anomalía	Temperatura Superficial del Mar Anomalía
	IOS Anomalía	Indice Oscilacion del Sur Anomalía
	ONI	Indice Oceánico El Niño

Variables Dependientes		
Área	Variable	Descripción
Cuenca alta Río Samalá	Precipitación	Variable analizada en 5 estaciones
	Caudal	Variable analizada en 1 estación de salida de la cuenca

Fuente: elaboración propia.

3.1.1. Coeficiente de correlación de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson, pensado para variables cuantitativas (escala mínima de intervalo), es un índice que mide el grado de covariación entre distintas variables relacionadas linealmente. Adviértase que decimos variables relacionadas linealmente. Esto significa que puede haber variables fuertemente relacionadas, pero no de forma lineal, en cuyo caso no procede a aplicarse la correlación de Pearson.

El coeficiente de correlación de Pearson es un índice de fácil ejecución e, igualmente, de fácil interpretación. Digamos, en primera instancia, que sus valores absolutos oscilan entre 0 y 1. Esto es, si tenemos dos variables X e Y, y definimos el coeficiente de correlación de Pearson entre estas dos variables como r entonces.

$$0 \leq r \leq 1$$

Decimos que la correlación entre dos variables X e Y es perfecta positiva cuando exactamente en la medida que aumenta una de ellas aumenta la otra. Esto sucede cuando la relación entre ambas variables es funcionalmente exacta.

El coeficiente de correlación de Pearson viene definido por la siguiente expresión.¹⁵

$$r_{x,y} = \frac{\sum Z_x Z_y}{N} \quad (3,1)$$

Esto es, el coeficiente de correlación de Pearson hace referencia a la media de los productos cruzados de las puntuaciones estandarizadas de X y de Y. Esta fórmula reúne algunas propiedades que la hacen preferible a otras. A operar con puntuaciones estandarizadas es un índice libre de escala de medida. Por otro lado, su valor oscila, como ya se ha indicado, en términos absolutos, entre 0 y 1.

¹⁵ WALPOLE, Ronald. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. p. 430.

Si por cualquier circunstancia no dispusiéramos de la información de estos estadísticos podríamos calcular $r_{x,y}$ recurriendo a la expresión en puntuaciones directas.

3.2. Correlación múltiple

La correlación parcial no involucra la noción de variables independientes y dependientes, sino que es una medida de interdependencia. Por otro lado, el coeficiente de correlación múltiple se aplica a la situación en que una variable, a la que se puede seguir llamando Y, ha sido aislada para examinar su relación con el conjunto de las otras variables. Este coeficiente de correlación viene determinado por la expresión:

$$R_{1.23} = \sqrt{\frac{r_{12}^2 + r_{13}^2 - 2 r_{12} r_{13} r_{23}}{1 - r_{23}^2}} \quad (3,2)$$

Existe una relación entre el coeficiente de correlación múltiple y los diferentes coeficientes de correlación parcial, que puede facilitar el cálculo de aquel, esta es:

$$\begin{aligned} 1 - R_{1.23}^2 &= (1 - r_{12}^2)(1 - r_{13.2}^2) \\ 1 - R_{1.234}^2 &= (1 - r_{12}^2)(1 - r_{13.2}^2)(1 - r_{14.23}^2) \end{aligned} \quad (3,3)$$

3.3. Correlación canónica

La técnica del análisis de la correlación canónica se entiende mejor considerándola como una extensión de la regresión múltiple y de la correlación. El análisis de regresión múltiple consiste en encontrar la mejor combinación

lineal de p variables independientes, X_1, X_2, X_p , para predecir la variable dependiente Y . La correlación múltiple es la correlación simple entre Y sus valores estimados por la ecuación de regresión, \hat{Y} . Por tanto, el objetivo en los análisis de regresión y correlación múltiple está en examinar la relación entre varias variables, X , y una variable, Y , basada en la siguiente expresión:

$$Y = A + B_1X_1 + B_2X_2 \quad (3,4)$$

Donde:

Y : variable dependiente

B_n : variables independientes

$A, B_1, B_2 \dots B_k$: coeficiente de correlación muestral

$$B_1 = \frac{[\sum x_2^2 - n(\bar{x}_2)^2][\sum X_1Y - n(\bar{X}_1)(\bar{Y})] - [\sum X_1X_2 - n(\bar{X}_1)(\bar{X}_2)][\sum X_2Y - n(\bar{X}_2)(\bar{Y})]}{[\sum x_1^2 - n(\bar{x}_1)^2][\sum x_2^2 - n(\bar{x}_2)^2] - [\sum X_1X_2 - n(\bar{X}_1)(\bar{X}_2)]^2} \quad (3,5)$$

$$B_2 = \frac{[\sum x_1^2 - n(\bar{x}_1)^2][\sum X_2Y - n(\bar{X}_2)(\bar{Y})] - [\sum X_1X_2 - n(\bar{X}_1)(\bar{X}_2)][\sum X_1Y - n(\bar{X}_1)(\bar{Y})]}{[\sum x_1^2 - n(\bar{x}_1)^2][\sum x_2^2 - n(\bar{x}_2)^2] - [\sum X_1X_2 - n(\bar{X}_1)(\bar{X}_2)]^2} \quad (3,6)$$

Este análisis está íntimamente relacionado con el análisis canónico discriminante y tiene ciertas propiedades análogas al análisis de componentes principales y al análisis factorial, en el que, en lugar de tratar de estudiar las dependencias internas entre las variables de un mismo grupo. En el caso de la correlación canónica lo que se estudia es la relación o dependencia entre dos grupos de variables.

3.4. Varianza y covarianza

La varianza y la covarianza son dos medidas utilizadas en las estadísticas para determinar la dispersión de los datos evaluados en una muestra (varianza) y el cambio de dos variables aleatorias que se encuentran juntas (covarianza).

3.4.1. Varianza

Esta es especialmente aconsejable cuando se usa la media aritmética como medida de tendencia central. Al igual que la desviación media, está basada en un valor promedio de las desviaciones respecto a la media. En este caso, en vez de tomar valores absolutos de las desviaciones, para evitar así que se compensen desviaciones positivas y negativas, se usan los cuadrados de las desviaciones. Esto hace además que los datos con desviaciones grandes influyan mucho en el resultado final. Se define entonces la varianza de una muestra con datos repetidos como:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2 n_i}{N - 1}. \quad (3,7)$$

3.4.2. Covarianza

La covarianza es una medida del grado de correlación, o asociación, entre las dos variables, al igual que ocurría con la covarianza de una variable estadística bidimensional. Un valor alto de la covarianza indicará una correlación (positiva o negativa, dependiendo del signo de la covarianza) importante (los valores de una variable tienden a aumentar al aumentar la otra, en el caso de covarianza positiva). Hay que indicar, sin embargo, que el que la covarianza sea nula no implica que las dos variables sean estadísticamente independientes.

3.5. Tablas de contingencia

La tabla de contingencia es un medio particular de representar simultáneamente dos caracteres observados en una misma población, si son discretos o continuos reagrupados en clases y distribuidos en filas y columnas. que verifica el grado de asociación entre ambas variables.

Para efectos de este estudio, se utilizaron las variables de ONI, para determinar la relación entre la precipitación mensual por cada estación hidrométrica y considerando los eventos de El Niño, La Niña y estado neutral en relación con ONI, para la precipitación se evaluaron los estados seco, neutro y lluvioso, basado en la siguiente tabla.

Tabla VII. **Tabla de contingencia para evaluación de la precipitación y el fenómeno El Niño**

Tabla de contingencia			
	NIÑO	NEUTRO	NIÑA
SECO			
NEUTRO			
LLUVIOSO			
Intervalos para determinar mes Seco, Neutro y lluvioso.			
Mes Seco	Precipitación < Percentil 0.33		
Mes Neutro	Percentil 0.33 < Precipitación < Percentil 0.66		
Mes Lluvioso	Precipitación > Percentil 0.66		
Intervalos para determinar eventos de "El Niño", "La Niña" y Enso-"Neutral"			
La Niña	ONI < -0.50		
Enso-Neutral	0.5 < ONI < 0.5		
El Niño	ONI > 0.50		

Fuente: elaboración propia.

3.6. Prueba exacta de Fisher

La prueba se basa en el nivel de ajuste que existe entre la frecuencia de ocurrencia de las observaciones en una muestra observada y las frecuencias esperadas que se obtienen a partir de la distribución hipotética. Al comparar las frecuencias observadas con las frecuencias esperadas correspondientes debemos decidir si es posible que tales discrepancias ocurran como resultado de fluctuaciones del muestreo.

El criterio de decisión que aquí se describe no se debería utilizar a menos que cada una de las frecuencias esperadas sea, por lo menos, igual a 5.¹⁶

En la siguiente tabla, se detalle el modelo de tabla por utilizar basado en el análisis de la prueba exacta de Fisher, que proporciona un ajuste entre los valores encontrados entre los eventos de El Niño, Enso-Neutral y La Niña, considerando dicha evaluación para las condiciones de precipitación en estado seco, neutro y lluvioso, y determinar el grado de confiabilidad de la relación y dependencia del fenómeno con la precipitación en el área de la cuenca alta del río Samalá.

¹⁶ WALPOLE, Ronald. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. p. 375.

Tabla VIII. **Tabla de contingencia y prueba exacta de Fisher para evaluación de la precipitación y el fenómeno El Niño**

Tabla de Contingencia				PRUEBA EXACTA DE FISHER		
	NIÑO	NEUTRO	NIÑA	SIGNIFICANCIA	PROBABILIDAD	CONCLUSIÓN
SECO				≤ 0.05%	≥ 0,95%	Dependiente
NEUTRO						
LLUVIOSO						
Tabla de Contingencia				PRUEBA EXACTA DE FISHER		
	NIÑO	NEUTRO	NIÑA	SIGNIFICANCIA	PROBABILIDAD	CONCLUSIÓN
SECO				> 0,05	< 0,95	Independiente
NEUTRO						
LLUVIOSO						

Fuente: elaboración propia.

4. VARIABLES DE ESTUDIO

4.1. Hidrología de la cuenca

Las variables analizadas en este estudio están basadas directamente a la conformación de la precipitación en 4 estaciones de registro hidrológico del INDE y de una estación de registro hidrológico del Insivumeh, por lo tanto, fueron analizadas las precipitaciones y caudales registradas en el periodo 1980-2017, contemplando un periodo de 37 años de registro de la precipitación en el área de la cuenca.

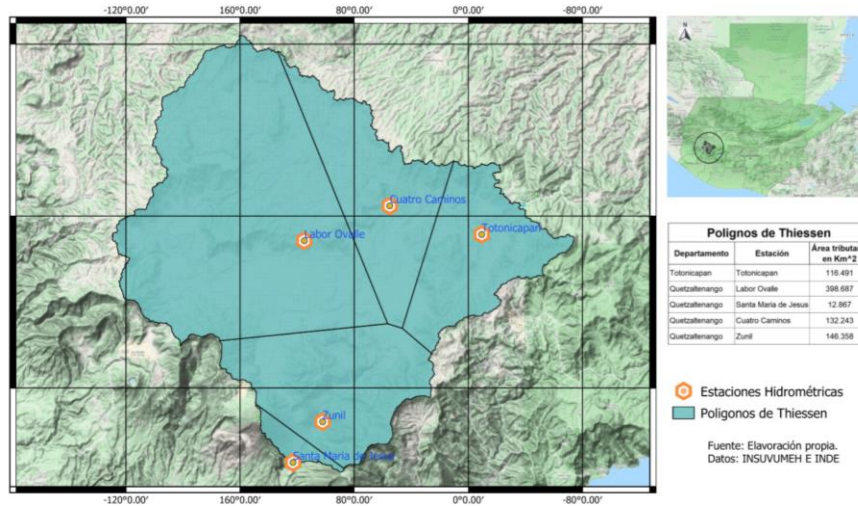
4.1.1. Precipitación

La precipitación promedio anual sobre la cuenca, fue analizada a través de la metodología de los polígonos de Thiessen, que consiste en evaluar el área tributaria y la precipitación promedio anual por cada estación hidrométrica ubicada en el área de la cuenca.

Por lo tanto, en la figura 6, se visualiza el mapa con las particiones de áreas tributarias por cada estación de análisis en la cuenca. Determinando que la precipitación promedio anual de la cuenca alta del río Samalá es equivalente a 992 mm de lluvia.

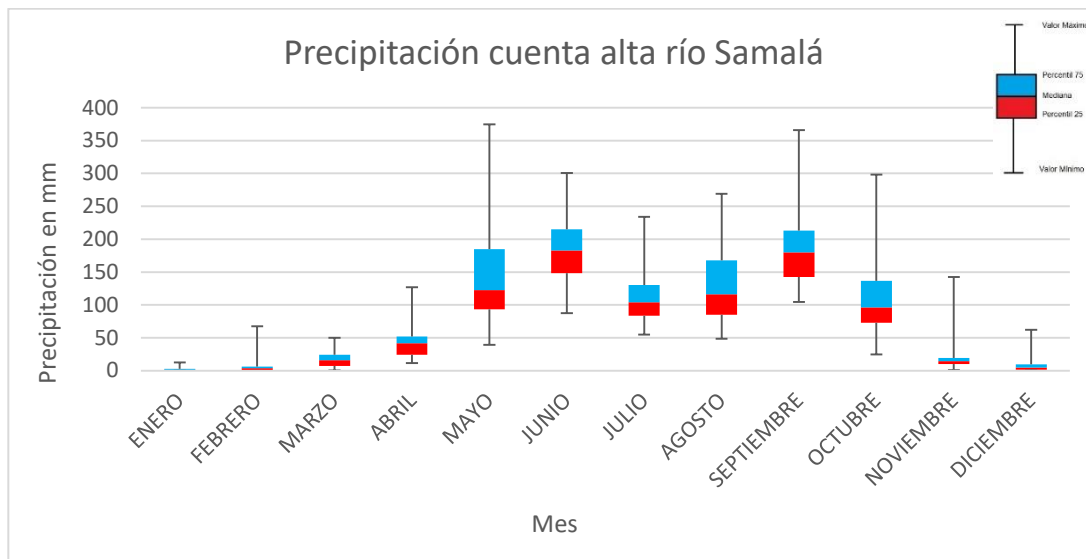
En la figura 7, se contempla el comportamiento de la precipitación de la cuenca alta del río Samalá.

Figura 6. **Polígonos de Thiessen cuenca alta del río Samalá**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 3.4.

Figura 7. **Comportamiento histórico mensual de la precipitación en la cuenca alta del río Samalá, periodo 1980 – 2017**

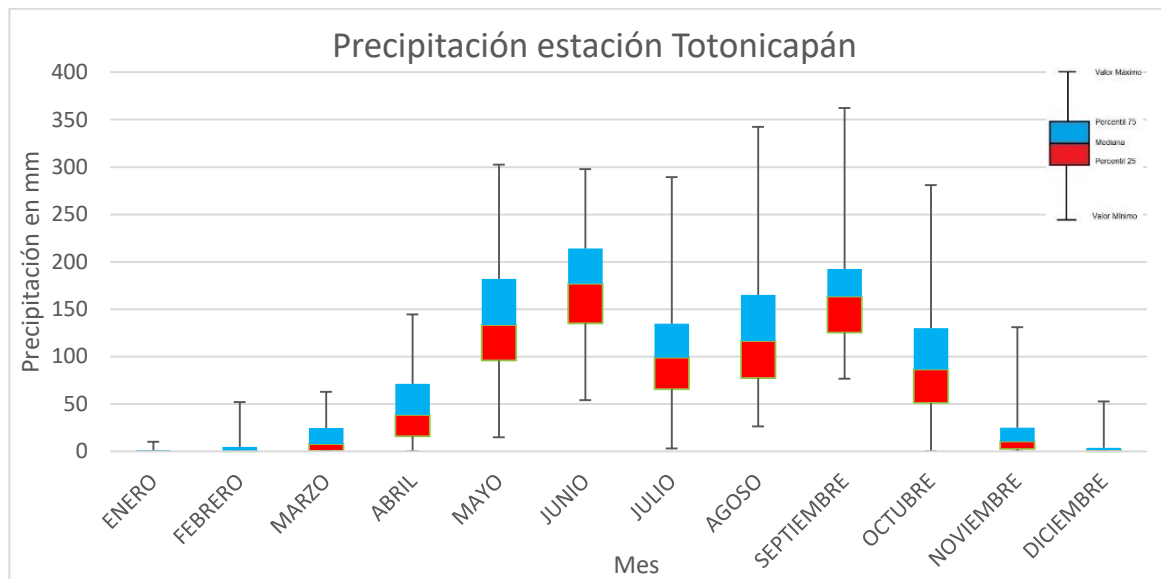


Fuente: elaboración propia, con datos de INDE.

En la gráfica de la precipitación general de la cuenca alta del río Samalá, la lluvia posee mayor incidencia de mayo a octubre, durante estos 6 meses, la concentración de lluvia es equivalente al 89 % de la precipitación total anual.

En las siguientes gráficas, se visualiza el comportamiento de la precipitación por cada estación meteorológica de la cuenca alta del río Samalá, en las cuales se visualiza que existe la mayor concentración de lluvia de mayo a octubre analizado desde 1980-2017.

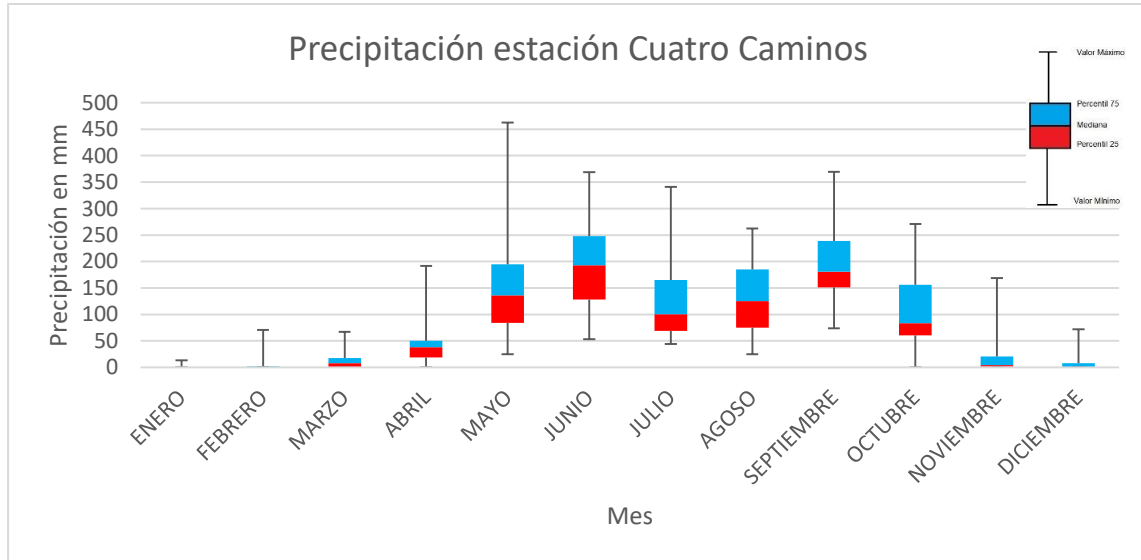
Figura 8. Comportamiento histórico mensual de la precipitación en la estación Tonicapán, periodo 1980 – 2017



Fuente: elaboración propia, con datos INDE.

En la gráfica de la precipitación de la estación Tonicapán, la lluvia posee mayor incidencia en los meses de mayo a octubre, durante estos 6 meses la concentración de lluvia es equivalente al 90 % de la precipitación total anual.

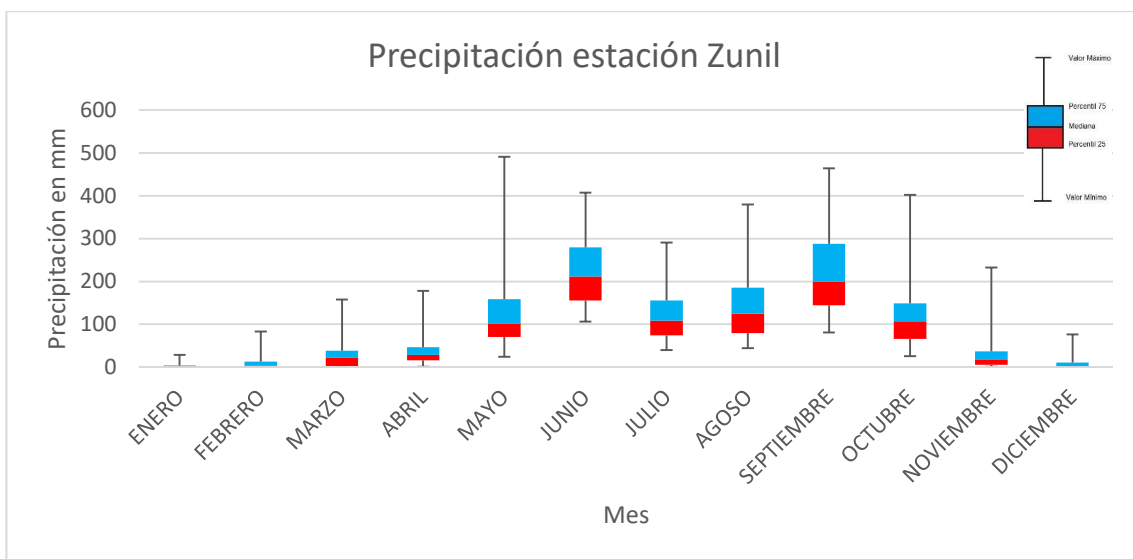
Figura 9. **Comportamiento histórico mensual de la precipitación en la estación Cuatro Caminos, periodo 1980 – 2017**



Fuente: elaboración propia, con datos INDE.

En la gráfica de la precipitación de la estación Cuatro Caminos, la lluvia posee mayor incidencia en los meses de mayo a octubre, durante estos 6 meses la concentración de lluvia es equivalente al 95 % de la precipitación total anual.

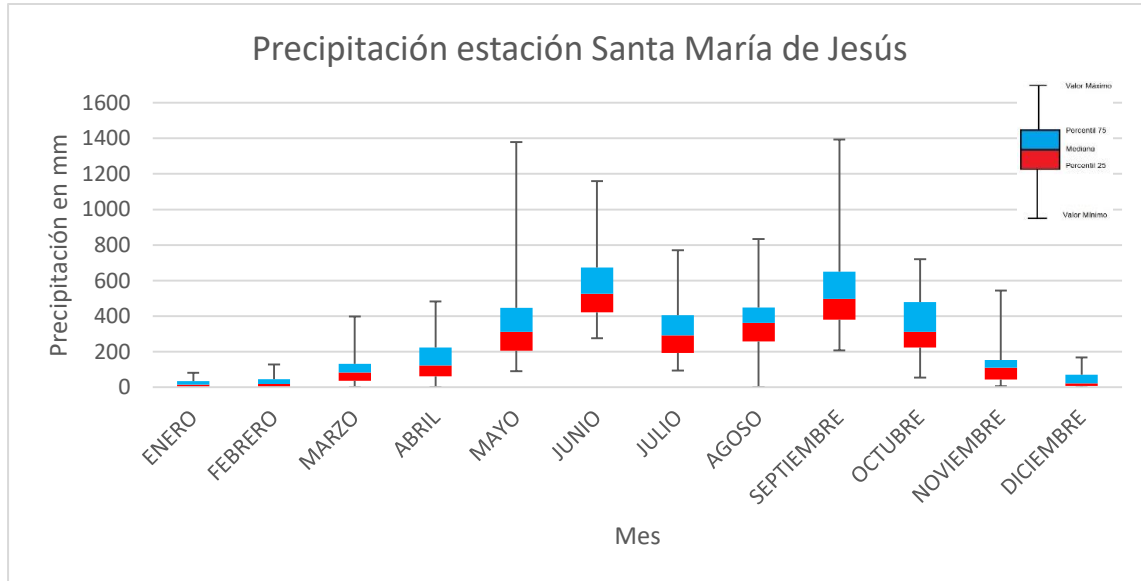
Figura 10. **Comportamiento histórico mensual de la precipitación en la estación Zunil, periodo 1980 – 2017**



Fuente: elaboración propia, con datos INDE.

En la gráfica de la precipitación de la estación Zunil, la lluvia posee mayor incidencia en los meses de mayo a octubre, durante estos 6 meses la concentración de lluvia es equivalente al 92 % de la precipitación sobre la estación.

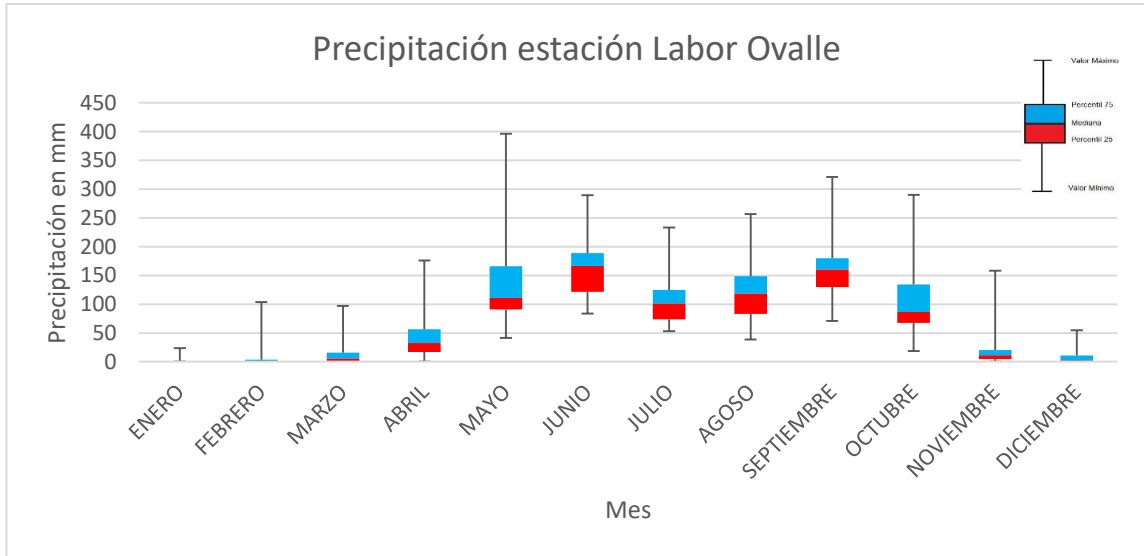
Figura 11. **Comportamiento histórico mensual de la precipitación en la estación Santa María de Jesús, periodo 1980 – 2017**



Fuente: elaboración propia, con datos de INDE.

En la gráfica de la precipitación de la estación Santa María de Jesús, la lluvia posee mayor incidencia en los meses de mayo a octubre, durante estos 6 meses, la concentración de lluvia es equivalente al 97 % de la precipitación total anual.

Figura 12. **Comportamiento histórico mensual de la precipitación en la estación Labor Ovalle, periodo 1980 – 2017**



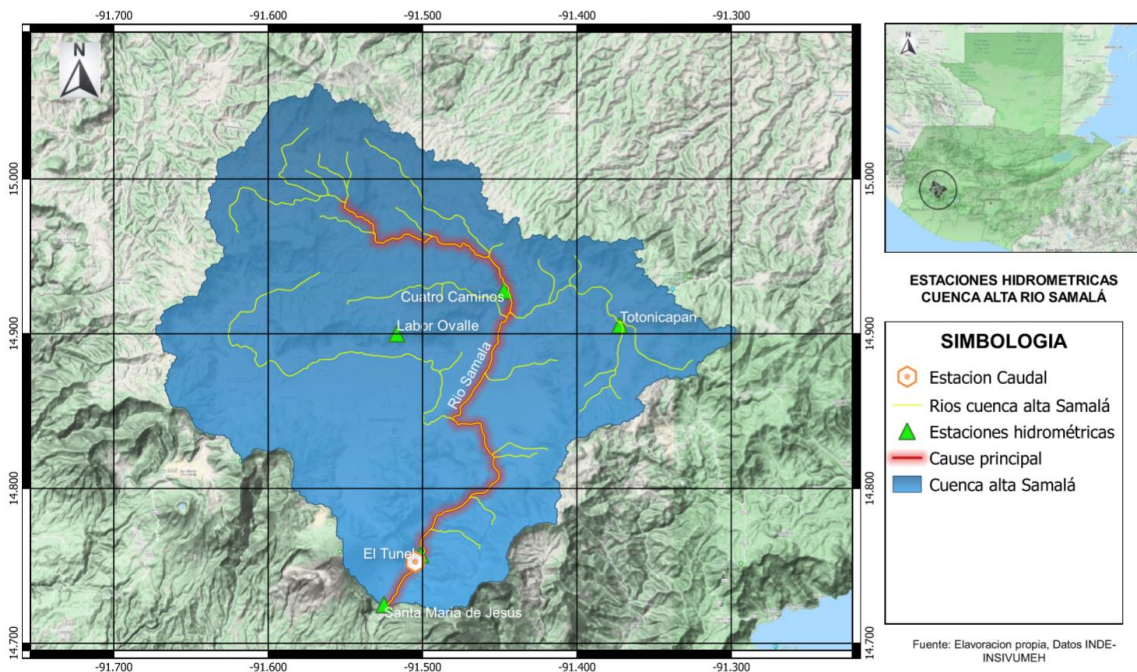
Fuente: elaboración propia, con datos de INSIVUMEH.

En la gráfica de la precipitación de la estación Labor Ovalle, la lluvia posee mayor incidencia en los meses de mayo a octubre, durante estos 6 meses, la concentración de lluvia es equivalente al 95 % de la precipitación total anual.

4.1.2. Caudal

En la figura 13, se detallan las estaciones hidrométricas utilizadas para determinar la precipitación sobre el área de la cuenca.

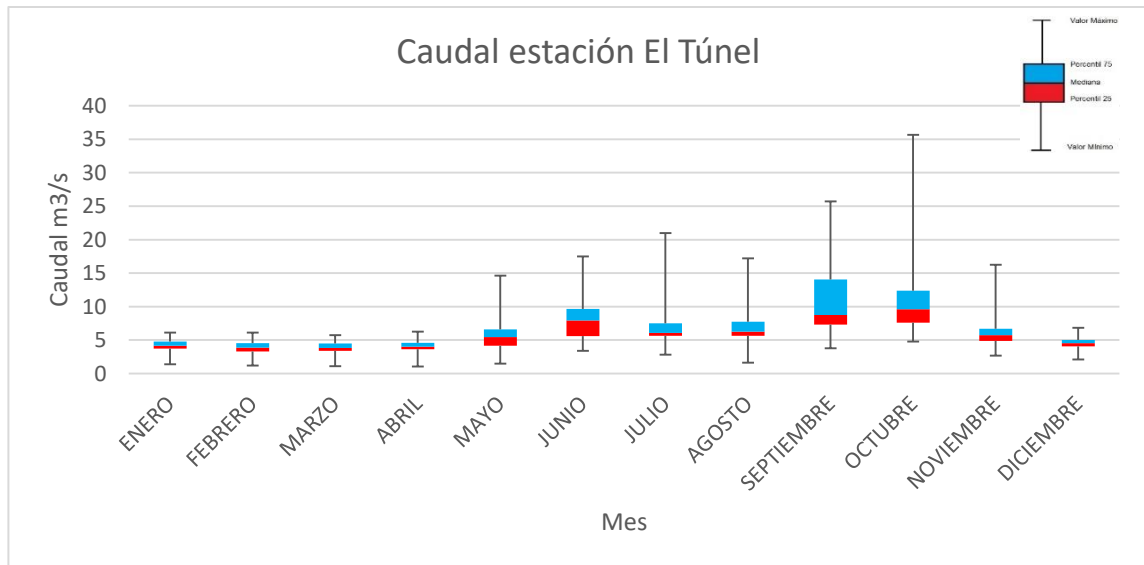
Figura 13. **Ubicación de estaciones hidrométricas en la cuenca alta del río Samalá**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS 3.4.

En la gráfica siguiente, se muestra el comportamiento del caudal en la estación El Túnel, los mayores caudales se registran de mayo a octubre, que corresponden también a los meses de mayor lluvia en la cuenca.

Figura 14. **Comportamiento histórico mensual del caudal en la estación El Túnel, periodo 1980 – 2017**



Fuente: elaboración propia, con datos de INDE.

4.2. Nivel oceánico

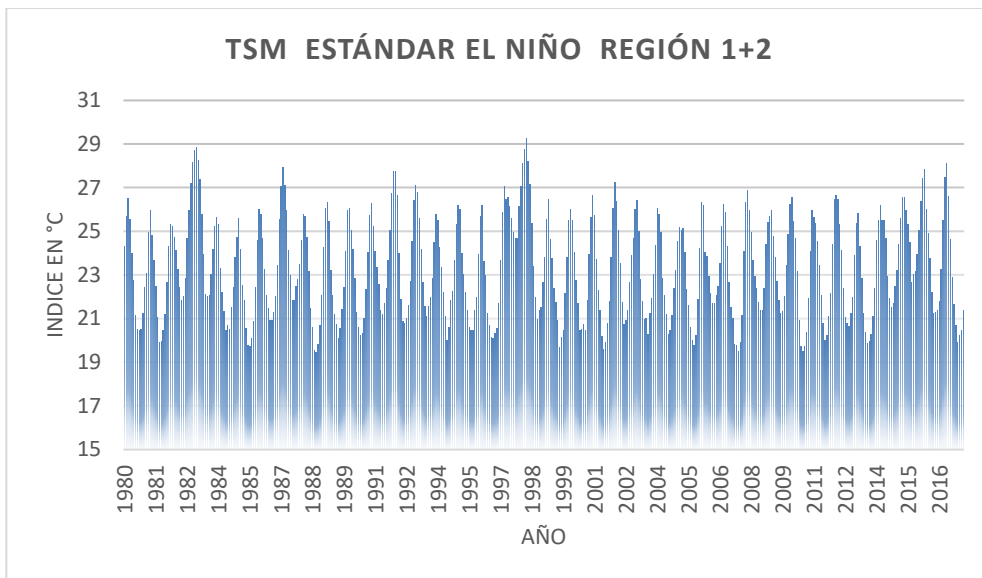
La cantidad de agua en la tierra se conserva con el mismo volumen, lo que cambia es su distribución a través de las fuentes de evaporación y escorrentía que se produce en el mundo, por lo tanto, el nivel oceánico se conserva a través del tiempo.

Para efectos de esta investigación, se tomará en cuenta la temperatura superficial del mar, la cual es una variable independiente de la precipitación que se produce en las diferentes áreas de la superficie terrestre.

4.2.1. Temperatura superficial del mar

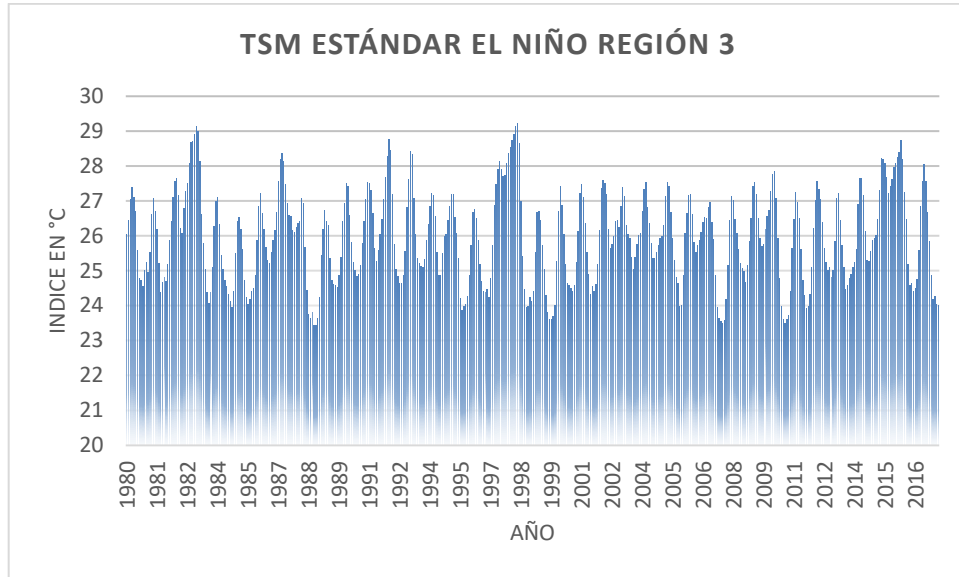
La temperatura superficial del mar fue considerada como variable independiente con sus valores estandarizados, por lo tanto, la temperatura fue analizada en las regiones El Niño 1+2, Niño +3, Niño +4 y Niño +3,4.

Figura 15. TSM estándar El Niño región 1+2



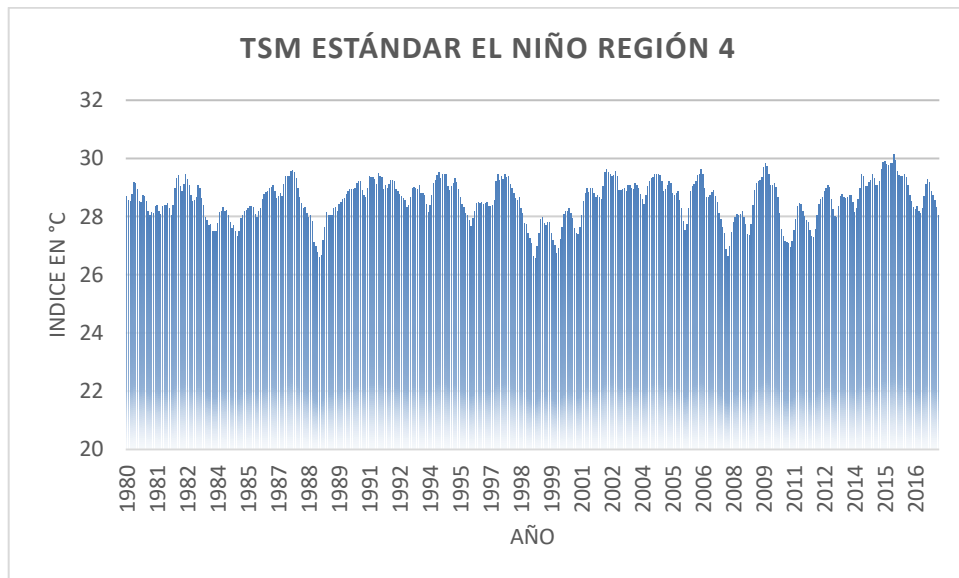
Fuente: elaboración propia, con datos de NOAA.

Figura 16. TSM estándar El Niño región 3



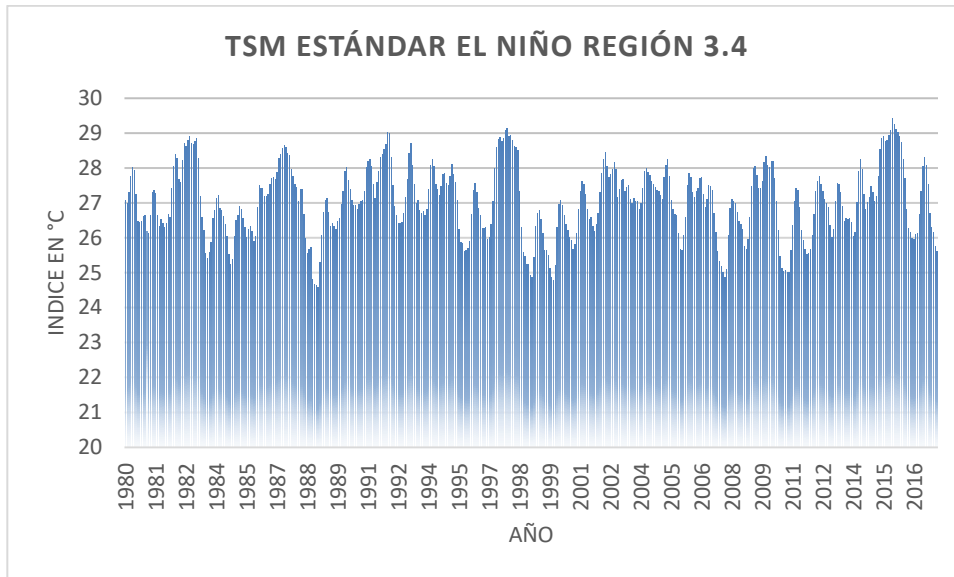
Fuente: elaboración propia, con datos de NOAA.

Figura 17. TSM estándar El Niño región 4



Fuente: elaboración propia, con datos de NOAA.

Figura 18. **TSM estándar El Niño región 3.4**



Fuente: elaboración propia, con datos de NOAA.

4.3. Nivel atmosférico

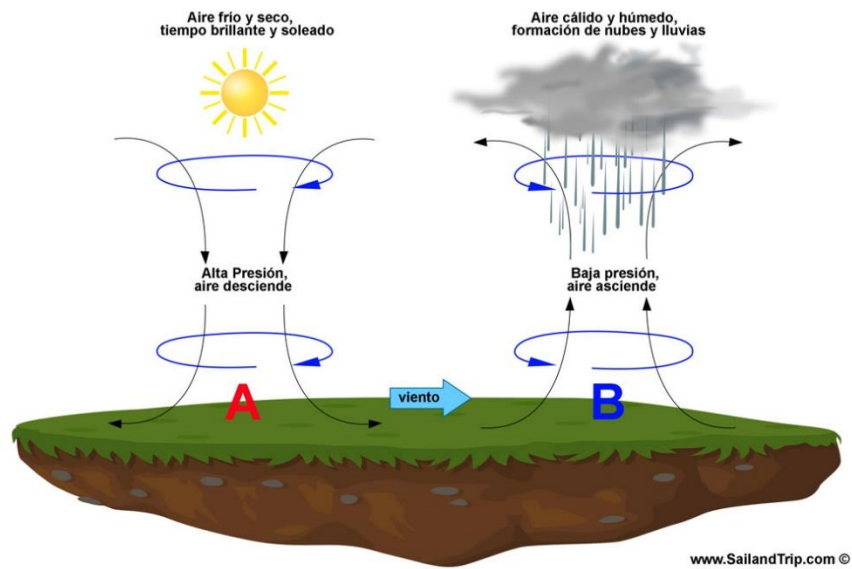
La atmosfera está dividida en diferentes capas que conforman la tierra (troposfera, estratosfera, mesosfera, ionosfera y exosfera), que en sus particularidades generan diferentes eventos de cambio climático, así mismo, es el punto donde se concentran los huracanes a través de los cambios de presión que parten del nivel superficial de aguas templadas del mar y ascienden hacia la troposfera a través de un sistema de baja presión que se combinan con vientos cálidos y fríos generados en la zona cerca del ecuador.

4.3.1. Presión atmosférica

La presión atmosférica es el peso de la columna de aire que hay sobre cualquier punto o lugar de la tierra y es por tanto el peso por unidad de

superficie. Cuanto mayor es la altura, menor es la presión atmosférica y cuanto menor es la altura y más se acerque a nivel del mar, mayor será la presión.

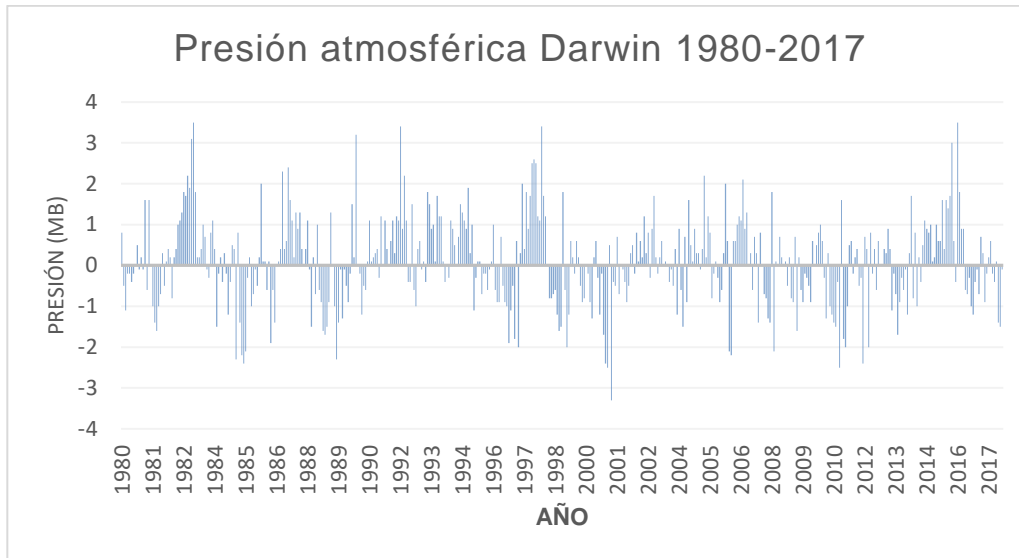
Figura 19. **Comportamiento de la presión atmosférica**



Fuente: Sailandtripo. *Presión atmosférica*. <https://sailandtrip.com/presion-atmosferica/>.

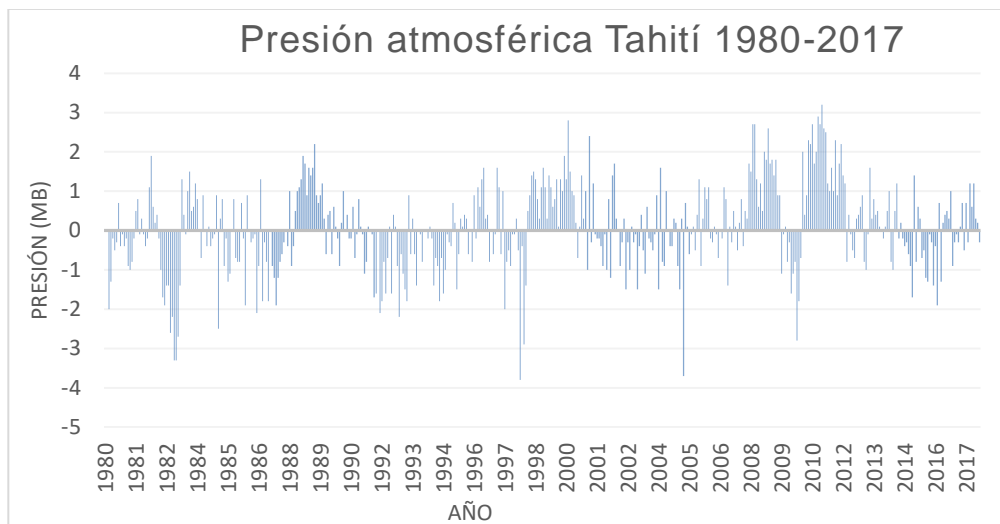
Consulta: 2 de enero de 2020.

Figura 20. **Presión atmosférica Darwin 1980-2017**



Fuente: elaboración propia, con datos de NOAA.

Figura 21. **Presión atmosférica Tahití 1980-2017**



Fuente: elaboración propia, con datos de NOAA.

5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

5.1. Precipitación

La variable de precipitación fue analizada con base a los fundamentos de clasificación de tablas de contingencia, que permite verificar el grado de asociación entre dos variables. Para efectos de este estudio, se utilizó la precipitación (variable dependiente) y ONI por cada mes presentado en las estaciones meteorológicas, considerando el periodo de tiempo analizado desde 1980 hasta 2017.

La clasificación y grado de asociación, para la precipitación fue analizada a través del percentil 0,33 y 0,66, para el cual fue considerado los valores menores a 0,33 en eventos secos, entre 0,33 y 0,66, eventos neutros y mayores a 0,66 eventos lluviosos.

Las clasificación y grado de asociación para ONI con la precipitación, fue analizada a través de los valores de +0,5 como eventos de El Niño, -0,5 eventos de La Niña, y para el intervalo de -0,5 a +0,5, fue considerado como evento Enso-Neutral.

Por lo tanto, el grado de dependencia e independencia entre ambas variables, fue analizado a través de la prueba exacta de Fisher, considerando el análisis a través de las tablas de contingencia determinando el valor mínimo de 0,05 para la dependencia entre ambas variables.

Así mismo, los meses significativos en esta investigación, fueron considerados durante el periodo del mes de abril hacia noviembre, derivado a la representación gráfica del comportamiento en la precipitación para cada estación hidrológica analizada en el capítulo 4.1.1

Tabla IX. **Probabilidad de ocurrencia del fenómeno El Niño durante abril periodo 1970 – 2017**

DESCRIPCIÓN	ABRIL			PRUEBA EXACTA DE FISHER			
	Niño	Neutro	Niña	Significancia	Probabilidad	Conclusión	
TOTONICAPAN	SECO	29 %	40 %	17 %	82 %	18 %	INDEPENDIENTE
	NEUTRO	43 %	28 %	33 %			
	LLUVIOSO	29 %	32 %	50 %			
CUATRO CAMINOS	Niño	14 %	40 %	33 %	58 %	42 %	INDEPENDIENTE
	SECO	14 %	40 %	33 %			
	NEUTRO	57 %	24 %	33 %			
ZUNIL	LLUVIOSO	29 %	36 %	33 %	30 %	70 %	INDEPENDIENTE
	Niño	14 %	44 %	17 %			
	SECO	14 %	44 %	17 %			
SANTA MARIA DE JESUS	NEUTRO	57 %	20 %	50 %	47 %	53 %	INDEPENDIENTE
	LLUVIOSO	29 %	32 %	50 %			
	Niño	29 %	32 %	50 %			
LABOR OVALLE	Niña	29 %	32 %	50 %	32 %	68 %	INDEPENDIENTE
	SECO	29 %	40 %	17 %			
	NEUTRO	57 %	20 %	50 %			
	LLUVIOSO	14 %	40 %	33 %			

Fuente: elaboración propia, con datos INDE – NOAA.

Durante abril, la tabla de contingencia analizada para la precipitación y ONI, indica la siguiente información: en condiciones de El Niño, en las 5 estaciones se conserva en estado neutro. En condiciones de ENSO-neutral, en tres estaciones se presentan en condiciones seca, en una estación se presenta en condición neutro, y en una estación se concentran los eventos en seco y lluvioso.

En condiciones de La Niña, en las cinco estaciones sus condiciones son variables, de la siguiente manera: en una estación la condición es lluvioso, en

dos estaciones la condición es neutro y en dos estaciones las condiciones son variables.

Por lo tanto, la prueba exacta de Fisher descarta la probabilidad de que los eventos de la precipitación y El Niño sean variables dependientes durante este mes.

Tabla X. **Probabilidad de ocurrencia del fenómeno El Niño durante mayo periodo 1970 – 2017**

DESCRIPCIÓN	MAYO			PRUEBA EXACTA DE FISHER			
	NIÑO	NEUTRO	NIÑA	SIGNIFICANCIA	PROBABILIDAD	CONCLUSIÓN	
TOTONICAPAN	SECO	57 %	29 %	29 %	45 %	55 %	INDEPENDIENTE
	NEUTRO	29 %	38 %	14 %			
	LLUVIOSO	14 %	33 %	57 %			
CUATRO CAMINOS	NIÑO	NEUTRO	NIÑA	07 %	93 %	INDEPENDIENTE	
	SECO	71 %	21 %				43 %
	NEUTRO	0 %	38 %				43 %
ZUNIL	LLUVIOSO	29 %	42 %	14 %	54 %	46 %	INDEPENDIENTE
	NIÑO	NEUTRO	NIÑA				
	SECO	57 %	25 %	43 %			
SANTA MARIA DE JESUS	NEUTRO	29 %	33 %	29 %	45 %	55 %	INDEPENDIENTE
	LLUVIOSO	14 %	29 %	57 %			
	NIÑO	NEUTRO	NIÑA				
LABOR OVALLE	SECO	71 %	25 %	29 %	33 %	67 %	INDEPENDIENTE
	NEUTRO	14 %	38 %	29 %			
	LLUVIOSO	14 %	38 %	43 %			

Fuente: elaboración propia, con datos INDE – NOAA.

Durante mayo, la tabla de contingencia analizada para la precipitación y ONI, indica la siguiente información: en condiciones de El Niño, en las 5 estaciones se conserva en estado seco. En condiciones de ENSO-neutral, en tres estaciones se presentan en condiciones lluviosa, en una estación se presenta en condición neutro, y en una estación se concentran los eventos en neutro y lluvioso.

En condiciones de La Niña, en las cinco estaciones sus condiciones son variables, de la siguiente manera, en una estación la condición es seca, en dos

estaciones la condición es lluviosa, en una estación la condición es neutra y en una estación la condición es seco y neutro.

Por lo tanto, la prueba exacta de Fisher descarta la probabilidad de que los eventos de la precipitación y El Niño sean variables dependientes durante este mes.

Tabla XI. **Probabilidad de ocurrencia del fenómeno El Niño durante junio periodo 1970 – 2017**

DESCRIPCIÓN	JUNIO			PRUEBA EXACTA DE FISHER		
	Niño	Neutro	Niña	Significancia	Probabilidad	Conclusión
TOTONICAPAN	SECO	44 %	30 %	96 %	04 %	INDEPENDIENTE
	NEUTRO	33 %	30 %			
	LLUVIOSO	22 %	39 %			
CUATRO CAMINOS	Niño	33 %	39 %	91 %	09 %	INDEPENDIENTE
	SECO	33 %	30 %			
	LLUVIOSO	33 %	30 %			
ZUNIL	Niño	56 %	30 %	11 %	89 %	INDEPENDIENTE
	SECO	44 %	26 %			
	LLUVIOSO	0 %	43 %			
SANTA MARIA DE JESUS	Niño	56 %	30 %	44 %	56 %	INDEPENDIENTE
	SECO	33 %	30 %			
	LLUVIOSO	11 %	39 %			
LABOR OVALLE	Niño	33 %	35 %	89 %	11 %	INDEPENDIENTE
	SECO	44 %	26 %			
	LLUVIOSO	22 %	39 %			

Fuente: elaboración propia, con datos INDE – NOAA.

Durante junio, la tabla de contingencia analizada para la precipitación y ONI, indica la siguiente información: en condiciones de El Niño, en tres estaciones se conserva en estado seco en una estación se conserva el estado neutro y en una estación existe la probabilidad del estado seco, neutro y lluvioso. En condiciones de ENSO-neutral, en cuatro estaciones se presenta en condiciones lluviosas, en una estación se presenta en condición seca.

En condiciones de La Niña, en tres estaciones sus condiciones son lluviosas, y en dos estaciones existe la probabilidad de seco, neutro y lluvioso.

Por lo tanto, la prueba exacta de Fisher descarta la probabilidad de que los eventos de la precipitación y El Niño sean variables dependientes durante este mes.

Tabla XII. **Probabilidad de ocurrencia del fenómeno El Niño durante julio periodo 1970 – 2017**

DESCRIPCIÓN	JULIO			PRUEBA EXACTA DE FISHER			
	NIÑO	NEUTRO	NIÑA	SIGNIFICANCIA	PROBABILIDAD	CONCLUSIÓN	
TOTONICAPAN	SECO	33 %	35 %	33 %	87 %	13 %	INDEPENDIENTE
	NEUTRO	50 %	27 %	0 %			
	LLUVIOSO	17 %	38 %	33 %			
CUATRO CAMINOS	NIÑO	50 %	35 %	17 %	67 %	33 %	INDEPENDIENTE
	SECO	33 %	27 %	50 %			
	NEUTRO	17 %	38 %	33 %			
ZUNIL	NIÑO	50 %	35 %	17 %	22 %	78 %	INDEPENDIENTE
	SECO	50 %	23 %	50 %			
	NEUTRO	0 %	42 %	33 %			
SANTA MARIA DE JESUS	NIÑO	40 %	31 %	50 %	88 %	12 %	INDEPENDIENTE
	SECO	40 %	31 %	17 %			
	NEUTRO	20 %	38 %	33 %			
LABOR OVALLE	NIÑO	67 %	35 %	0 %	07 %	93 %	INDEPENDIENTE
	SECO	0 %	31 %	67 %			
	NEUTRO	33 %	35 %	33 %			

Fuente: elaboración propia, con datos INDE – NOAA.

Durante julio, la tabla de contingencia analizada para la precipitación y ONI, indica la siguiente información: en condiciones de El Niño, en dos estaciones se conserva en estado seco, en una estación se conserva el estado neutro y en dos estaciones existe la probabilidad del estado seco y neutro. En condiciones de ENSO-neutral, en cuatro estaciones se presenta en condiciones lluviosas, en una estación se presenta en condición lluviosa y seca.

En condiciones de La Niña, en tres estaciones sus condiciones son neutras, y en dos estaciones existe la probabilidad de seco, neutro y lluvioso.

Por lo tanto, la prueba exacta de Fisher descarta la probabilidad de que los eventos de la precipitación y El Niño sean variables dependientes durante este mes.

Tabla XIII. **Probabilidad de ocurrencia del fenómeno El Niño durante agosto periodo 1970 – 2017**

DESCRIPCIÓN		AGOSTO			PRUEBA EXACTA DE FISHER		
		NIÑO	NEUTRO	NIÑA	SIGNIFICANCIA	PROBABILIDAD	CONCLUSIÓN
TOTONICAPAN	SECO	75 %	29 %	11 %	0 %	100 %	DEPENDIENTE
	NEUTRO	25 %	43 %	11 %			
	LLUVIOSO	0 %	29 %	78 %			
CUATRO CAMINOS		NIÑO	NEUTRO	NIÑA	0 %	100 %	DEPENDIENTE
	SECO	88 %	29 %	0 %			
	NEUTRO	13 %	48 %	11 %			
ZUNIL		NIÑO	NEUTRO	NIÑA	0 %	100 %	DEPENDIENTE
	SECO	88 %	29 %	0 %			
	NEUTRO	13 %	43 %	22 %			
SANTA MARIA DE JESUS		NIÑO	NEUTRO	NIÑA	0 %	100 %	DEPENDIENTE
	SECO	88 %	24 %	11 %			
	NEUTRO	0 %	48 %	22 %			
LABOR OVALLE		NIÑO	NEUTRO	NIÑA	0 %	100 %	DEPENDIENTE
	SECO	100 %	24 %	0 %			
	NEUTRO	0 %	43 %	33 %			
	LLUVIOSO	0 %	33 %	67 %			

Fuente: elaboración propia, con datos INDE – NOAA.

Durante agosto, la tabla de contingencia analizada para la precipitación y ONI, indica la siguiente información: en condiciones de El Niño, en las cinco estaciones se conserva en estado seco. En condiciones de ENSO-neutral, en las cinco estaciones se presenta en condición neutro

En condiciones de La Niña, en las cinco estaciones se presenta el estado lluvioso. La prueba exacta de Fisher indica la correlación de las variables del fenómeno El Niño y la precipitación en el área de la cuenca alta del río Samalá.

Tabla XIV. **Probabilidad de ocurrencia del fenómeno El Niño durante septiembre periodo 1970 – 2017**

DESCRIPCIÓN	SEPTIEMBRE			PRUEBA EXACTA DE FISHER			
		NINO	NEUTRO	NINA	SIGNIFICANCIA	PROBABILIDAD	CONCLUSIÓN
TOTONICAPAN							
	SECO	40 %	33 %	22 %	44 %	56 %	INDEPENDIENTE
	NEUTRO	20 %	44 %	22 %			
	LLUVIOSO	40 %	22 %	56 %			
CUATRO CAMINOS		NINO	NEUTRO	NINA	SIGNIFICANCIA	PROBABILIDAD	CONCLUSIÓN
	SECO	50 %	26 %	33 %	09 %	91 %	INDEPENDIENTE
	NEUTRO	10 %	53 %	11 %			
	LLUVIOSO	40 %	21 %	56 %			
ZUNIL		NINO	NEUTRO	NIÑA	SIGNIFICANCIA	PROBABILIDAD	CONCLUSIÓN
	SECO	50 %	32 %	22 %	30 %	70 %	INDEPENDIENTE
	NEUTRO	30 %	42 %	11 %			
	LLUVIOSO	20 %	26 %	67 %			
SANTA MARIA DE JESUS		NINO	NEUTRO	NIÑA	SIGNIFICANCIA	PROBABILIDAD	CONCLUSIÓN
	SECO	70 %	26 %	11 %	10 %	90 %	INDEPENDIENTE
	NEUTRO	10 %	37 %	44 %			
	LLUVIOSO	20 %	37 %	44 %			
LABOR OVALLE		NINO	NEUTRO	NIÑA	SIGNIFICANCIA	PROBABILIDAD	CONCLUSIÓN
	SECO	40 %	32 %	33 %	72 %	28 %	INDEPENDIENTE
	NEUTRO	20 %	42 %	22 %			
	LLUVIOSO	40 %	26 %	44 %			

Fuente: elaboración propia, con datos INDE – NOAA.

Durante septiembre, la tabla de contingencia analizada para la precipitación y ONI, indica la siguiente información: en condiciones de El Niño, en las cinco estaciones se conserva en estado seco. En condiciones de ENSO-neutral, en las cinco estaciones se presenta en condición neutro

En condiciones de La Niña, en las cinco estaciones se presenta el estado lluvioso. La prueba exacta de Fisher no indica la dependencia de las variables de El Niño y la precipitación sobre la cuenca alta del río Samalá, aunque la probabilidad de correlación entre la precipitación y ENSO, son similares a de agosto.

Tabla XV. **Probabilidad de ocurrencia del fenómeno El Niño durante octubre periodo 1970 – 2017**

DESCRIPCIÓN		OCTUBRE			PRUEBA EXACTA DE FISHER		
		Niño	Neutro	Niña	Significancia	Probabilidad	Conclusión
TOTONICAPAN	SECO	36 %	27 %	45 %	33 %	67 %	INDEPENDIENTE
	NEUTRO	45 %	40 %	09 %			
	LLUVIOSO	18 %	33 %	45 %			
CUATRO CAMINOS	SECO	27 %	40 %	36 %	72 %	28 %	INDEPENDIENTE
	NEUTRO	45 %	33 %	18 %			
	LLUVIOSO	27 %	27 %	45 %			
ZUNIL	SECO	18 %	47 %	36 %	61 %	39 %	INDEPENDIENTE
	NEUTRO	45 %	20 %	27 %			
	LLUVIOSO	36 %	33 %	36 %			
SANTA MARIA DE JESUS	SECO	27 %	27 %	55 %	01 %	99 %	DEPENDIENTE
	NEUTRO	09 %	60 %	09 %			
	LLUVIOSO	64 %	13 %	36 %			
LABOR OVALLE	SECO	55 %	20 %	36 %	32 %	68 %	INDEPENDIENTE
	NEUTRO	27 %	47 %	18 %			
	LLUVIOSO	18 %	33 %	45 %			

Fuente: elaboración propia, con datos INDE – NOAA.

Durante octubre, la tabla de contingencia analizada para la precipitación y ONI, indica la siguiente información: en condiciones de El Niño, en tres estaciones se conserva en estado neutro, en una estación se conserva el estado lluvioso y en una estación se conserva en estado seco.

En condiciones de ENSO-neutral, en tres estaciones se conserva la condición neutra, en una estación se conserva la condición lluviosa y en una estación se conserva la condición seca.

En evento de La Niña, en dos estaciones sus condiciones son lluviosas, en dos estaciones sus condiciones pueden ser seco y lluvioso y en una estación su condición es seco, es importante mencionar que la prueba exacta de Fisher indica la correlación del ENSO y la precipitación en la estación Santa María de Jesús, y en las 4 estaciones no presenta corrección alguna.

Tabla XVI. **Probabilidad de ocurrencia del fenómeno El Niño y la precipitación durante noviembre periodo 1970 – 2017**

DESCRIPCIÓN	NOVIEMBRE			PRUEBA EXACTA DE FISHER			
	SECO	NEUTRO	LLUVIOSO	SIGNIFICANCIA	PROBABILIDAD	CONCLUSIÓN	
TOTONICAPAN	Niño	40 %	25 %	38 %	46 %	54 %	INDEPENDIENTE
	Neutro	10 %	42 %	38 %			
	Lluvioso	50 %	33 %	23 %			
CUATRO CAMINOS	Niño	25 %	42 %	31 %	34 %	66 %	INDEPENDIENTE
	Neutro	17 %	33 %	46 %			
	Lluvioso	58 %	25 %	23 %			
ZUNIL	Niño	25 %	50 %	31 %	56 %	44 %	INDEPENDIENTE
	Neutro	33 %	33 %	23 %			
	Lluvioso	42 %	17 %	46 %			
SANTA MARIA DE JESUS	Niño	33 %	36 %	31 %	100 %	0 %	INDEPENDIENTE
	Neutro	33 %	27 %	31 %			
	Lluvioso	33 %	36 %	38 %			
LABOR OVALLE	Niño	08 %	33 %	62 %	06 %	94 %	INDEPENDIENTE
	Neutro	33 %	42 %	15 %			
	Lluvioso	58 %	25 %	23 %			

Fuente: elaboración propia, con datos INDE – NOAA.

Durante noviembre, la tabla de contingencia analizada para la precipitación y ONI, indica la siguiente información: en condiciones de El Niño, en cuatro estaciones se conserva en estado lluvioso y en una estación las condiciones pueden ser seco, neutro o lluvioso.

En condiciones de ENSO-neutral, en dos estaciones se conserva en estado seco, en dos estaciones se conserva en estado neutro y en una estación las condiciones pueden ser seco y lluvioso.

En condiciones de La Niña, en dos estaciones las condiciones pueden ser lluvioso, en una estación las condiciones pueden ser seco y en dos estaciones pueden darse las condiciones de seco y neutro.

Por lo tanto, la prueba exacta de Fisher descarta la probabilidad de que los eventos de la precipitación y El Niño sean variables dependientes durante este mes.

Para determinar la incidencia y relación directa entre el fenómeno El Niño y la precipitación a través del tiempo en las estaciones hidrométricas de la cuenca alta del río Samalá, se realizó el análisis correspondiente a través de la correlación lineal simple, entre la variable de ONI y la precipitación promedio, para determinar a través del coeficiente de correlación de Pearson con valores mayores a 0,5 y encontrar la relación entre dicho fenómeno.

Al efectuar la correlación lineal simple entre ambas variables, los resultados de dicho análisis se concentraron en un valor menor a 0,5 en promedio, por lo tanto, no se continuó con el análisis con la variable independiente de ONI, y se establecieron los parámetros atmosféricos de IOS anomalía y la TSM estándar para determinar la relación entre estas dos variables independientes y la precipitación promedio en la cuenca.

A continuación, se especifican las ecuaciones utilizadas para determinar la correlación simple entre las variables de precipitación y ONI.

- Precipitación:

$$r = \frac{\delta_{TSM\ Total}, Precipitación}{\delta_{TSM\ Total}, \delta_{Precipitación}}, -1 \leq r \leq 1 \quad (5,1)$$

$$r = \frac{\delta_{TSM\ Estandar}, Precipitación}{\delta_{TSM\ Estandar}, \delta_{Precipitación}}, -1 \leq r \leq 1 \quad (5,2)$$

$$r = \frac{\delta_{IOS, Precipitación}}{\delta_{IOS, \delta_{Precipitación}}}, -1 \leq r \leq 1 \quad (5,3)$$

- Caudal

$$r = \frac{\delta_{TSM Total, Caudal}}{\delta_{TSM Total, \delta_{Caudal}}}, -1 \leq r \leq 1 \quad (5,4)$$

$$r = \frac{\delta_{TSM Estandar, Caudal}}{\delta_{TSM Estandar, \delta_{Caudal}}}, -1 \leq r \leq 1 \quad (5,5)$$

$$r = \frac{\delta_{IOS, Caudal}}{\delta_{IOS, \delta_{Caudal}}}, -1 \leq r \leq 1 \quad (5,6)$$

Para efecto del análisis de las variables independientes de El Niño, se realizó una correlación múltiple, considerando 3 meses de rezago máximo para determinar la incidencia del fenómeno y la precipitación. Por lo tanto, se especifican los cálculos efectuados para determinar dicha correlación múltiple entre las variables:

- Precipitación (P)

$$B_1 = \frac{[\sum ONI^2 - n(\overline{ONI})^2][\sum(TSM * P) - n(\overline{TSM})(\overline{P})] - [\sum(TSM * ONI) - n(\overline{TSM})(\overline{ONI})][\sum(ONI * P) - n(\overline{ONI})(\overline{P})]}{[\sum TSM^2 - n(\overline{TSM})^2][\sum ONI^2 - n(\overline{ONI})^2] - [\sum(TSM * ONI) - n(\overline{TSM})(\overline{ONI})]^2} \quad (5,7)$$

$$B_2 = \frac{[\sum TSM^2 - n(\overline{TSM})^2][\sum(ONI * P) - n(\overline{ONI})(\overline{P})] - [\sum(TSM * ONI) - n(\overline{TSM})(\overline{ONI})][\sum(TSM * P) - n(\overline{TSM})(\overline{P})]}{[\sum TSM^2 - n(\overline{TSM})^2][\sum ONI^2 - n(\overline{ONI})^2] - [\sum(TSM * ONI) - n(\overline{TSM})(\overline{ONI})]^2} \quad (5,8)$$

$$a = \bar{P} - B_1(\overline{TSM}) - B_2(\overline{ONI}) \quad (5,9)$$

$$r \sqrt{\frac{a \sum P + B_1 \sum (TSM * P) + B_2 (ONI * P) - n\bar{P}^2}{\sum P^2 - n\bar{P}^2}}, -1 \leq r \leq 1 \quad (5,10)$$

- Caudal (C)

$$B_1 = \frac{[\sum ONI^2 - n(\overline{ONI})^2][\sum (TSM * C) - n(\overline{TSM})(\overline{C})] - [\sum (TSM * ONI) - n(\overline{TSM})(\overline{ONI})][\sum (ONI * C) - n(\overline{ONI})(\overline{C})]}{[\sum TSM^2 - n(\overline{TSM})^2][\sum ONI^2 - n(\overline{ONI})^2] - [\sum (TSM * ONI) - n(\overline{TSM})(\overline{ONI})]^2} \quad (5,11)$$

$$B_1 = \frac{[\sum ONI^2 - n(\overline{ONI})^2][\sum (TSM * C) - n(\overline{TSM})(\overline{C})] - [\sum (TSM * ONI) - n(\overline{TSM})(\overline{ONI})][\sum (ONI * C) - n(\overline{ONI})(\overline{C})]}{[\sum TSM^2 - n(\overline{TSM})^2][\sum ONI^2 - n(\overline{ONI})^2] - [\sum (TSM * ONI) - n(\overline{TSM})(\overline{ONI})]^2} \quad (5,12)$$

$$a = \bar{C} - B_1(\overline{TSM}) - B_2(\overline{ONI}) \quad (5,13)$$

$$r \sqrt{\frac{a \sum C + B_1 \sum (TSM * C) + B_2 (ONI * C) - n\bar{C}^2}{\sum C^2 - n\bar{C}^2}}, -1 \leq r \leq 1 \quad (5,14)$$

En la siguiente tabla, se muestran los cálculos efectuados para determinar la correlación múltiple y encontrar la relación entre las variables de análisis para la cuenca.

Tabla XVII. **Correlación múltiple con variables TSM estándar, IOS anomalía y la precipitación**

Estaciones	Región del fenómeno			
Totonicapán	Niño 1+2	Niño +3	Niño +4	Niño +3,4
Tiempo normal	0,40	0,09	0,26	0,20
Tiempo +1mes rezago	0,11	0,25	0,21	0,35
Tiempo +2mes rezago	0,29	0,47	0,08	0,39
Tiempo +3mes rezago	0,57	0,58	0,11	0,35
	Región del fenómeno			
Cuatro Caminos	Niño 1+2	Niño +3	Niño +4	Niño +3,4
Tiempo normal	0,41	0,10	0,25	0,16
Tiempo +1mes rezago	0,13	0,20	0,21	0,31
Tiempo +2mes rezago	0,26	0,44	0,13	0,39
Tiempo +3mes rezago	0,54	0,56	0,10	0,35
	Región del fenómeno			
Zunil	Niño 1+2	Niño +3	Niño +4	Niño +3,4
Tiempo normal	0,42	0,15	0,25	0,17
Tiempo +1mes rezago	0,16	0,18	0,20	0,29
Tiempo +2mes rezago	0,22	0,42	0,13	0,38
Tiempo +3mes rezago	0,49	0,54	0,09	0,36
	Región del fenómeno			
Santa María de Jesús	Niño 1+2	Niño +3	Niño +4	Niño +3,4
Tiempo normal	0,42	0,11	0,23	0,14
Tiempo +1mes rezago	0,14	0,18	0,19	0,29
Tiempo +2mes rezago	0,21	0,41	0,09	0,37
Tiempo +3mes rezago	0,49	0,53	0,04	0,36
	Región del fenómeno			
Labor Ovalle	Niño 1+2	Niño +3	Niño +4	Niño +3,4
Tiempo normal	0,44	0,10	0,27	0,18
Tiempo +1mes rezago	0,13	0,21	0,20	0,33
Tiempo +2mes rezago	0,25	0,46	0,09	0,40
Tiempo +3mes rezago	0,55	0,59	0,08	0,37

Fuente: elaboración propia, con datos INDE – NOAA.

Según la tabla XVII, se puede determinar que para la evaluación de la correlación múltiple sin rezago (tiempo normal), la probabilidad de compatibilidad entre las variables independientes del fenómeno El Niño y la precipitación es nula, derivado al coeficiente de correlación de Pearson, que es menor a 0,5.

Por consiguiente, se analizaron las mismas variables con rezago de 1,2 y 3 meses consecutivos para determinar la probabilidad de ocurrencia entre las variables independientes de El Niño y la precipitación. Constatando que en el tercer mes de rezago en la región +3, el fenómeno y la precipitación, cuentan con una correlación asertiva.

A continuación, se presentan los modelos matemáticos para determinar la precipitación en relación con la TSM estándar e IOS anomalía sobre cada estación hidrológica analizada de la cuenca.

Tabla XVIII. Modelos matemáticos para la evaluación de la precipitación en base a la correlación múltiple con tres meses de rezago para la TSM absoluta e IOS anomalía

Modelos matemáticos	
Estación	Region Niño +3
Totonicapán	$P_{total} = -940,6950 + 18,6236*(TSM)+39,09181*(IOS)$
Cuatro Caminos	$P_{total} = -1033,1253 + 20,9368*(TSM)+42,8724*(IOS)$
Zunil	$P_{total} = -1097,1161 + 21,8963*(TSM) + 45,6696*(IOS)$
Santa María de Jesús	$P_{total} = -2643,0245 + 46,5715*(TSM) + 111,2321*(IOS)$
Labor Ovalle	$P_{total} = -895,9790 + 16,6333*(TSM) + 37,2704*(IOS)$

Fuente: elaboración propia, con datos INDE – NOAA.

En el cuadro XVIII, se determinaron los modelos matemáticos para cada estación en el área de la cuenca alta del río Samalá, por lo tanto, se procedió con el análisis de la precipitación en el área total de la cuenca a través de los polígonos de Thiessen, considerando dicho análisis durante abril hacia octubre.

Tabla XIX. **Probabilidad de ocurrencia del fenómeno El Niño y la precipitación promedio en la cuenca alta del río Samalá**

	TABLA DE CONTINGENCIA				PRUEBA EXACTA DE FISHER		
		NIÑO	NEUTRO	NIÑA	SIGNIFICANCIA	PROBABILIDAD	CONCLUSIÓN
ABRIL	SECO	29 %	35 %	17 %	54 %	46 %	INDEPENDIENTE
	NEUTRO	29 %	26 %	67 %			
	LLUVIOSO	43 %	39 %	17 %			
MAYO		NIÑO	NEUTRO	NIÑA	25 %	75 %	INDEPENDIENTE
	SECO	57 %	14 %	43 %			
	NEUTRO	14 %	43 %	29 %			
JUNIO		NIÑO	NEUTRO	NIÑA	35 %	65 %	INDEPENDIENTE
	SECO	44 %	35 %	17 %			
	NEUTRO	44 %	30 %	17 %			
JULIO		NIÑO	NEUTRO	NIÑA	19 %	81 %	INDEPENDIENTE
	SECO	50 %	36 %	0 %			
	NEUTRO	33 %	24 %	67 %			
AGOSTO		NIÑO	NEUTRO	NIÑA	0 %	100 %	DEPENDIENTE
	SECO	100 %	35 %	0 %			
	NEUTRO	0 %	38 %	33 %			
SEPTIEMBRE		NIÑO	NEUTRO	NIÑA	15 %	85 %	INDEPENDIENTE
	SECO	50 %	37 %	11 %			
	NEUTRO	10 %	42 %	33 %			
OCTUBRE		NIÑO	NEUTRO	NIÑA	30 %	70 %	INDEPENDIENTE
	SECO	27 %	38 %	42 %			
	NEUTRO	45 %	38 %	08 %			
	LLUVIOSO	27 %	25 %	50 %			

Fuente: elaboración propia, con datos INDE – NOAA.

Con base a la figura no.6, se consideran que los meses de mayor incidencia en la precipitación sobre el área de la cuenca, están contemplados de abril a octubre.

En la tabla de contingencia para la cuenca alta del río Samalá, se puede determinar que durante la presencia del evento El Niño, durante abril, la relación del fenómeno y la precipitación se conserva en estado lluvioso. Durante mayo, junio, julio, agosto, y septiembre, la relación del fenómeno y la precipitación se conserva en estado seco, y durante octubre, la relación del fenómeno y la precipitación se conserva en estado neutro.

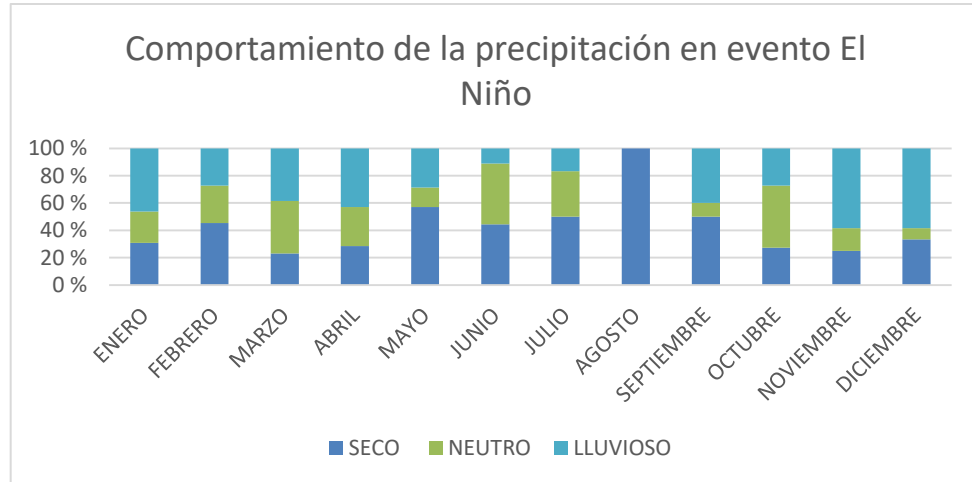
Durante el evento ENSO-neutral, la relación del fenómeno y la precipitación sobre la cuenca indica que, durante abril y julio, se conserva en estado lluvioso. Durante agosto y septiembre la relación de la precipitación y el fenómeno se conserva en estado neutro. Por lo tanto, para mayo, junio y octubre, la relación puede ser seco, neutro o lluvioso.

Y durante el evento de La Niña, la relación del fenómeno y la precipitación indica que prevalece en estado seco durante mayo, prevalece el estado neutro durante abril y julio. Por lo tanto, se conserva el estado lluvioso durante junio, agosto, septiembre y octubre.

La prueba de Fisher indica la probabilidad de ocurrencia entre el fenómeno El Niño y la precipitación durante agosto, indica el 100 % de la probabilidad en que el fenómeno influye directamente sobre los recursos hídricos de esta cuenca.

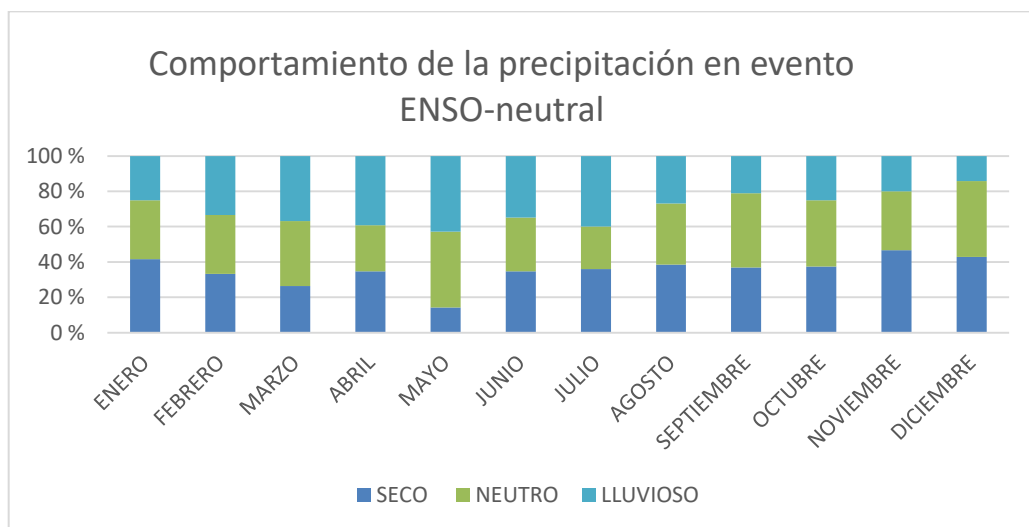
En las siguientes graficas de barras acumuladas, se indica el comportamiento de la presencia de ENOS en las etapas de la precipitación, considerando los estados como seco, neutro y lluvioso para el área de la cuenca general.

Figura 22. **Comportamiento de la precipitación durante el evento de El Niño**



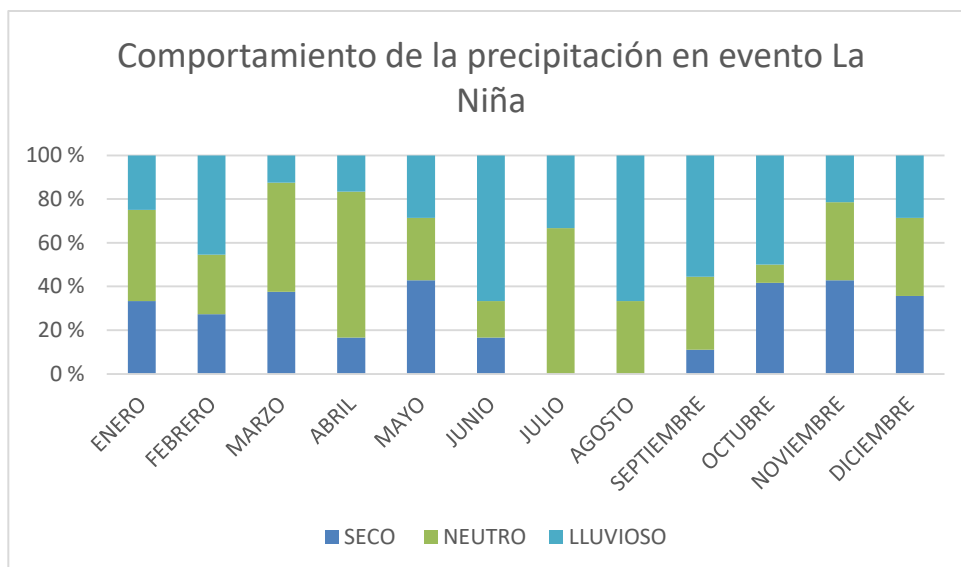
Fuente: elaboración propia, con datos INDE – NOAA.

Figura 23. **Comportamiento de la precipitación durante el evento de ENSO-neutral**



Fuente: elaboración propia, con datos INDE – NOAA.

Figura 24. **Comportamiento de la precipitación durante el evento de La Niña**



Fuente: elaboración propia, con datos INDE – NOAA.

Para determinar la correlación entre la precipitación sobre la cuenca alta del río Samalá y las variables independientes del fenómeno El Niño, fue necesario trabajar la correlación múltiple para el área general de la cuenca, y determinar un modelo matemático para el cálculo de la precipitación en función a las variables de la TSM estándar e IOS anomalía.

Los resultados para la correlación múltiple fueron asertivos en el tercer mes de rezago para las variables del fenómeno El Niño en la región +3, como lo indica la siguiente tabla.

Tabla XX. **Correlación múltiple entre la precipitación, TSM estándar e IOS anomalía, sobre la cuenca alta del río Samalá**

Tiempo normal	0,44	0,12	0,27	0,18
Tiempo +1mes rezago	0,14	0,22	0,21	0,34
Tiempo +2mes rezago	0,26	0,47	0,11	0,41
Tiempo +3mes rezago	0,56	0,60	0,09	0,38

Fuente: elaboración propia, con datos INDE – NOAA.

Tabla XXI. **Modelo matemático para la evaluación de la precipitación sobre la cuenca alta del río Samalá para la TSM absoluta e IOS anomalía**

Cuenca Alta Samalá	Ecuación region Niño +3, Tiempo de rezago 3 meses
Cuenca	$P_{total} = -989,28 + 19,0587*(TSM) + 41,1556*(IOS)$

Fuente: elaboración propia, con datos INDE – NOAA.

5.2. Caudal

A través de las tablas de contingencia, se puede determinar que en eventos de El Niño propician condiciones secas para el caudal del río Samalá en siete meses del año, mientras que La Niña propician mayores caudales en tres meses del año.

Tabla XXII. Prueba de Fisher y tablas de contingencia para el caudal en la cuenca alta del río Samalá

	TABLA DE CONTINGENCIA				PRUEBA EXACTA DE FISHER		
		NIÑO	NEUTRO	NIÑA	SIGNIFICANCIA	PROBABILIDAD	CONCLUSIÓN
ENERO	SECO	31 %	33 %	33 %	42 %	58 %	INDEPENDIENTE
	NEUTRO	31 %	17 %	50 %			
	CAUDALOSO	38 %	50 %	17 %			
FEBRERO		NIÑO	NEUTRO	NIÑA	SIGNIFICANCIA	PROBABILIDAD	CONCLUSIÓN
	SECO	45 %	29 %	30 %	58 %	42 %	INDEPENDIENTE
	NEUTRO	18 %	29 %	50 %			
CAUDALOSO	36 %	43 %	20 %				
MARZO		NIÑO	NEUTRO	NIÑA	SIGNIFICANCIA	PROBABILIDAD	CONCLUSIÓN
	SECO	50 %	25 %	38 %	69 %	31 %	INDEPENDIENTE
	NEUTRO	13 %	35 %	38 %			
CAUDALOSO	38 %	40 %	25 %				
ABRIL		NIÑO	NEUTRO	NIÑA	SIGNIFICANCIA	PROBABILIDAD	CONCLUSIÓN
	SECO	43 %	32 %	67 %	88 %	12 %	INDEPENDIENTE
	NEUTRO	29 %	28 %	0 %			
CAUDALOSO	29 %	40 %	33 %				
MAYO		NIÑO	NEUTRO	NIÑA	SIGNIFICANCIA	PROBABILIDAD	CONCLUSIÓN
	SECO	71 %	25 %	29 %	12 %	88 %	INDEPENDIENTE
	NEUTRO	29 %	29 %	43 %			
CAUDALOSO	0 %	46 %	29 %				
JUNIO		NIÑO	NEUTRO	NIÑA	SIGNIFICANCIA	PROBABILIDAD	CONCLUSIÓN
	SECO	56 %	32 %	0 %	02 %	98 %	DEPENDIENTE
	NEUTRO	44 %	23 %	50 %			
CAUDALOSO	0 %	45 %	50 %				
JULIO		NIÑO	NEUTRO	NIÑA	SIGNIFICANCIA	PROBABILIDAD	CONCLUSIÓN
	SECO	50 %	24 %	50 %	22 %	78 %	INDEPENDIENTE
	NEUTRO	50 %	32 %	17 %			
CAUDALOSO	0 %	44 %	33 %				
AGOSTO		NIÑO	NEUTRO	NIÑA	SIGNIFICANCIA	PROBABILIDAD	CONCLUSIÓN
	SECO	75 %	29 %	11 %	12 %	88 %	INDEPENDIENTE
	NEUTRO	13 %	33 %	44 %			
CAUDALOSO	13 %	38 %	44 %				
SEPTIEMBRE		NIÑO	NEUTRO	NIÑA	SIGNIFICANCIA	PROBABILIDAD	CONCLUSIÓN
	SECO	80 %	26 %	0 %	0 %	100 %	DEPENDIENTE
	NEUTRO	20 %	37 %	33 %			
CAUDALOSO	0 %	37 %	67 %				
OCTUBRE		NIÑO	NEUTRO	NIÑA	SIGNIFICANCIA	PROBABILIDAD	CONCLUSIÓN
	SECO	36 %	47 %	18 %	01 %	99 %	DEPENDIENTE
	NEUTRO	64 %	13 %	27 %			
CAUDALOSO	0 %	40 %	55 %				
NOVIEMBRE		NIÑO	NEUTRO	NIÑA	SIGNIFICANCIA	PROBABILIDAD	CONCLUSIÓN
	SECO	42 %	58 %	08 %	05 %	95 %	INDEPENDIENTE
	NEUTRO	42 %	17 %	38 %			
CAUDALOSO	17 %	25 %	54 %				
DICIEMBRE		NIÑO	NEUTRO	NIÑA	SIGNIFICANCIA	PROBABILIDAD	CONCLUSIÓN
	SECO	42 %	50 %	15 %	07 %	93 %	INDEPENDIENTE
	NEUTRO	08 %	33 %	54 %			
CAUDALOSO	50 %	17 %	31 %				

Fuente: elaboración propia, con datos INDE – NOAA.

El caudal fue analizado a través de la correlación lineal simple, que, al comparar los resultados anteriores, no fue posible determinar correlación alguna entre los parámetros del caudal y ONI, por lo tanto, fue empleado la correlación múltiple, considerando las variables independientes de la TSM absoluta e IOS anomalía, del que fue contemplando los tres meses de rezago consecutivos y determinar la región y tiempo de correlación para el caudal.

Tabla XXIII. **Correlación múltiple con variables TSM absoluta, IOS anomalía y el caudal**

Estación caudal	Región del fenómeno			
	Niño 1+2	Niño +3	Niño +4	Niño +3.4
El Túnel				
Tiempo normal	0,52	0,34	0,23	0,20
Tiempo +1mes rezago	0,39	0,20	0,20	0,16
Tiempo +2mes rezago	0,20	0,16	0,17	0,21
Tiempo +3mes rezago	0,19	0,31	0,16	0,29

Fuente: elaboración propia, con datos INDE – NOAA.

Tabla XXIV. **Modelo matemático para la evaluación del caudal sin meses de rezago para la TSM absoluta e IOS anomalía**

Estación caudal	Ecuación región Niño 1+2 Sin tiempo de Rezago
El Túnel	$P_{total} = 24,97 + 0,1622*(TSM) - 0,8034*(IOS)$

Fuente: elaboración propia, con datos INDE – NOAA.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla XXV. **Meses en condiciones secas asociadas a El Niño**

Estación precipitación	Mes							
	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.
Totonicapán		X	X		X	X		
Cuatro Caminos		X		X	X	X		
Zunil		X	X	X	X	X		
Santa María de Jesús		X	X	X	X	X		
Labor Ovalle		X		X	X	X	X	
Estación caudal								
El Túnel	X	X	X	X	X	X		X

Fuente: elaboración propia, con datos INDE – NOAA.

Basado en las tablas de contingencia, se tiene la consideración del fenómeno El Niño en condiciones secas con mayor intensidad durante mayo a septiembre, es importante destacar que únicamente en agosto se tuvo una dependencia estadística basada en la prueba de Fisher.

Tabla XXVI. **Meses en condiciones neutras asociadas a El Niño**

Estación precipitación	Mes							
	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.
Totonicapán	X						X	
Cuatro Caminos	X						X	
Zunil	X						X	
Santa María de Jesús	X							
Labor Ovalle	X		X					
Estación caudal								
El Túnel				X			X	

Fuente: elaboración propia, con datos INDE – NOAA.

Considerando el análisis a través de las tablas de contingencia, se puede determinar que la condición neutra durante el fenómeno El Niño, posee mayor incidencia durante abril y octubre.

Tabla XXVII. **Meses con condiciones lluviosas asociadas a El Niño**

Estación precipitación	Mes							
	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.
Totonicapán								X
Cuatro Caminos								X
Zunil								X
Santa María de Jesús							X	X
Labor Ovalle								X
Estación caudal								
El Túnel								

Fuente: elaboración propia, con datos INDE – NOAA.

La época lluviosa durante del fenómeno El Niño, fue perceptible durante noviembre, considerando dicha condición en las cinco estaciones analizadas en el área de la cuenca.

Tabla XXVIII. **Meses en condiciones secas asociadas a La Niña**

Estación precipitación	Mes							
	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.
Totonicapán			X	X				X
Cuatro Caminos	X	X						
Zunil		X					X	
Santa María de Jesús	X			X			X	
Labor Ovalle			X					
Estación caudal								
El Túnel	X			X				

Fuente: elaboración propia, con datos INDE – NOAA.

Para las condiciones de La Niña en época seca, se considera la incidencia del fenómeno en abril, mayo, junio y julio. Posteriormente se puede considerar la incidencia durante octubre, considerando las estaciones recurrentes de Zunil y Santa María de Jesús.

Tabla XXIX. **Meses en condiciones neutras asociadas a La Niña**

Estación precipitación	Mes							
	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.
Totonicapán			X					X
Cuatro Caminos	X	X		X				
Zunil	X							
Santa María de Jesús		X		X		X		
Labor Ovalle	X		X					
Estación caudal								
El Túnel		X	X					

Fuente: elaboración propia, con datos INDE – NOAA.

En las condiciones de La Niña, en la época neutro, se considera una mayor incidencia para abril, mayo, junio y julio, considerando la recurrencia entre las estaciones meteorológicas de Cuatro Caminos y Santa María de Jesús.

Tabla XXX. **Meses en condiciones lluviosas asociadas a La Niña**

Estación precipitación	Mes							
	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.
Totonicapán	X	X	X	X	X	X	X	
Cuatro Caminos	X		X		X	X	X	
Zunil			X		X	X		X
Santa María de Jesús			X		X	X		X
Labor Ovalle		X	X		X	X		
Estación caudal								
El Túnel			X		X	X	X	X

Fuente: elaboración propia, Con datos INDE – NOAA.

En el fenómeno La niña y el estado lluvioso, se da con mayor intensidad durante junio, agosto, septiembre y regularidades para octubre y noviembre, en cuanto la época lluviosa empieza a culminar. Las lluvias son constantes durante agosto y septiembre sobre el área de la cuenca, aunque hay muchas similitudes entre ambos meses.

CONCLUSIONES

1. La cuenca alta del río Samalá, hasta el área de estudio (Santa María de Jesús, Zunil, Quetzaltenango), tiene un área de 807 km², perímetro de 192,92 km, cota mínima 1 525 msnm, cota máxima 3 726 msnm y longitud del cauce principal de 46,76 km.
2. La variable independiente ONI, fue analizada a través de las tablas de contingencia para cada estación hidrométrica y la cuenca general, determinando los eventos de El Niño, Enso-neutral, y La Niña, en función a la precipitación y caudal.

Cuando se presenta el evento El Niño, en febrero, mayo, junio, julio, agosto, y septiembre se presentan las condiciones secas en la precipitación, cuando se presenta el evento Enso-neutral, en febrero, marzo, mayo, septiembre, octubre y diciembre se conservan las condiciones neutras en la precipitación y durante la presencia de La Niña, en febrero, junio, agosto, septiembre y octubre, se presentan las condiciones lluviosas en la precipitación.

3. Con base a las tablas de contingencia, cuando se presenta El Niño propicias condiciones secas para el caudal del río Samalá en siete meses del año, mientras que La Niña propicias mayores caudales en tres meses del año.
4. Se trabajó la correlación simple utilizando las variables de la precipitación y caudal en función a ONI, concluyendo que el factor de correlación de

Pearson no fue superior a 0,5, por lo tanto, dicha correlación no fue efectiva para vincular al fenómeno El Niño y los recursos hídricos de la cuenca.

5. Se trabajó la correlación múltiple utilizando las variables de la precipitación y caudal en función a las variables independientes de El Niño, la TSM estándar e IOS anomalía. Para la precipitación, el factor de correlación de Pearson fue superior a 0,50 en 3 meses de rezago en los valores de TSM e IOS, y la región de El Niño +3 y para el caudal, el factor de correlación fue superior a 0,50 en la región de El Niño 1+2 sin meses de rezago para los valores de TSM e IOS.

Para el caudal y la precipitación, se encontró un modelo matemático que permite predecir su comportamiento de la lluvia y el caudal en función a las variables de TSM estándar e IOS anomalía, en el área de la cuenca general y para cada una de las estaciones hidrométricas analizadas.

RECOMENDACIONES

1. Realizar estos estudios en cada cuenca de Guatemala, para considerar los efectos que produce el fenómeno El Niño y La Niña en los recursos hídricos del país, y que permita efectuar planes de contingencia ante eventos de escases de la precipitación, que le permita al agricultor preparar sus cosechas ante estos eventos. Y la reducción de caudal, que le permita a las hidroeléctricas del país preparar métodos alternativos de generación de energía.
2. Instalar nuevas estaciones hidrométricas en el área de la cuenca, que permitan la recepción de información en otros puntos estratégicos y maximizar el control de la precipitación para el área total de la cuenca.

BIBLIOGRAFÍA

1. CATHALAC. *Plan de adaptación municipal hacia la seguridad hídrica, Santa Cruz Muluá, Retalhuleu, Guatemala*. [en línea]. <<https://docplayer.es/83616916-Plan-de-adaptacion-municipal-hacia-la-seguridad-hidrica-santa-cruz-mulua-retalhuleu-guatemala.html>>. [Consulta: 10 de febrero de 2020].
2. CEDEPEM / ALDES. *Plan de Manejo de Cars*. Guatemala, 2008. 184 p.
3. Center, National Weather Service Climate Prediction. *Preguntas frecuentes sobre El Niño y la Niña*. [en línea]. <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensofaq.shtml#pred_mon>. [Consulta: 02 de febrero de 2020].
4. DARDON Jacobo y MORALES Cecilia. *¿Por qué tanta destrucción?* Guatemala: Editorial de Ciencias Sociales. 2006. 94 p.
5. DOBIAS, Jonas. *El fenómeno de El Niño y su impacto en la generación hidroeléctrica de Chixoy*. [en línea]. <<http://www.cnee.gob.gt/pdf/informacion/EINinoImpactoChixoy0820>>. [Consulta: 05 de febrero de 2020].
6. GORGAS Javier, CARDIEL Nicolás y ZAMORANO Jaime. *Estadística Básica para Estudiantes de Ciencias*. Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid, 2011. 258 p.

7. LUX CARDONA / Benjamín. *Conceptos básicos de morfometría de cuencas hidrográficas.* [en línea]. <<http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/1/Conceptos%20b%C3%A1sicos%20de%20Morfometr%C3%ADa%20de%20Cuencas%20Hidrogr%C3%A1ficas.pdf>>. [Consulta: 19 de febrero de 2020].
8. MARTELO, María Teresa. *El Fenómeno de El Niño.* Comisión Nacional de Meteorología e Hidrología (CONICIT) de Venezuela. 1998. 8 p.
9. RODRÍGUEZ ALVARADO, Andrea Ester. *Efectos del fenómeno El Niño en los recursos hídricos de la cuenca del río Chixoy.* Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2018. 144 p.
10. SAY CHAVEZ, Eduardo Rolando. *Políticas públicas y manejo de recursos naturales renovables en la cuenca alta del río Samalá. Guatemala.* Trabajo de graduación de Magister en Gerencia de Agricultura sostenible y los Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas. Universidad Rafael Landívar de Guatemala, 2013. 141 p.
11. SENAMHI. *El fenómeno El Niño en el Perú.* [en línea]. <<http://www.minam.gob.pe/notas-de-prensa/el-senamhi-presenta-informe-anual-2014-ante-la-llegada-del-fenomeno-el-nino/>>. [Consulta: 02 de febrero de 2020].
12. SENAMHI. *Proyectos y Convenios ENFEN.* [en línea]. <<http://www.senamhi.gob.pe/>> [Consulta: 02 de febrero de 2020].

13. SUÁREZ, Gustavo. *Cuencas Hidrográficas de Guatemala*. Ministerio de recursos y Ambientes Naturales, Guatemala. [en línea]. <<https://es.slideshare.net/memgblack/cuencas-hidrograficas-de-guatemala> > [Consulta: 03 de febrero de 2020].

14. VILLALOBOS, Roberto; RETANA, José Alberto. *El Niño, Una Revisión bibliográfica*. [en línea]. <<https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20911/El+Ni%C3%B1o+%2C%20una+revisi%C3%B3n+bibliogr%C3%A1fica> > [Consulta: 03 de febrero de 2020].

15. WALPOLE, Ronald; MYERS, Raymond; MYERS, Sharon. *Probabilidad y Estadística para ingeniería y Ciencias*. 12a ed. México: Pearson Educación. 816 p.

