



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

**DETERMINACIÓN DE LA VARIABILIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS,
RELACIONADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS CUENCAS DEL RÍO
NARANJO EN SAN MARCOS Y RÍO GRANDE DE ZACAPA**

Oscar Guillermo Antonio Luna Zúñiga

Asesorado por el Ing. Claudio César Castañón Contreras

Guatemala, agosto de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LA VARIABILIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS,
RELACIONADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS CUENCAS DEL RÍO
NARANJO EN SAN MARCOS Y RÍO GRANDE DE ZACAPA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

OSCAR GUILLERMO ANTONIO LUNA ZÚÑIGA
ASESORADO POR EL ING. CLAUDIO CÉSAR CASTAÑÓN CONTRERAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, AGOSTO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. María Mar Girón Cordon
EXAMINADOR	Ing. Mario Arriola Ávila
EXAMINADOR	Ing. Rafael Morales Ochoa
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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:

DETERMINACIÓN DE LA VARIABILIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS, RELACIONADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS CUENCAS DEL RÍO NARANJO EN SAN MARCOS Y RÍO GRANDE DE ZACAPA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 4 de junio de 2012.



Oscar Guillermo Antonio Luna Zúñiga



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala, 26 de mayo de 2015

Ingeniero
Pedro Antonio Aguilar Polanco
Jefe del Departamento de Hidráulica
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería

Ingeniero Aguilar:

Luego de un breve saludo, sírvame la presente para informarle que el trabajo de graduación **DETERMINACIÓN DE LA VARIABILIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS, RELACIONADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS CUENCAS DEL RÍO NARANJO EN SAN MARCOS Y RÍO GRANDE DE ZACAPA**, elaborado por el estudiante Oscar Guillermo Antonio Luna Zúñiga, ha sido finalizado a satisfacción y revisado por mi persona.

Sin otro particular, atentamente


Claudio César Castañón Contreras
Ingeniero Civil
Colegiado No. 5.629
Ing. Claudio César Castañón Contreras
Colegiado No. 5629
Asesor

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala,
22 de julio de 2015

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación DETERMINACIÓN DE LA VARIABILIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS, RELACIONADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS CUENCAS DEL RÍO NARANJO EN SAN MARCOS Y RÍO GRANDE DE ZACAPA, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Oscar Guillermo Antonio Luna Zúñiga, quien contó con la asesoría del Ing. Claudio César Castañón Contreras.

Considero que este trabajo está bien desarrollado y representa un aporte para el departamento y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑADA A TODOS

Ing. Claudio César Castañón Contreras
Jefe del Departamento de Hidráulica



FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua

/bbdeb.





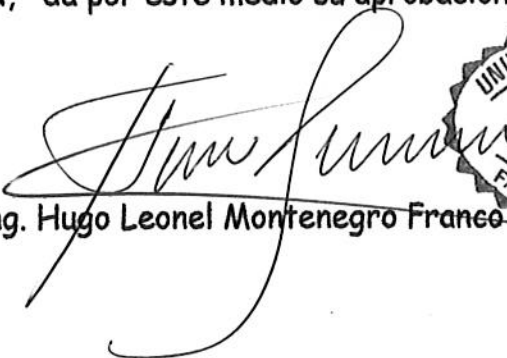
USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor y Coordinador del Departamento de Hidráulica, Ing. Claudio César Castañón Contreras, al trabajo de graduación del estudiante Oscar Guillermo Antonio Luna Zúñiga, titulado **DETERMINACIÓN DE LA VARIABILIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS, RELACIONADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS CUENCAS DEL RÍO NARANJO EN SAN MARCOS Y RÍO GRANDE ZACAPA**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

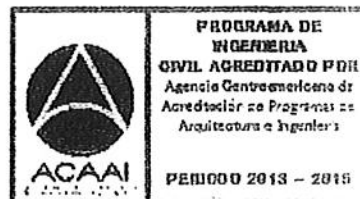

Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, agosto 2015

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





El Decano 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: **DETERMINACIÓN DE LA VARIABILIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS, RELACIONADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS CUENCAS DEL RÍO NARANJO EN SAN MARCOS Y RÍO GRANDE DE ZACAPA**, presentado por el estudiante universitario: **Oscar Guillermo Antonio Luna Zúñiga**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, 24 de agosto de 2015

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Mis padres** Oscar Enrique Luna (q. e. p. d.) y Gilda Zúñiga, por su amor incondicional y depositar su confianza en mí para alcanzar esta meta.
- Mi prometida** Por soportar mi mal humor y amarme sin condición.
- Mis hermanas** Glenda Rocío e Ingrid Fabiola Luna Zúñiga, por su cariño y todo su apoyo desde que inicié este camino.
- Mis primos** Juan Zúñiga, Bruno y Lizette Mertins, por ser el ejemplo a seguir y toda su ayuda en mi infancia.
- Mis amigos** Marco Alvarado, mi hermano del alma realmente mi amigo; Fernando Castillo, por compartir tiempo de alta calidad en la vida; Manuel Montenegro, porque ha creído en mi amistad incondicional.
- Mis amigas** Sara Rivera y Scarlett Caniz, por su cariño, apoyo y paciencia, Carolina Marroquín, por ese cariño que ha durado más que toda una vida; Lucrecia Ruíz y Nicté Paredes, por su amistad sincera.

Mi padrino

Luis Álvarez, por enseñarme que siempre se puede realizar un trabajo de alta calidad y guiarme en mi infancia.

Mi amiga

Ruby Alvarado, por todo el cariño y los consejos que me han permitido crecer en el camino de la vida.

Mi mentora

Lucía Bonato, *per insegnarmi che e' un obbligo sognare e anche avverare i sogni e soprattutto per aspettare pazientemente questa laurea.*

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por darme el amor de mi familia y amigos.
Mi asesor	Ingeniero Claudio Castañón, por compartir sus conocimientos y su inmejorable guía para realizar este trabajo.
Ing. Mario Corzo	Por su generosidad e invitarme a vencer la cobardía de mejorar como ser humano e ingeniero.
Insivumeh	Por abrir las puertas de la institución y ayudarme a alcanzar mi objetivo. Especialmente a la ingeniera Rosario Gómez y al ingeniero Walter Bardales por su ayuda desinteresada.
Facultad de Ingeniería	Por estos años de enseñanza y constancia en mi formación como profesional.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por regalarme la oportunidad de ser un sancarlista y ser mi amada casa de estudios.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XV
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Ubicación y localización de las cuencas de los ríos	1
1.1.1. Ubicación y localización de la cuenca del río Naranjo.....	1
1.1.2. Ubicación y localización de la cuenca del río Grande de Zacapa.....	2
1.2. Accesos y comunicaciones.....	2
1.2.1. Río Naranjo	3
1.2.1.1. Carreteras.....	3
1.2.2. Río Grande de Zacapa	3
1.2.2.1. Carreteras.....	3
1.3. Poblaciones dentro del área de las cuencas	3
1.3.1. Poblaciones dentro del área de la cuenca del río Naranjo.....	4
1.3.2. Poblaciones dentro del área de la cuenca del río Grande de Zacapa.....	7
1.4. Descripción de las cuencas	8
1.4.1. Cuenca del río Naranjo.....	8

1.4.2.	Cuenca del río Grande de Zacapa	9
1.5.	Estaciones hidrológicas en las cuencas	10
1.5.1.	Estaciones de la cuenca del río Naranjo	10
1.5.2.	Estaciones de la cuenca del río Grande de Zacapa...	10
1.6.	Geomorfología, climatología, aforos y parámetros hidrológicos	11
1.6.1.	Geomorfología	11
1.6.1.1.	Río Naranjo	11
1.6.1.2.	Río Grande de Zacapa	12
1.6.2.	Climatología	12
1.6.2.1.	Río Naranjo	12
1.6.2.2.	Río Grande de Zacapa	13
1.6.3.	Aforos y parámetros hidrológicos	15
1.6.3.1.	Río Naranjo	16
1.6.3.2.	Río Grande de Zacapa	16
1.7.	Geología y suelos.....	17
1.7.1.	Geología de la cuenca del río Naranjo	17
1.7.2.	Geología de la cuenca del río Grande de Zacapa.....	17
2.	EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SU IMPACTO SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS	19
2.1.	El sistema climático.....	19
2.1.1.	Generalidades sobre el clima.....	19
2.1.2.	Componentes del sistema climático	20
2.2.	Causas naturales del cambio climático	23
2.2.1.	Mecanismos radiativos.....	24
2.2.2.	Mecanismos no radiativos.....	26
2.2.3.	Mecanismos externos	27
2.2.3.1.	Variaciones galácticas.....	27

	2.2.3.2.	Variaciones orbitales.....	28
	2.2.3.3.	Variaciones solares.....	29
	2.2.4.	Mecanismos internos.....	30
	2.2.4.1.	Formación de los sistemas montañosos	30
	2.2.4.2.	Vulcanismo	31
	2.2.4.3.	Circulación oceánica.....	32
2.3.		Causas antrópicas del cambio climático.....	34
	2.3.1.	Modificaciones de la composición atmosférica	34
	2.3.2.	Modificaciones del paisaje y del uso del suelo	37
2.4.		Impactos del cambio climático	40
	2.4.1.	Guatemala y sus recursos hídricos	40
	2.4.1.1.	Principales ríos de Guatemala.....	42
	2.4.2.	Recursos hídricos y la hidrología.....	43
	2.4.3.	Recursos hídricos y el clima	45
	2.4.4.	Impacto en los recursos hídricos	45
3.		APLICACIÓN A LAS CUENCAS DEL RÍO NARANJO EN SAN MARCOS Y RÍO GRANDE DE ZACAPA	47
	3.1.	Escenario y modelo de análisis considerado.....	47
	3.1.1.	La metodología.....	48
	3.1.2.	Procesamiento de la información y generación de índices	49
	3.1.2.1.	El control de calidad (CC) interno de RClimDex.....	54
	3.1.2.2.	Control de calidad realizado por el usuario y control de homogeneidad	54
	3.2.	Datos para el período de 1969 a 2011	58
	3.2.1.	Rangos y saltos de tiempo en datos.....	63

	3.2.1.1.	Temperaturas	64
	3.2.1.2.	Precipitaciones	68
3.3.		Generación de índices y gráficos de índices	70
	3.3.1.	Gráficas de índices en estación Catarina, San Marcos.	72
	3.3.2.	Gráficas de índices en estación Camotán, Zacapa ...	76
3.4.		Resultados	80
	3.4.1.	Tendencia de la precipitación.....	81
	3.4.1.1.	Tendencia de la precipitación acumulada anual	82
	3.4.1.1.1.	Tendencia de la precipitación total anual en el río Naranjo en San Marcos	82
	3.4.1.1.2.	Tendencia de la precipitación total anual en el río Grande de Zacapa	85
	3.4.1.2.	Tendencia de las precipitaciones fuertes diarias	86
	3.4.1.2.1.	Precipitaciones fuertes diarias en el río Naranjo en San Marcos	87
	3.4.1.2.2.	Precipitaciones fuertes diarias en el río Grande de Zacapa	89
	3.4.1.3.	Tendencia de la precipitación acumulada anual para septiembre y octubre.....	90

	3.4.1.3.1.	Septiembre	90
	3.4.1.3.2.	Octubre	91
3.5.	Tendencia de la temperatura media diaria		94
3.5.1.	Temperatura media diaria en el río Naranjo en San Marcos.....		95
3.5.2.	Temperatura media diaria en el río Grande de Zacapa.....		99
4.	ANÁLISIS DE CAUDALES		109
4.1.	Análisis de la información		109
4.2.	Datos		109
4.2.1.	Estaciones hidrométricas.....		110
4.2.2.	Rangos y saltos de tiempo en los datos		113
4.3.	Generación de gráficas y datos		117
4.3.1.	Caudal medio anual en estaciones de aforo en el río Naranjo en San Marcos.....		118
4.3.2.	Caudal medio anual en estación de aforo en el río Grande de Zacapa.....		119
4.4.	Tendencia y resultados del caudal medio anual		120
4.5.	Índice de caudal intenso		122
4.6.	Comparación de la tendencia de los caudales y de la precipitación.....		125
CONCLUSIONES			129
RECOMENDACIONES			131
BIBLIOGRAFÍA.....			133

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Cuenca del río Naranjo, San Marcos y cuenca del río Grande de Zacapa	5
2.	Poblados y vías de acceso en la cuenca del río Naranjo	6
3.	Poblados y vías de acceso de la cuenca del río Grande de Zacapa....	7
4.	Ciclos de Milankovitch y clima terrestre	28
5.	Sistema mundial de circulación interoceánica	33
6.	Registros de los cambios de la composición atmosférica	36
7.	Forzamiento radiativo entre 1 750 y 2 005 según el IPCC	37
8.	Contribución por subsector a las emisiones de dióxido de carbono en Guatemala.....	39
9.	Plataforma inicial de RClimdex	48
10.	Menú <i>File</i> del software RClimdex.....	51
11.	Ventana de selección del procedimiento de control de calidad, CC o QC para el software RClimdex.....	52
12.	Ventana de confirmación de la carga del archivo .TXT	52
13.	Ventana de datos de la estación y desviaciones estándar .TXT	53
14.	Ventana para iniciar el cálculo de los índices de RClimdex	55
15.	Datos para iniciar el cálculo de los índices de RClimdex	56
16.	Ventana de índices a analizar por el software RClimdex	56
17.	Ventana de índices almacenados por el software RClimdex	58
18.	Ubicación de las estaciones climáticas e hidrométricas de la cuenca del río Naranjo en San Marcos.....	61

19.	Ubicación de las estaciones climáticas e hidrométricas de la cuenca del río Grande de Zacapa	62
20.	Temperaturas, máxima (t_{max}) en estación Catarina en San Marcos ...	64
21.	Temperaturas, mínima (t_{min}) en estación Catarina en San Marcos....	65
22.	Temperaturas, máxima (t_{max}) en estación Camotán, Zacapa	66
23.	Temperaturas, mínima (t_{min}) en estación Camotán, Zacapa	67
24.	Precipitación (prcp) en estación Catarina en San Marcos	68
25.	Precipitación (prcp) en estación Camotán en Zacapa	69
26.	Precipitación total al año (PRCTOT).....	72
27.	Número de días en un año, con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (R95p)	73
28.	Días al año cuando la temperatura media diaria $>25^{\circ}\text{C}$ (SU25)	73
29.	Días al año cuando la temperatura media diaria $> 20^{\circ}\text{C}$ (TR20)	74
30.	Mayor número de días secos consecutivos en un año (CDD)	74
31.	Mayor número de días húmedos consecutivos en un año (CDW)	75
32.	Número de días al año con lluvia mayor a 10 mm (R10 mm)	75
33.	Número de días al año con lluvia mayor a 20 mm (R20 mm)	76
34.	Precipitación total al año (PRCTOT).....	76
35.	Número de días en un año con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (R95p)	77
36.	Días al año cuando la temperatura media diaria $> 25^{\circ}\text{C}$ (SU25)	77
37.	Días al año cuando la temperatura media diaria $> 20^{\circ}\text{C}$ (TR20)	78
38.	Mayor número de días secos consecutivos en un año (CDD)	78
39.	Mayor número de días húmedos consecutivos en un año (CWD)	79
40.	Número de días al año con lluvia mayor a 10 mm (R10 mm)	79
41.	Número de días al año con lluvia mayor a 20 mm (R20 mm)	80
42.	PRCPTOT, o índice relacionado con la tendencia de la precipitación total anual, río Naranjo	84

43.	PRCPTOT, o índice relacionado con la tendencia de la precipitación total anual, río Grande de Zacapa.....	86
44.	R95p, índice relacionado con las precipitaciones intensas, cuenca del río Naranjo.....	88
45.	R95p, índice relacionado con las precipitaciones intensas, cuenca del río Grande de Zacapa	89
46.	Precipitación total de septiembre, estación San Marcos.....	91
47.	Precipitación total de septiembre, estación La Unión, Zacapa.....	91
48.	Precipitación total de octubre, estación San Marcos.....	92
49.	Precipitación total de octubre, estación La Unión en Zacapa	92
50.	Temperatura media diaria mayor a 25 °C en el río Naranjo mediante datos puntuales	96
51.	Temperatura media diaria mayor a 25 °C en el río Naranjo mediante iso-líneas	97
52.	Temperatura media diaria mayor a 20 °C en el río Naranjo mediante datos puntuales	98
53.	Temperatura media diaria mayor a 20 °C en el río Naranjo mediante iso-líneas	99
54.	Temperatura media diaria mayor a 25 °C en el río Grande de Zacapa mediante datos puntuales	101
55.	Temperatura media diaria mayor a 25 °C en el río Grande de Zacapa mediante iso-líneas	102
56.	Temperatura media diaria mayor a 20 °C en el río Grande de Zacapa mediante datos puntuales	103
57.	Temperatura media diaria mayor a 20 °C en el río Grande de Zacapa mediante iso-líneas	104
58.	Variación de la temperatura media en estación San Marcos cuenca del río Naranjo	108

59.	Variación de la temperatura media en estación La Fragua cuenca del río Grande de Zacapa	108
60.	Ubicación de las estaciones hidrométricas en la cuenca del río Naranjo	112
61.	Ubicación de la estación hidrométricas en la cuenca del río Grande de Zacapa.....	113
62.	Caudal medio anual en estación Pajapita, río Naranjo	115
63.	Caudal medio anual en estación Camotán, río Grande de Zacapa.....	116
64.	Caudal medio anual en estación Meléndrez II (SDII).....	118
65.	Caudal medio anual en estación Pajapita (SDII)	119
66.	Caudal medio anual en estación Camotán (SDII).....	119
67.	Índice SDII o de caudal medio anual en cuenca del río Naranjo	121
68.	Índice SDII o de caudal medio anual en cuenca del río Grande de Zacapa.....	122
69.	Caudal intenso anual en estación Meléndrez II (R95p)	123
70.	Caudal intenso anual en estación Pajapita (R95p)	124
71.	Caudal intenso anual en estación Camotán en Zacapa (R95p).....	124
72.	Índice R95p o de caudales intensos anuales en estación San Marcos.....	127

TABLAS

I.	Estaciones hidrológicas dentro de la cuenca del río Naranjo	10
II.	Estaciones hidrológicas dentro de la cuenca del río Grande de Zacapa.....	11
III.	Climatología y aforos, río Naranjo.....	16
IV.	Climatología y aforos, río Grande de Zacapa	16
V.	Cuencas de la vertiente del océano Pacífico	42

VI.	Cuencas de la vertiente del Caribe	43
VII.	Cuencas de la vertiente del Golfo de México	43
VIII.	Ejemplo de formato de datos para el archivo inicial de datos.	50
IX.	Listado de índices que maneja el software RClimdex	57
X.	Estaciones climáticas analizadas en la cuenca del río Naranjo en San Marcos	59
XI.	Estaciones climáticas analizadas en la cuenca del río Grande de Zacapa	60
XII.	Listado de índices o indicadores utilizados	71
XIII.	Resumen de las tendencia de índices de precipitación en el río Naranjo en San Marcos.....	81
XIV.	Resumen de las tendencia de índices de precipitación en el río Grande de Zacapa	82
XV.	Resumen de la tendencia de la precipitación acumulada anual río Naranjo en San Marcos.....	93
XVI.	Resumen de la tendencia de la precipitación acumulada anual río Grande de Zacapa	93
XVII.	Temperatura media diaria en el río Naranjo en San Marcos.....	95
XVIII.	Temperatura media diaria en el río Grande de Zacapa.....	100
XIX.	Tabla de distribución de frecuencias de los datos de precipitaciones intensas diarias de la estación San Marcos período 1972 a 2011	106
XX.	Tabla de distribución de frecuencias de los datos de precipitaciones intensas diarias de la estación La Fragua período 1970 a 2011	107
XXI.	Estaciones de aforo cuenca del río Naranjo en San Marcos.....	111
XXII.	Estaciones de aforo en la cuenca del río Grande de Zacapa.....	111
XXIII.	Resumen de resultados del caudal medio anual diario	120
XXIV.	Índice R95p relacionado al caudal intenso o crecidas anuales	123
XXV.	Comparación entre eventos de caudales y lluvias intensas	126

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
AC	Antes de Cristo
C	Caudal
CO ₂	Dióxido de carbono
Σ	Desviación estándar
CH ₄	Gas metano
GtCO ₂	Giga toneladas de CO ₂
°C	Grados Celsius
km	Kilómetro
km ²	Kilómetro cuadrado
m ³	Metro cúbico
m ³ /año	Metro cúbico por año
msnm	Metros sobre el nivel del mar
mm	Milímetro
mm/año	Milímetros por año
mm/día	Milímetros por día
NA	No “ <i>available</i> ” o no disponible en el lenguaje de RClimdex
N ₂ O	Óxido nitroso
ppb	Partes por billón
ppm	Partes por millón
P	Precipitación
(S)	“ <i>Slope</i> ” o pendiente de las rectas en las gráficas de tendencia

T	Temperatura
Tmax	Temperatura máxima
Tmin	Temperatura mínima
Wm⁻²	Watt por metro elevado a la menos dos o Watt por metro cuadrado.

GLOSARIO

Afluente	Río tributario de otro mayor.
Año hidrológico	División anual que principia en el mes en que se considera que empieza la época de lluvias o invierno en una región. Para Guatemala el año hidrológico inicia el 1 de mayo y termina el 30 de abril del año subsecuente.
Atmósfera	Conjunto de gases y aerosoles que envuelven a la Tierra y que comúnmente se conoce como el aire.
Biósfera	Es el sistema formado por el conjunto de los seres vivos propios del planeta Tierra, junto con el medio físico que les rodea y que ellos contribuyen a conformar.
Estación hidrológica	Es el lugar donde se efectúan observaciones hidrológicas o climatológicas para fines de estudios y mediciones hidrológicas.
Forzamiento radiativo	Cambios debidos a la radiación solar y erupciones volcánicas.
GEI	Gases de Efecto Invernadero.

GNU	Movimiento y comunidad de software y conocimientos libres.
Hidrología	Ciencia que trata de las características y propiedades del agua sobre el suelo y en su interior, y principalmente de la distribución del agua procedente de lluvias.
Insivumeh	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
Iso-líneas	Línea que une puntos de la superficie de la Tierra donde la cantidad de precipitación o temperatura registra un mismo valor.
Isoyetas	Línea que une puntos de la superficie de la Tierra donde la cantidad de precipitación durante un período dado tiene el mismo valor.
Litósfera	Capa rocosa más superficial del planeta Tierra, con un espesor promedio de unos 300 kilómetros en los continentes y de 70 kilómetros en los océanos.
Outliers	Considera valores extremos diarios como valores diarios que se encuentran fuera de un rango definido por el usuario.

p-value

Conocida también como valor p , es la probabilidad de obtener un resultado al menos tan extremo como el que realmente se ha obtenido, suponiendo que la hipótesis nula es cierta. Es un indicador de la significancia estadística de la serie de datos.

R

Es un lenguaje y ambiente computacional para cálculos y gráficos estadísticos. Es una implementación GNU del lenguaje "S" desarrollado por John Chambers y colegas de los Laboratorios Bell.

RClimdex

RClimdex es un programa basado en Microsoft Excel que proporciona un paquete computacional y el cálculo de índices de extremos climáticos para realizar monitoreo y detección de cambio climático.

Red hidrológica

Conjunto de estaciones meteorológicas e hidrológicas en una cuenca, situadas de manera que sus observaciones puedan facilitar los datos básicos necesarios para el conocimiento del régimen de la cuenca en el espacio y en el tiempo.

RESUMEN

Este trabajo de graduación presenta un análisis de la precipitación y la temperatura en las cuencas del río Naranjo en San Marcos y del río Grande de Zacapa, y cómo estas variables pudieron registrar modificaciones a través del tiempo debido al cambio climático.

Los valores de mayor importancia en este trabajo son: la precipitación, la temperatura y los caudales. Cada cuenca fue analizada a través de los datos recopilados de las diferentes estaciones hidrológicas e hidrométricas (de aforo) instaladas en las zonas de interés. Estos datos fueron proporcionados por el Insivumeh a partir de 1969 hasta el 2011, y posteriormente procesados estadísticamente por el software RClimdex.

Dicho software a través de un control de calidad permitió procesar los datos y generar gráficas que permitieron analizar cuál es y si existe una tendencia de variación en la temperatura y si este cambio afecta al recurso hídrico en el país.

OBJETIVOS

General

Analizar y establecer si los cambios en el clima han favorecido una variación en el recurso hídrico en las cuencas del río Naranjo en San Marcos y el río Grande de Zacapa.

Específicos

1. Determinar la tendencia de variación de la precipitación en las cuencas del río Naranjo en San Marcos y el río Grande de Zacapa.
2. Determinar la tendencia de variación de la temperatura en las cuencas del río Naranjo en San Marcos y el río Grande de Zacapa.
3. Determinar la tendencia de variación de los caudales en las cuencas del río Naranjo en San Marcos y el río Grande de Zacapa.
4. Determinar si existe una relación en la variación del caudal y la variación de la precipitación en las cuencas del río Naranjo en San Marcos y el río Grande de Zacapa.

INTRODUCCIÓN

Los estudios y análisis que han surgido en los últimos años acerca del daño que ha creado el cambio climático al planeta, han producido importantes conclusiones de las diferencias observadas en el clima, debido a la acción del ser humano.

Se ha avanzado mucho en materia de investigación y análisis de los diferentes sistemas biológicos, y cómo ha afectado el cambio climático cada hábitat y la interrelación que existe entre otros seres vivientes y el humano. De esta idea y de la necesidad de satisfacer las necesidades de las poblaciones humanas surge la importancia de establecer numéricamente cuáles son los recursos aún disponibles para estas.

Sin embargo, el cambio climático afecta directamente la calidad de los recursos como el agua, líquido fundamental para la vida y la salud del ser humano. Además de estos elementos sociales, existen otros como la infiltración al manto freático, los caudales medios ideales en ríos y disminución en la precipitación media. Si se habla de un aumento de precipitación, se observan con el tiempo tormentas de mayor intensidad y recurrencia, lo cual implica desastres naturales que inciden directamente en las poblaciones.

Las variaciones climáticas como el aumento de la temperatura promedio afecta de tal modo, que se presentan mayores períodos de sequía, pues los cuerpos de agua del planeta presentan una alteración en su ciclo hidrológico normal.

En el capítulo uno de este trabajo de graduación se presenta información de las cuencas del río Naranjo en San Marcos y el río Grande de Zacapa, referente a ubicación, vías de acceso, departamentos dentro de la cuenca, climatología, geomorfología, geología y uso de los suelos.

En el capítulo dos se muestra información sobre el clima, cómo actúa, sus componentes, causas que ocasionan el cambio climático y los mecanismos que influyen en este, además de la relación que existe entre los recursos hídricos y el cambio climático y cómo este puede afectar al territorio nacional.

En el capítulo tres se muestra un análisis completo de los datos registrados en las estaciones ubicadas las cuencas estudiadas, durante el período de 1979 al 2011, pasando por un control de calidad para fuesen utilizables por el programa estadístico. Posteriormente se determinaron los índices de clima mediante el software Rclimdex, que a su vez generó gráficos con base en los datos de cada estación y con esto obtener resultados descriptivos de la variabilidad de la temperatura media diaria y precipitación.

Para simplificar la interpretación de los datos obtenidos luego del análisis estadístico se elaboraron tablas y posteriormente mapas en los que se localizan las estaciones de las cuencas, y se marca su tendencia al incremento o decremento, tanto para la precipitación y como para la temperatura.

El cuarto capítulo muestra el análisis de los caudales medios anuales y cuál fue el comportamiento registrado durante los años estudiados. Se analizó esta variable de igual manera que los datos de precipitación y temperatura a través de RClimdex. Posteriormente se presentan las conclusiones del estudio y las recomendaciones que se consideran justificadas según los hallazgos obtenidos.

1. ANTECEDENTES

1.1. Ubicación y localización de las cuencas de los ríos

A continuación se muestra la ubicación y localización de algunas cuencas y ríos.

1.1.1. Ubicación y localización de la cuenca del río Naranjo

La cuenca del río Naranjo se encuentra localizada entre los paralelos 14°29'49" y 15°01'14" de latitud norte y los meridianos 91°36'56" y 92°12'23" de longitud oeste. Por la extensión de su superficie (1 267,70 km²) y representa un 5,0 % del área de la vertiente y un 1,2 % del total del país.

Tiene por límites geográficos al norte la subcuenca del río Cuilco, al este la cuenca de río Samalá, al oeste la cuenca del río Suchiate y al sur la cuenca del río Ocosito y el océano Pacífico.

La mayor parte del área que cubre la cuenca se ubica en el departamento de Quetzaltenango (73 % aproximadamente) y en menor cantidad de área en San Marcos (27 % del total), según datos del MARN en su documento *cuencas hidrográficas de Guatemala*, 2011, p. 8 (véase la figura 1).

1.1.2. Ubicación y localización de la cuenca del río Grande de Zacapa

La cuenca del río Grande de Zacapa, se encuentra localizada entre los paralelos 14°33'16" y 15°05' 06" de latitud norte y entre los meridianos 89°48'45" y 89° 08' 24" de longitud oeste.

La cuenca cubre un área de 2 474,9 km² y representa un 7,0 % del área de la vertiente y un 2,0 % del país.

Tiene por límites geográficos al norte y noroeste, la cuenca del río Motagua, al sur las cuencas del río Olopa y río Ostúa Güija y pertenece a la vertiente del Atlántico o del Caribe.

La mayor parte de la cuenca se ubica dentro del departamento de Chiquimula, que es aproximadamente el 69,0 % del área. El 17,0 % lo cubre el departamento de Zacapa. En menor porcentaje los departamentos de Jalapa con 11,0 % y por último Jutiapa con solamente 3,0 % del total del área de la cuenca, según datos del MARN en su documento *Cuencas hidrográficas de Guatemala*, 2011. p. 25 (véase la figura 1).

1.2. Accesos y comunicaciones

A continuación se describen los accesos y comunicaciones para el río Naranja y río grande de Zacapa.

1.2.1. Río Naranjo

Es un corto río costero del suroccidente de Guatemala. Nace en la Sierra Madre en el departamento de San Marcos y descorre en dirección del sur.

1.2.1.1. Carreteras

La red vial que se localiza en la superficie de las cuenca está integrada principalmente por las carreteras: Centroamericanas CA-2 y CA-2^a, las nacionales 1, 6w, 8, 12, 12n, y 13, y las departamentales 2, 3, 4, 6, 11 y 12, según la Dirección General de Caminos.

1.2.2. Río Grande de Zacapa

Principal fuente de agua que tiene el departamento de Zacapa, es uno de los más importantes de la cuenca atlántica, nace en el municipio Chichicastenango.

1.2.2.1. Carreteras

La cuenca es atravesada en diferentes departamentos por las siguientes carreteras de acceso principal: Zacapa: CA-10, CA11, Chiquimula: CA 12, CA 18, Jutiapa: CA 1; Chiquimula: CA11, CA 12, CA 18, según la Dirección General de Caminos.

1.3. Poblaciones dentro del área de las cuencas

Muchas de estas poblaciones que están dentro del área de las cuencas son beneficiadas, a continuación se encuentran algunas.

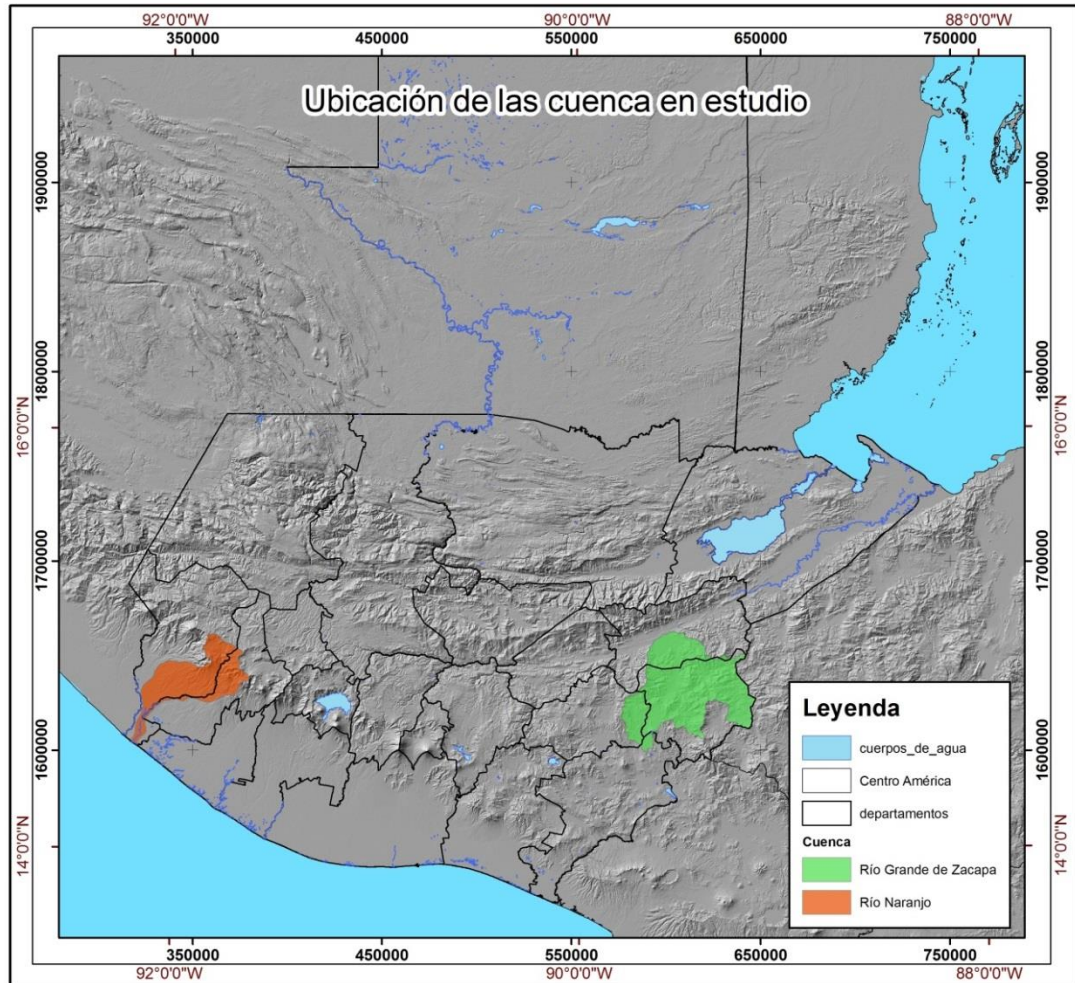
1.3.1. Poblaciones dentro del área de la cuenca del río Naranjo

La cuenca cubre parcialmente los departamentos de Quetzaltenango, San Marcos y Retalhuleu. Y de ellos los municipios de Colomba, Concepción Chiquirichapa, Palestina de Los Altos, San Juan Ostuncalco, San Martín Sacatepéquez, y Coatepeque en el departamento de Quetzaltenango.

En el departamento de San Marcos: Nuevo Progreso, La Reforma, San Cristóbal Cucho, El Tumbador, Pajapita, el Quetzal, San Antonio Sacatepéquez, San Pedro Sacatepéquez, San Marcos, Esquipulas Palo Gordo, El Rodeo, Catarina, San Lorenzo, Ocos, y Ayutla. La cuenca cuenta con una población de 373 248 habitantes según Informe de *estimaciones de la población total por municipio: Período 2008-2020*, del INE, p. 3 y 4.

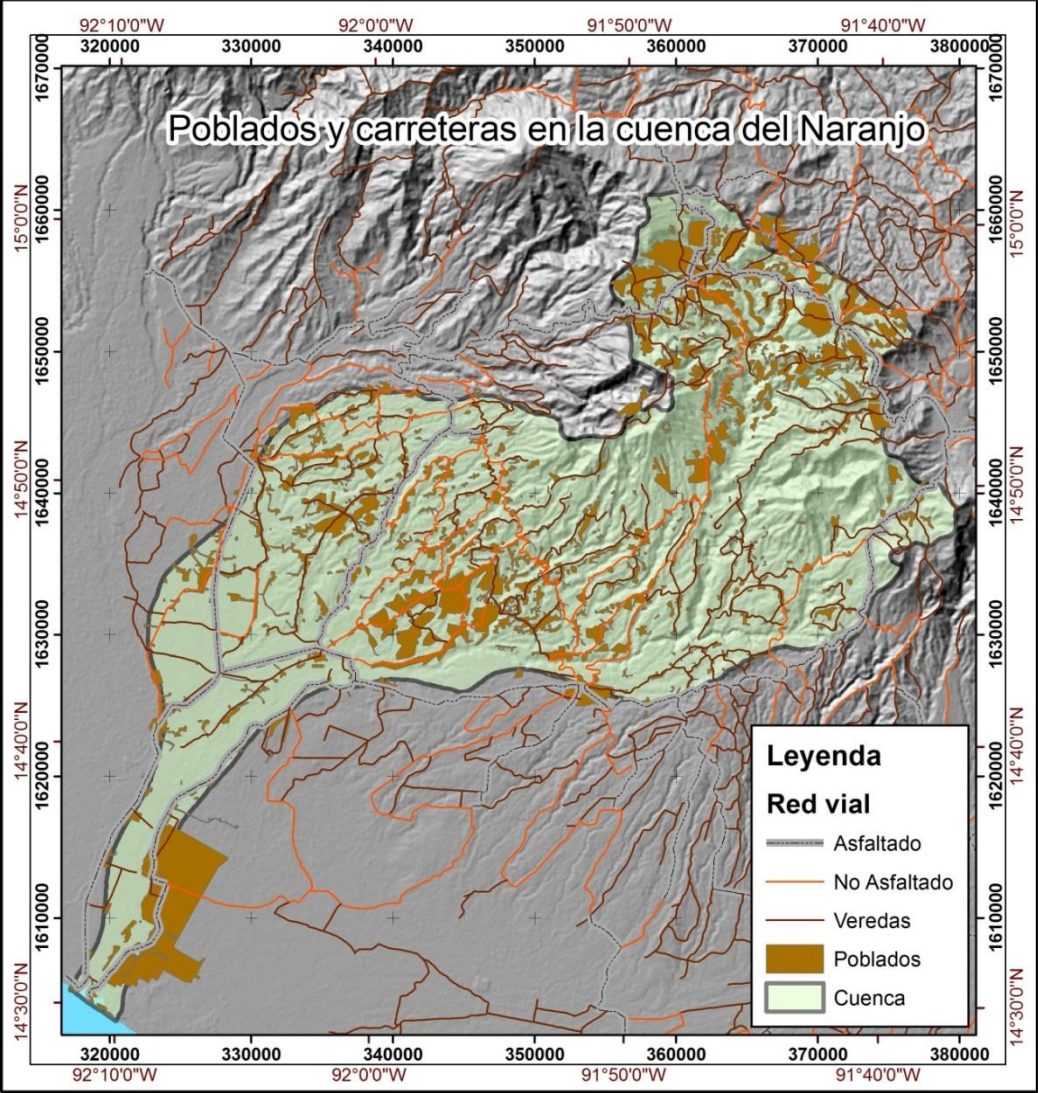
Véase la figura 2 para la referencia de la distribución de los poblados y áreas urbanizadas dentro de la cuenca.

Figura 1. Cuenca del río Naranjo, San Marcos y cuenca del río Grande de Zacapa



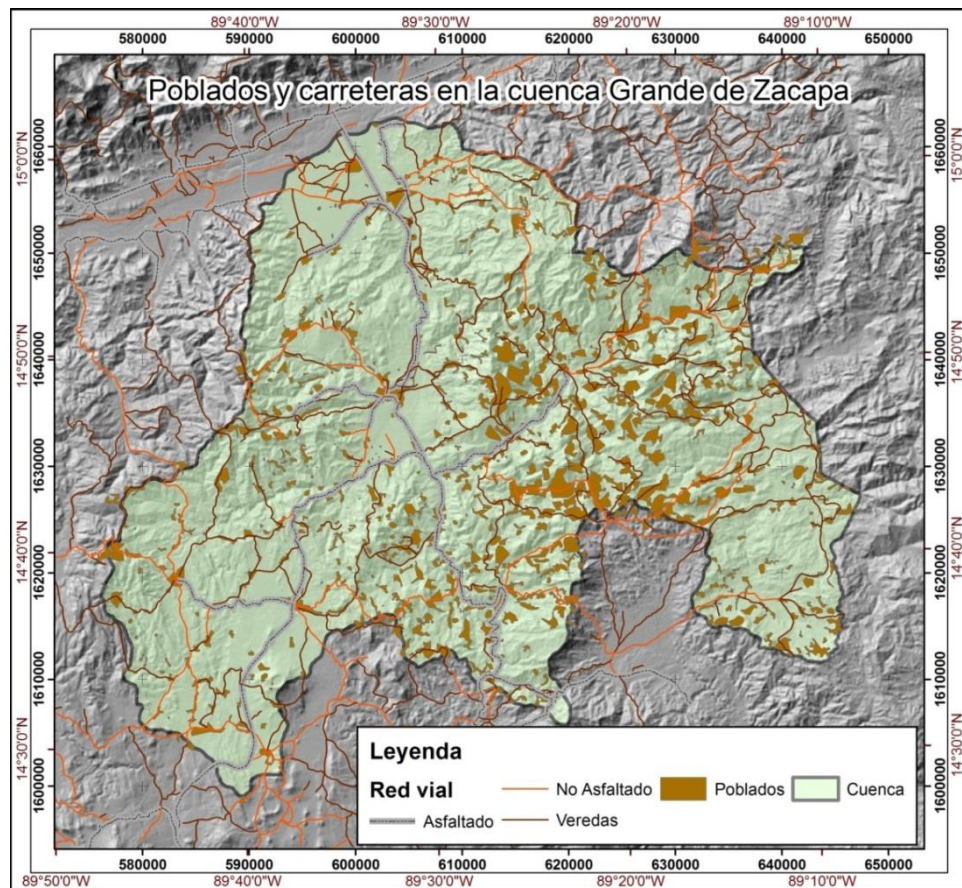
Fuente: elaboración propia con datos del MARN, 2010.

Figura 2. Poblados y vías de acceso en la cuenca del río Naranjo



Fuente: elaboración propia, con datos del MARN y Dirección General de Caminos, 2010.

Figura 3. **Poblados y vías de acceso de la cuenca del río Grande de Zacapa**



Fuente: elaboración propia, con datos del MARN y Dirección General de Caminos 2010.

1.3.2. **Poblaciones dentro del área de la cuenca del río Grande de Zacapa**

La cuenca atraviesa parcialmente el departamento de Zacapa, en los municipios de Zacapa, Estanzuela, La Unión y Huité. En el departamento de Jutiapa, los municipios de Santa Catarina Mita y Agua Blanca. Del departamento de Chiquimula atraviesa los municipios de Chiquimula, San José

la Arada, San Juan Ermita, Jocotán, Camotán, Olopa, Esquipulas, Concepción Las Minas, Quetzaltepeque, San Jacinto e Ipala.

En el departamento de Jalapa cubre los municipios de San Pedro Pinula, San Luis Jilotepeque, San Manuel Chaparrón. Dentro de la cuenca hay una población de 386 334 habitantes según *Informe de estimaciones de la población total por municipio. Período 2008-2020*, del INE, p. 6.

Véase la figura 3 para la referencia de la distribución de los poblados y áreas urbanizadas dentro de la cuenca.

1.4. Descripción de las cuencas

A continuación se encuentra la descripción de la cuenca río Naranjo y río Grande de Zacapa.

1.4.1. Cuenca del río Naranjo

La cuenca de río Naranjo presenta en el cauce principal un ancho promedio de 3,5 kilómetros en la parte sur, en la parte central de 21 kilómetros y al norte, de 6 kilómetros aproximadamente. La divisoria superficial tiene una longitud de 227 km, la que limita 1 267,70 km², y el punto de mayor elevación que se encuentra sobre ella es de 3 560 msnm correspondiendo al Cerro Chile.

Entre los principales accidentes geográficos y sus elevaciones en metros sobre el nivel del mar (msnm) se encuentran: el volcán Chicabal (2 900) y los cerros Tuicacaix (3 322), Los Veinte Palos (3 082), Siete Tambores (2 572), Saquibutz (2 514) y Tumincantzé (2 792), todos localizados al este de la cuenca. La elevación media de la cuenca es de 1 270,00 msnm y la pendiente

media de 21 % además de presentar una variación de elevación de 3 500 metros.

1.4.2. Cuenca del río Grande de Zacapa

La cuenca de río Naranjo presenta en su cauce principal una longitud de 105,1 km, la que limita un área de 2 486,00 km².

La elevación media de la cuenca es de 900 msnm, presentando una pendiente media de 381 m/km. En Chiquimula se encuentran las siguientes áreas protegidas: zona de veda definitiva volcán Quezaltepeque, con una superficie aún no determinada; área de uso múltiple volcán y laguna de Ipala, con 2 010 Ha y la Reserva de la biosfera Trifinio, con 8 000 Ha. Estas áreas son administradas por el Consejo Nacional de Áreas Protegidas (CONAP).

Jalapa presenta topografía diversa, lo que contribuye en que sus terrenos sean montañosos y sus alturas varíen entre los 1 720 msnm en San Carlos Alzatate y los 800 msnm en San Luis Jilotepeque. Por el sur de este departamento penetra el ramal de la Sierra Madre, el cual toma diversos nombres locales según sus montañas como de El Norte y la Cumbre en San Pedro Pinula, la de Güisitepeque en San Manuel Chaparrón; y la del Aguacate en San Carlos Alzatate.

En Jalapa, también están los siguientes volcanes: Jumay y Cerro Mojón en el municipio de Jalapa; el volcán Monterrico entre los municipios de San Pedro Pinula y San Manuel Chaparrón; el volcán de Alzatate en San Carlos Alzatate, el cerro de la Lagunilla en San Luis Jilotepeque.

Existen altiplanicies y valles, así como cerros, colinas, desfiladeros y barrancos cubiertos de variada vegetación, aunque muchos de estos bosques han ido desapareciendo por la tala inmoderada, lo que ha contribuido a la escasez de agua para irrigación

1.5. Estaciones hidrológicas en las cuencas

A continuación se encuentran las estaciones hidrológicas en las cuencas en el río Naranjo y río Grande de Zacapa.

1.5.1. Estaciones de la cuenca del río Naranjo

Para este estudio se utilizaron 4 estaciones hidrológicas pertenecientes al Insivumeh, la siguiente tabla muestra las estaciones a detalle.

Tabla I. **Estaciones hidrológicas dentro de la cuenca del río Naranjo**

Estación	Longitud	Latitud	Elevación (msnm)	Estado
San Marcos	-91,8094	14,9541	2 420	Activa
Ayutla	-92,1394	14,6736	24	Inactiva
Catarina	-92,0772	14,8556	233	Activa
La Colonia	-91,9555	14,8252	920	Inactiva

Fuente: elaboración propia, con datos del INSIVUMEH.

1.5.2. Estaciones de la cuenca del río Grande de Zacapa

Para este estudio se utilizaron 5 estaciones hidrológicas pertenecientes al Insivumeh, la tabla II muestra las estaciones a detalle.

Tabla II. **Estaciones hidrológicas dentro de la cuenca del río Grande de Zacapa**

Estación	Longitud	Latitud	Elevación (msnm)	Estado
Camotán	-89,3728	14,8206	450	Activa
Esquipulas	-89,5086	14,5589	950	Activa
Ipala	-89,61806	14,6208	832	Inactiva
La Unión	-89,2911	14,9633	1 000	Activa
La Fragua	-89,5844	14,9642	210	Activa

Fuente: elaboración propia, con datos del INSIVUMEH.

1.6. Geomorfología, climatología, afluentes y parámetros hidrológicos

A continuación se describe la geomorfología, climatología, afluentes y parámetros hidrológicos para el río Naranjo y río Grande de Zacapa.

1.6.1. Geomorfología

Se centra en el estudio de las formas del relieve, pero dado que estas son el resultado de la dinámica litosférica, como insumos, tales como la climatología e hidrografía.

1.6.1.1. Río Naranjo

El paisaje presenta: regiones de abanico aluvial del río Cabús, planicie aluvial de los ríos Naranjo y Ocosito, superficie de inundación, relleno volcánico de El Tumbador, Coatepeque y Nuevo San Carlos, montañas volcánicas altas de Occidente, Terrazas del Río Tacaná, Conos y domos volcánicos y planicies onduladas.

1.6.1.2. Río Grande de Zacapa

El paisaje de la cuenca cuenta con: cerros y conos volcánicos, las montañas volcánicas orientales, planicies de las montañas volcánicas orientales, conos y laderas suaves de Jutiapa, cerros y colinas irregulares de Esquipulas, depresión tectónica de Chanmagua, serranías de ladera de fuerte pendiente, intrusivo de Chiquimula, abanicos aluviales, llanura aluvial de desborde del río Motagua, terrazas antiguas del río Motagua.

1.6.2. Climatología

Estudia los promedios de los valores meteorológicos durante el tiempo más largo posible para establecer los distintos tipos climáticos de cada región de la superficie terrestre.

1.6.2.1. Río Naranjo

Por la topografía del terreno posee diversidad de climas y por ende sus zonas de vida son diversas. Se identifican en esta región como en el resto del país dos épocas definidas, la de lluvias entre mayo a octubre y época seca de noviembre a abril.

El departamento de San Marcos se caracteriza por un clima generalmente templado, aunque posee una variedad de climas debido a su topografía. En la costa sur, el terreno es plano, por lo que el clima es cálido, como en el municipio de Ocós a 3 msnm en el altiplano por la altura, el clima es frío, como en el municipio de Ixchiguán a 3 200 msnm.

El Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (Maga), identifica en el *Gran atlas de las cuencas hidrográficas de Guatemala*, siete zonas de vida bien definidas en la cuenca:

bs-S: Bosque seco subtropical

bh-S(t): Bosque húmedo subtropical templado

bh-S(c): Bosque húmedo subtropical cálido

bmh-S(c): Bosque muy húmedo subtropical cálido

bh-MB: Bosque húmedo montano bajo subtropical

bmh-MB: Bosque muy húmedo montano bajo subtropical

bmh-M: Bosque muy húmedo montano subtropical

1.6.2.2. Río Grande de Zacapa

Ya que en la cuenca del río Grande de Zacapa se encuentran diversos municipios de 4 departamentos, se hace mención de las diferentes características en cada departamento o municipios donde mayor influencia tiene el área de la cuenca.

El departamento de Chiquimula es reconocido como uno de los departamentos más calientes de Guatemala, sin embargo, hay variedad de climas, predominando el cálido-árido. Cerca del volcán Ipala hace un clima templado y a veces frío.

En Chiquimula se observan claramente tres zonas de vida que se identifican por su condición topográfica según la clasificación propuesta por Leslie Holdridge en 1978, y El Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (Maga), identifica en el *Gran atlas de las cuencas hidrográficas de Guatemala*, siendo estas:

bs-S: Bosque seco subtropical

bh-S(t): Bosque húmedo subtropical templado

bmh-S(t): Bosque muy húmedo subtropical templado

Sobresale en este departamento, la zona de vida clasificada como bosque húmedo subtropical templado.

En el departamento de Jalapa, debido a su topografía, pueden encontrarse 5 zonas de vida vegetal, según el Maga:

bs-S: Bosque seco subtropical

bh-S(t): Bosque húmedo subtropical templado

bmh-Sí: Bosque muy húmedo subtropical cálido

bh-MB: Bosque húmedo montano bajo subtropical

bmh-MB: Bosque muy húmedo montano bajo subtropical

En Zacapa, hacia el sur, existen pequeñas cadenas de montes y cerros aislados, los cuales son separados por hondonadas más o menos profundas,

mientras que en la parte central el cauce del río Motagua forma un extenso valle que, dependiendo de la configuración topográfica, se estrecha o se ensancha, dando origen a vegas muy fértiles, así como a llanuras tan grandes como los Llanos de La Fragua.

Se pueden identificar según el Maga, además en esta área de la cuenca zonas de vida como:

bmh-SI: Bosque muy húmedo subtropical cálido

bh-MB: Bosque húmedo montano bajo subtropical

bmh-MB: Bosque muy húmedo montano bajo subtropical

me-S: Monte espinoso subtropical

Del departamento de Jutiapa se puede mencionar que el clima en general varía de cálido a templado pero predominantemente es un clima seco. Puede encontrarse zonas de vida tales como:

bs-S: bosque seco subtropical

bh-S(t): bosque húmedo subtropical templado

1.6.3. Aforos y parámetros hidrológicos

A continuación se encuentran los aforos y parámetros del río Naranjo y río Grande de Zacapa.

1.6.3.1. Río Naranjo

A continuación se muestra detalladamente la climatología y aforos del río Naranjo en la tabla III.

Tabla III. **Climatología y aforos, río Naranjo**

Climatología y aforos	Parámetros
Temperatura media anual	23,01 °C
Precipitación media anual	2 600,00 mm
Caudal medio anual	70,55 m ³ /s (año 2006)

Fuente: MARN. Cuencas hidrográficas de Guatemala, 2012. p. 8.

1.6.3.2. Río Grande de Zacapa

A continuación se muestra detalladamente la climatología y aforos del río grande de Zacapa en la tabla IV.

Tabla IV. **Climatología y aforos, río Grande de Zacapa**

Climatología y aforos	Parámetros
Temperatura media anual	24,14 °C
Precipitación media anual	900,00 mm
Caudal medio anual	20,73 m ³ /s (año 2006)

Fuente: MARN. Cuencas hidrográficas de Guatemala, 2012. p. 25.

1.7. Geología y suelos

A continuación se describe la geología y suelo del río Naranjo y río Grande de Zacapa.

1.7.1. Geología de la cuenca del río Naranjo

La mayor presencia de rocas es del tipo ígneas metamórficas. La taxonomía de los suelos según Maga, para la cuenca principalmente presenta Andisoles, en menor presencia Entisoles y Molisoles, y en muy poca presencia los suelos de tipo Alfisoles.

Según el Maga, los suelos en la cuenca se clasifica como: Suelos aluviales (SA), Bucul (Bu), Tiquisate-franco arenosa (Ti), Retalhuleu (Ra), Suchitepequez (Sx), Ostuncalco (Os), Cimas Volcánicas (CV), Patzité (Pz) y Camanchá (CM) principalmente.

1.7.2. Geología de la cuenca del río Grande de Zacapa

La mayor presencia de rocas es del tipo ígneas metamórficas. Según la taxonomía de suelos para el Maga, la cuenca cuenta con suelos clasificados como Entisoles, Inceptisoles y algunas áreas menores de Ultisoles.

La clasificación de los suelos presenta áreas como: Tahuainí (Ta), Jalapa (Ji), Subinal (Sub), Chol (Chg), Sholanimá (Sn), Suelos de los Valles (SV) y Culma (Cul).

2. EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SU IMPACTO SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS

2.1. El sistema climático

Es la interacción de una serie de subsistemas, los que poseen diversas propiedades físicas que se expresan a través de fuertes interconexiones, por medio de las cuales se transfiere energía, momento y materia.

2.1.1. Generalidades sobre el clima

Para comprender el clima es necesario hacer una diferencia entre este y el llamado tiempo. Partiendo del hecho que en cualquier momento la tropósfera terrestre tiene un conjunto determinado de propiedades físicas como: la temperatura, las precipitaciones, humedad, presión y vientos, y algunos otros que se generan debido a estos, se puede determinar que a corto plazo, en un momento y lugar determinados, estos elementos son los llamados tiempo.

Por otro lado clima es el tiempo medio en una zona, a largo plazo; es un patrón de las condiciones atmosféricas o de tiempo de una zona, incluyendo las variaciones estacionales y extremas del tiempo (por ejemplo: huracanes, sequías o lluvias prolongadas) registradas en períodos de tiempo largos.

Los elementos que constituyen el clima son: temperatura, presión, vientos, humedad y precipitación. De estos cinco elementos, los más importantes son la temperatura y la precipitación, porque en gran parte, los otros tres elementos o

rasgos del clima están estrechamente relacionados con los dos que se han citado.

En otras palabras, la mayor o menor temperatura da origen a una menor o mayor presión atmosférica, respectivamente, ya que el aire caliente tiene menor densidad y por ello se eleva, mientras que el aire frío tiene mayor densidad y tiende a descender. A su vez, estas diferencias de presión dan origen a los vientos, los cuales transportan la humedad y las nubes y, por lo tanto, dan origen a la desigual repartición de las lluvias sobre la superficie terrestre.

2.1.2. Componentes del sistema climático

Los dos factores principales que determinan el clima de una región son la temperatura, con sus variaciones estacionales y la cantidad y distribución de las precipitaciones. Los patrones de temperatura y precipitaciones que conducen a los diferentes climas son producidos básicamente por la forma de circular del aire en la superficie del planeta.

Adicionalmente hay factores que determinan los patrones de la circulación global del aire. Uno es la variación a largo plazo de la cantidad de energía solar que choca con la Tierra. Tal variación tiene lugar a causa de los cambios ocasionales en la producción solar. Ligeras desviaciones planetarias en la que el eje de la Tierra gira excéntricamente (ciclos de 22 000 años) y se inclina (ciclo de 44 000 años) al girar alrededor del Sol y minúsculos cambios en la forma de su órbita alrededor del Sol (ciclo de 100 000 años). (IDEAM, 2007).

Un segundo factor es el desigual calentamiento de la superficie de la Tierra. El aire se calienta mucho más en el ecuador (donde los rayos del sol

inciden directa y perpendicularmente todo el año) que en los polos (donde los rayos inciden de forma oblicua y se distribuyen áreas mayores).

Un tercer factor, son los cambios estacionales que se presentan por la inclinación del eje de la Tierra; debido a este hecho, unas regiones quedan orientadas hacia el Sol, pero otras hacia el lado opuesto. Este fenómeno se presenta cuando la tierra describe su órbita anual, creando estaciones de signo opuesto en los hemisferios boreal y austral.

En cuarto lugar, la Tierra gira sobre su eje, lo que evita que las corrientes de aire vayan derechas al norte o al sur desde el ecuador. Las fuerzas creadas por esta rotación en la atmósfera desvían los vientos (masas de aire en movimiento) hacia el este en el hemisferio austral. El resultado es, seis enormes células de convección de masas de aire arremolinado (tres al norte y tres al sur del ecuador) que transportan calor y agua de una zona a otra.

El clima y la circulación global del aire están afectados por las propiedades del aire y del agua. Cuando se calienta por la acción del Sol, el agua de los océanos se evapora y el calor fluye hacia la atmósfera, especialmente cerca del ecuador. Esta humedad expande el aire caliente, que se vuelve menos denso y lo eleva en vórtices bastante estrechos. Estas espirales ascendentes crean un área de baja presión en la superficie de la Tierra.

Al subir, este aire cargado de humedad se enfría y libera humedad por condensación. Cuando el vapor de agua se condensa libera calor, que se irradia en el espacio. En este punto el aire, más frío, seco y denso, cae y crea una zona de alta presión. Cuando estas masas de aire fluyen a través de la superficie de la tierra, captan el calor y la humedad e inician su ascenso de nuevo. Las células de convección resultantes, hacen circular el aire, el calor y la

humedad tanto verticalmente como de un lugar a otros en la tropósfera dando origen a los diferentes climas y patrones de vegetación.

El clima también es afectado por las corrientes oceánicas. Los factores relacionados, más las diferencias en la densidad del agua, producen las corrientes oceánicas calientes y frías. Estas, al igual que las corrientes de aire, redistribuyen el calor obtenido del Sol e influyen en el clima y en la vegetación, especialmente en las costas de los continentes e islas. Las corrientes además, ayudan a mezclar las aguas oceánicas y a transportar nutrientes y oxígeno disuelto que los organismos acuáticos necesitan.

Y por otro lado y de gran importancia es la influencia que la composición química de la atmósfera presenta. Pequeñas cantidades de dióxido de carbono y de vapor de agua, así como trazas de ozono, metano, óxido nitroso, hidrocarburos clorofluorados y otros gases de la tropósfera juegan un papel importante en la determinación de las temperaturas medias de la Tierra y, por ende, de sus climas. Estos gases son conocidos como “gases de efecto invernadero”.

Estos gases actúan igual que los paneles de un invernadero: dejan pasar a través de la tropósfera la luz, la radiación infrarroja y parte de la radiación ultravioleta del Sol. La superficie de la Tierra absorbe gran parte de esta energía solar y la degrada en ondas de mayor longitud, radiación infrarroja (que es el calor) que sube a la tropósfera. Parte de este calor escapa por el espacio, parte es absorbido por las moléculas de los gases de efecto invernadero, calentando el aire y otra parte vuelve hacia la superficie de la Tierra. Esta manera natural de capturar el calor en la tropósfera se llama “efecto invernadero”.

2.2. Causas naturales del cambio climático

Los forzamientos naturales surgen debido a los cambios solares y las explosiones de las erupciones volcánicas. La radiación solar total se ha incrementado gradualmente en la era industrial causando un pequeño forzamiento “radiativo”. Ello se añade a los cambios cíclicos en la radiación solar que tienen un ciclo de 11 años. La energía solar calienta directamente al sistema climático y puede afectar también la abundancia en la atmósfera de algunos gases de efecto invernadero, como el ozono estratosférico.

Las explosiones de las erupciones volcánicas pueden crear un forzamiento negativo de breve duración (de 2 a 3 años) mediante el aumento que ocurre en el sulfato en aerosol de la estratósfera, esto de manera temporal. En la actualidad, la estratósfera se encuentra libre de aerosoles volcánicos pues la última erupción grande fue en 1991 (volcán Pinatubo, Filipinas).

Las diferencias en las estimaciones de los forzamientos radiativos entre los valores actuales y los del comienzo de la era industrial para los cambios en la irradiancia solar y los volcanes, son muy pequeñas en comparación con las diferencias en los forzamientos radiativos que se estima son el resultado de la actividad humana. Como consecuencia de ello, en la atmósfera actual, los forzamientos radiativos ocasionados por la actividad humana son mucho más importantes para el cambio climático actual y futuro que los forzamientos radiativos calculados a partir de los cambios en los procesos naturales (IDEAM, 2007).

2.2.1. Mecanismos radiativos

Los cambios en la abundancia de los gases de efecto invernadero y de los aerosoles atmosféricos, en la radiación solar y en las propiedades de la superficie de la Tierra alteran el balance de energía del sistema climático. Estos cambios se expresan en función del “forzamiento radiativo”, que se emplea para comparar cómo una variedad de factores humanos y naturales influyen en el calentamiento o enfriamiento del clima global.

Desde el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC, nuevas observaciones y modelizaciones de los gases de efecto invernadero, la actividad solar, las propiedades de la superficie de la Tierra y algunos aspectos de los aerosoles han mejorado las estimaciones cuantitativas del forzamiento radiativo.

“Las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso mundiales han aumentado, sensiblemente, como resultado de las actividades humanas desde 1750 y en la actualidad han superado los valores preindustriales determinados en muestras de núcleos de hielo que abarcan muchos cientos de años. Los aumentos globales de la concentración de dióxido de carbono se deben fundamentalmente al uso de combustible fósil y a los cambios del uso de la tierra, mientras que los de metano y óxido nitroso se deben principalmente a la agricultura.” (Cuarto Informe de Evaluación del IPCC).

El dióxido de carbono, es el gas de efecto de invernadero antropógeno más importante. La concentración de dióxido de carbono en la atmósfera terrestre se han incrementado de un valor preindustrial de aproximadamente 280 ppm a 379 ppm en 2005.

La concentración atmosférica de dióxido de carbono en 2005 supera, en gran medida, su margen de variación natural durante los últimos 650 000 años (de 180 a 300 ppm), según muestran núcleos de hielo de glaciares de los que se han tomado muestras y medido concentraciones de dióxido de carbono.

El ritmo de aumento de la concentración de dióxido de carbono anual fue mayor durante la década de 1995 a 2005 con una media de 1,9 ppm al año, que los anteriores desde el comienzo de las mediciones directas continuas en la atmósfera entre 1960 a 2005 con una media de 1,4 ppm al año, aunque existe una variabilidad interanual en el ritmo en aumento.

La fuente primaria del aumento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera desde la época preindustrial se debe al uso de combustibles fósiles, y el cambio en el uso de la tierra constituye otra contribución significativa, pero de menor escala.

Las emisiones anuales de dióxido de carbono fósil aumentaron de un promedio de: 23,5 GtCO₂ por año en el decenio de 1990 a 26,4 GtCO₂ por año del 2000 al 2005.

Las emisiones de dióxido de carbono asociadas con cambios en el uso de la tierra se estiman fueron de 1,6 GtCO₂ a 5,9 GtCO₂ por año durante el decenio de 1990, aunque estas estimaciones presentan gran incertidumbre.

La concentración de metano en la atmósfera mundial ha aumentado de un valor de unos 715 ppb, en la época preindustrial, a 1 732 ppb a principios del decenio de 1990, y era de 1 774 ppb, en 2005.

La concentración atmosférica de metano en 2005 excede, en gran medida, al margen de variación natural de los últimos 650 000 años, de 320 a 790 ppb, según muestras de núcleos de hielo.

El ritmo de aumento han disminuido desde principios del decenio de 1990, en consonancia con el total de emisiones (la suma de las fuentes antropógenas y las fuentes naturales) siendo casi constante durante ese período. Es muy probable que el aumento observado en la concentración de metano se deba a actividades antropógenas, principalmente actividades agrícolas y al uso de combustibles fósiles, pero aún no se han determinado adecuadamente las contribuciones relativas de otros tipos de fuentes.

La concentración de óxido nitroso en la atmósfera mundial aumentó de un valor de la era preindustrial de unos 270 ppb a 319 ppb en 2005. El ritmo de aumento, se ha mantenido aproximadamente constante desde 1980. Más de un tercio de todas las emisiones de óxido nitroso son antropógenas, ocasionadas principalmente por la agricultura (Cuarto Informe de Evaluación del IPCC).

2.2.2. Mecanismos no radiativos

Dentro de los denominados mecanismos no radiativos, se puede mencionar las corrientes oceánicas, que permiten el intercambio de calor entre las aguas de los océanos. Adicionalmente se puede mencionar la deriva continental, la orogénesis o formación de montañas y los movimientos verticales en la corteza de la Tierra, llamada isostasia, que afectan el nivel del mar y por ende las superficies marinas que se calientan.

2.2.3. Mecanismos externos

La atmósfera con sus principales componentes, gases, nubes y aerosoles es afectada o forzada, desde el espacio exterior y desde la superficie terrestre por distintos procesos. Por ejemplo, las fluctuaciones en las emisiones solares y los cambios en los parámetros orbitales de la tierra con respecto al Sol, son forzantes externos puesto que no son modificados si el clima de la Tierra se calienta o enfría. Los gases de invernadero producidos por las actividades antropogénicas, el polvo y los cambios en el albedo de la superficie terrestre, se consideran también forzantes externos.

2.2.3.1. Variaciones galácticas

Hay muchos factores de forzamiento climático que generan un enorme rango de períodos. El más largo, 200 a 500 millones de años, implica el pasaje del sistema solar a través de la galaxia y las variaciones del polvo galáctico.

La órbita del sistema solar sobre el centro de la galaxia ha sido considerada como un posible mecanismo de forzamiento climático externo. Durante el curso de un año galáctico (estimado en 303 millones de años), variaciones en el medio interestelar pueden influir en la cantidad de radiación solar incidente sobre la superficie de la tierra y así puede actuar como un mecanismo radiativo para inducir un cambio en el clima.

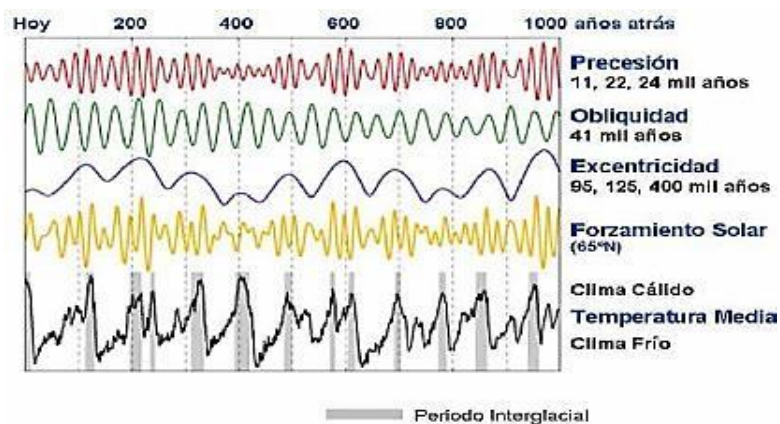
Las variaciones en el torque gravitatorio inducido por nuestras galaxias vecinas, Nube Magallánica Pequeña y Grande, pueden tener consecuencias a largo plazo en el clima de la tierra.

Desafortunadamente, las enormes escalas de tiempo asociadas con el forzamiento de otras galaxias hacen la confirmación de esta premisa sumamente imprecisa. No obstante, es posible que los súper ciclos de la edad del hielo durante los últimos 700 millones de años pudieran ser el resultado de tales mecanismos de forzamiento (IDEAM, 2007).

2.2.3.2. Variaciones orbitales

A mediados del siglo XIX, el científico escocés James Croll propuso una teoría astronómica relacionada con las edades de hielo y los cambios periódicos en la órbita de la Tierra alrededor del Sol. Las ideas de Croll fueron refinadas por el austro-húngaro (croata en la actualidad), Milutin Milankovitch. La teoría de Milankovitch, identifica tres tipos de variación orbital: oblicuidad o inclinación del eje de la Tierra, la precesión de los equinoccios y excentricidad de la órbita de Tierra alrededor del Sol (ver figura 4). Cada variación tiene su período de tiempo específico (IDEAM, 2007).

Figura 4. Ciclos de Milankovitch y clima terrestre



Fuente: IDEAM. *Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*. p. 13.

2.2.3.3. Variaciones solares

Aunque la variabilidad solar ha sido considerada un factor forzante externo, sigue siendo un mecanismo polémico del cambio climático, para todas las escalas de tiempo. A pesar de muchos esfuerzos por mostrar asociaciones estadísticas entre las diferentes periodicidades solares y los ciclos del clima global, ningún mecanismo realista causal ha sido propuesto para unir los dos fenómenos.

El ciclo solar es la variación en el número de manchas solares con un período de 11 años. Se cree que los ciclos de las manchas solares están relacionados con las variaciones magnéticas solares y un ciclo magnético doble (de aproximadamente 22 años) también puede identificarse.

Es de interés climatológico si los ciclos de las manchas solares están acompañados por variaciones en irradiancia solar que, podría forzar cambios climáticos. La constante solar (de aproximadamente $1\ 368\ \text{Wm}^{-2}$) es una medida del flujo de energía solar total integrada para todas las longitudes de onda de radiación. Dos décadas de observaciones satelitales revelan que la constante solar varía en la escala diaria hasta una década y allí parece estar la relación significativa con el ciclo de número de manchas solares, de manera que para un alto número de manchas solares el valor de la constante solar aumenta.

2.2.4. Mecanismos internos

Otras variaciones de escala larga de tiempo (10⁶ a 10⁸ años) incluyen mecanismos de forzamiento no-radiativo, tal como la deriva continental, la orogénesis o formación de montañas y la isostasia movimientos verticales en la corteza de la Tierra que afectan nivel de mar. Estos mecanismos son de forzamiento interno (IDEAM, 2007).

2.2.4.1. Formación de los sistemas montañosos

Orogenia, es el nombre dado al proceso tectónico de la formación de montañas y el levantamiento continental. Los cambios que ocurren constantemente en la superficie terrestre son, en muchos casos, eventos que afectan a los humanos. Algunos fenómenos que contribuyen a la modificación de la superficie de la Tierra son apreciables después de decenas, cientos, miles y millones de años.

Las observaciones directas con fines científicos se comenzaron a realizar aproximadamente hace 200 años, pero con precisión, con el uso de instrumentos, hace apenas medio siglo. Para verificar muchas hipótesis sobre la dinámica del relieve terrestre se necesita una información acumulada durante pocos miles de años.

Por ejemplo, una buena cantidad de volcanes no existían hace unos cuantos miles de años, otros eran de menor altitud; las líneas de costa, aunque en general semejantes a las actuales, ocupaban una posición distinta, hacia el continente o hacia el océano.

Hoy día se sabe que los movimientos que modifican la superficie terrestre son de varios tipos: los horizontales, que incluyen los desplazamientos permanentes de los continentes y en estrecha relación, los movimientos verticales de levantamiento y hundimiento.

Adicionalmente se sabe que la litósfera está dividida en seis fragmentos mayores, de tal manera que un mapamundi se asemeja a un rompecabezas, donde las piezas están en movimiento, separadas por líneas que son las zonas de mayor actividad sísmica y, en ocasiones, volcánica.

Posiblemente la presencia de cordilleras en la Tierra pueden influir el clima global dramáticamente y ese levantamiento orogénico puede actuar como un mecanismo forzante no-radiativo (interior) y conducir a cambios en la circulación atmosférica. El levantamiento de montañas también puede aumentar el área de superficie de tierra cubierta y por lo tanto generar cambios en el albedo planetario de la Tierra.

2.2.4.2. Vulcanismo

Es un ejemplo de un mecanismo de forzamiento interno. Las erupciones volcánicas, por ejemplo, inyectan grandes cantidades de polvo y dióxido de azufre, en forma gaseosa, a la atmósfera superior y la estratósfera, donde son transformados en aerosoles de ácido sulfúrico. Se considera que la contaminación volcánica en la baja atmósfera es removida por efecto de la lluvia y la gravedad, mientras que, la contaminación estratosférica puede permanecer allí durante varios años y puede extenderse para cubrir gradualmente amplias áreas del globo.

La contaminación volcánica resulta en reducciones de la radiación solar directa (puede llegar a un 5 o 10 %) y generan bajas considerables de temperatura (IDEAM, 2007).

2.2.4.3. Circulación oceánica

Los océanos desempeñan funciones importantes en el sistema climático y en el cambio climático. Primero, son uno de los principales depósitos de carbono y han tenido un papel esencial al absorber una parte del dióxido de carbono artificial emitido hasta el presente; hasta cierto punto, seguirán teniendo este papel en el futuro.

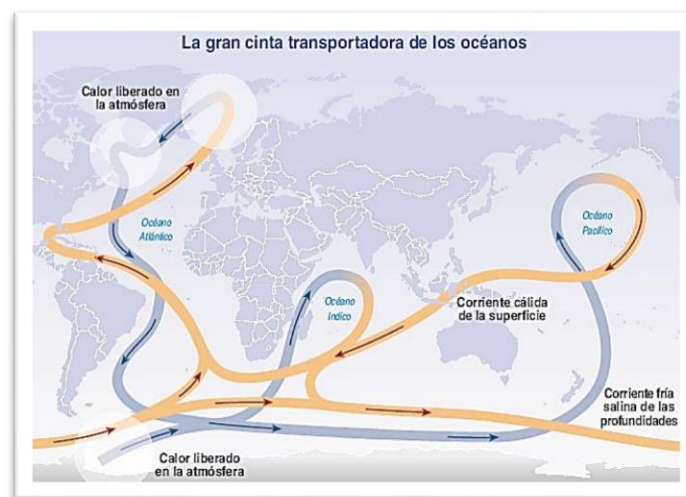
Segundo, las corrientes oceánicas transportan cantidades considerables de calor, por lo que ejercen una fuerte influencia sobre los climas regionales. Los cambios de transporte de calor en el océano podrían afectar significativamente los cambios climáticos regionales y mientras el clima mundial se vuelve más templado, quizás algunas regiones sufran un enfriamiento temporal y otras, un calentamiento temporal muy por encima de la media mundial.

Tercero, la absorción de calor y la mezcla descendente que efectúan los océanos aminoran el ritmo del calentamiento de la superficie. Esto reduce los impactos que dependen de la velocidad del cambio climático. Las corrientes oceánicas y la tasa de absorción del calor por los océanos dependen de los vientos y del intercambio de calor y agua dulce (a través de la precipitación y la evaporación) entre el océano y la atmósfera. En las latitudes altas, la presencia de hielo marino tiene un efecto muy fuerte sobre esos intercambios, de allí que la simulación satisfactoria del hielo marino revista mucha importancia.

Actualmente existe un transporte de aguas interoceánico controlado por las diferencias de salinidad entre los diferentes océanos. La causa de esta diferencia de salinidad reside en el transporte atmosférico de agua (en forma de vapor) que se produce actualmente desde el Atlántico hacia el Pacífico.

Las aguas superficiales atlánticas, por tanto, son más salinas aumentando su densidad, ello hace que sean inestables en superficie y se hundan en el Atlántico Norte donde alcanzan su máxima densidad. Estas aguas, tras hundirse, viajan en profundidad cruzando todo el Atlántico, el Índico, y suben finalmente en el Pacífico Norte. Este sistema de circulación es termohalino (por estar inducido por diferencias de salinidad) constituye una cinta transportadora de calor a lo largo de todo el planeta por ello se le ha denominado "Cinta Transportadora" (Cuarto informe IPCC) (ver figura 5).

Figura 5. **Sistema mundial de circulación interoceánica**



Fuente: FERNÁNDEZ CARRASCO, Pedro. *Estudio del impacto del cambio climático sobre recursos hídricos: aplicación en diecinueve pequeñas cuencas en España*. p. 49.

2.3. Causas antrópicas del cambio climático

Cambio atribuido directo o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos comparables.

2.3.1. Modificaciones de la composición atmosférica

El forzamiento radiativo combinado debido los aumentos de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso es $+2,30$ [$+2,07$ a $+2,53$] Wm^{-2} , y es muy probable que su ritmo de aumento, durante la era industrial, no tenga precedente en más de 10 000 años. El forzamiento radiativo del dióxido de carbono aumentó en un 20 % de 1995 a 2005, el mayor cambio para un decenio en, al menos, los últimos 200 años.

Las contribuciones antropógenas a los aerosoles (principalmente sulfato, carbono orgánico, carbono negro, nitrato y polvo) en conjunto producen un efecto de enfriamiento, con un forzamiento radiativo directo total de: $-0,5$ [$-0,9$ a $-0,1$] Wm^{-2} y un forzamiento indirecto en el albedo de las nubes de $-0,7$ [$-1,8$ a $-0,3$] Wm^{-2} .

Estos forzamientos se conocen mejor ahora que cuando se realizó el TIE (Tercer Informe de Evaluación) debido al mejoramiento de las mediciones efectuadas *in situ*, satelitales, en tierra y a la elaboración de modelos más integrales, pero siguen siendo la incertidumbre dominante en el forzamiento radiativo. Los aerosoles también ejercen influencia en la duración de las nubes y en las precipitaciones.

Varias fuentes antropógenas contribuyen significativamente al forzamiento radiativo. Los cambios del ozono troposférico, debidos a las emisiones de productos químicos formadores del ozono (óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono e hidrocarburos) contribuyen $+0,35$ [$+0,25$ a $+0,65$] Wm^{-2} .

El forzamiento radiativo directo debido a cambios en los halocarbonos es $+0,34$ [$+0,31$ a $+0,37$] Wm^{-2} .

Los cambios en el albedo superficial debidos a cambios en la cubierta del suelo y por depósito de aerosoles de carbono negro en la nieve ejercen forzamientos de $-0,2$ [$-0,4$ a $0,0$] y $0,1$ [$0,0$ a $+0,2$] Wm^{-2} respectivamente. Los términos adicionales menores de $\pm 0,1$ Wm^{-2} .

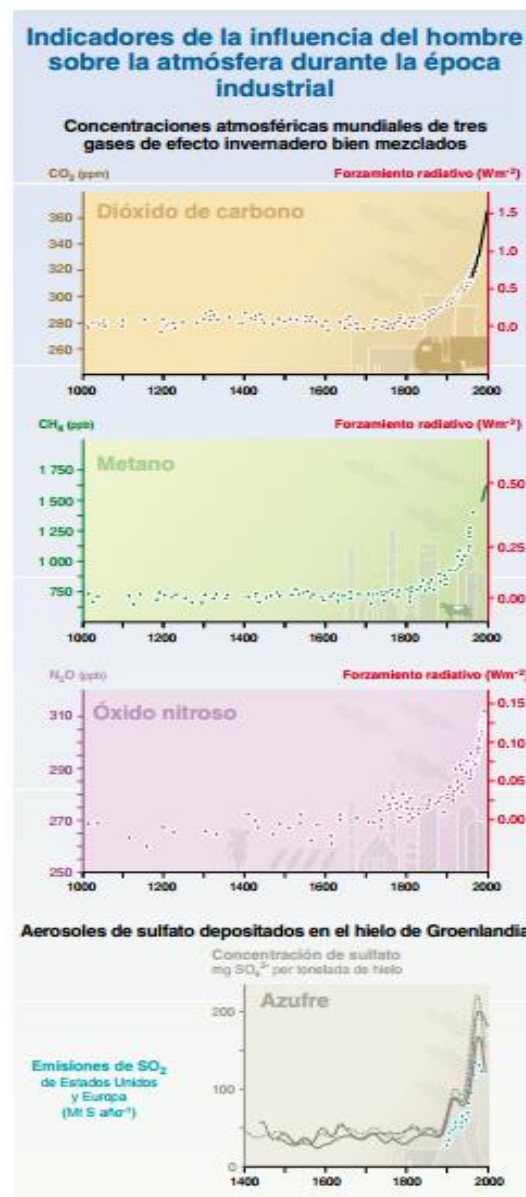
Se estima que los cambios en la irradiancia solar, desde 1750, han ocasionado un forzamiento radiativo de $+0,12$ [$+0,06$ a $+0,30$] Wm^{-2} , lo cual es menos de la mitad de la estimación ofrecida en el Tercer Informe de Evaluación.

Como los registros de los cambios climáticos en el pasado, los conjuntos de datos sobre los agentes de forzamiento son de diversa extensión y calidad. La supervisión directa constante de las concentraciones de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera comenzó a mediados del siglo XX y se extendió en los últimos años a otros gases bien mezclados muy persistentes, como el metano.

Los conjuntos de datos actuales muestran la influencia humana sobre las concentraciones atmosféricas, tanto de GEI (gases de efecto invernadero) como de agentes de forzamiento de corta vida de la última parte del milenio pasado.

En la figura 6 se ilustran los efectos de gran aumento en la era industrial de las emisiones antropógenas de gases de efecto invernadero.

Figura 6. Registros de los cambios de la composición atmosférica



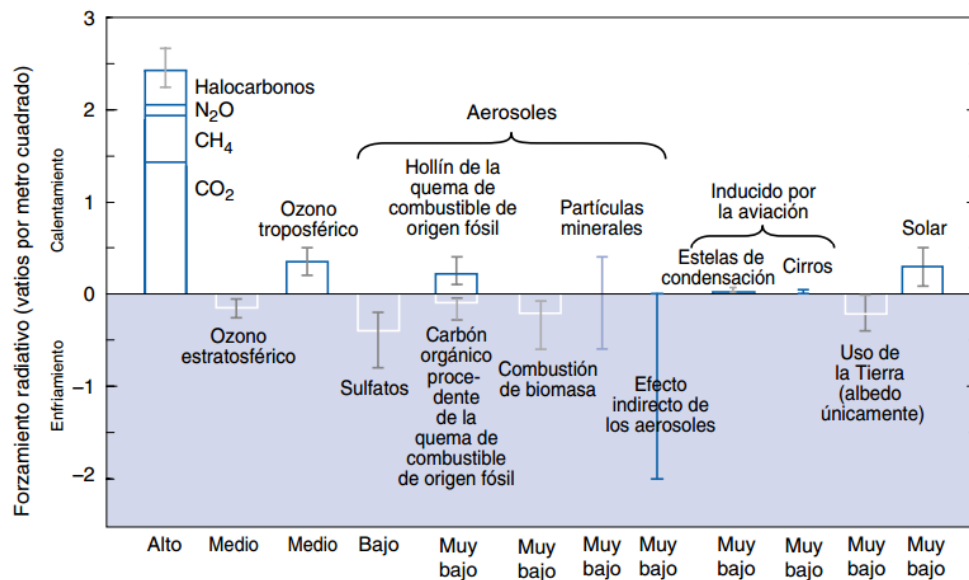
Fuente: IPCC. *Tercer Informe de Evaluación*. p. 51.

2.3.2. Modificaciones del paisaje y del uso del suelo

El nivel medio global del mar subió a una tasa de 1,8 mm por año para el período 1961 a 2003. La tasa ha sido más rápida para el período 1993 a 2003 y ha estado cercana a los 3,1 mm por año. Por último, el aumento total en el nivel del mar observado en el siglo XX fue de 17 centímetros.

Los glaciares de montaña y la cubierta de nieve han decrecido con respecto a los promedios en ambos hemisferios. El amplio decrecimiento en los glaciares y en las capas de nieve, también están contribuyendo al aumento en el nivel del mar.

Figura 7. Forzamiento radiativo entre 1 750 y 2 005 según el IPCC



Fuente: IPCC. *Tercer Informe de Evaluación*. p. 7.

Se han observado cambios en la tendencia a largo plazo (desde 1900 hasta 2005) en la precipitación en varias regiones. Incrementos significativos se han presentado en la parte oriental de norte y Sur América, norte de Europa y norte y centro de Asia y las disminuciones en la precipitación se han observado en el Mediterráneo, norte y sur de África y algunas partes del sur de Asia. Como se muestra en la figura 7, estos cambios fueron favorecidos por el forzamiento radiativo según las concentraciones de gases de efecto invernadero.

Cambios en la precipitación y la evaporación sobre los océanos están aumentando la salinidad en aguas de latitudes bajas. Las evidencias muestran un incremento en la intensidad de la actividad de los ciclones tropicales desde 1970 en el Atlántico Norte, relacionado con los incrementos en las temperaturas superficiales del mar tropical. Hay también sugerencias de incrementos en la intensidad de la actividad de los ciclones tropicales en otras regiones.

Se ha incrementado la frecuencia de precipitaciones más fuertes sobre la mayoría de las áreas continentales, lo cual es consistente con el calentamiento observado y los incrementos de vapor de agua atmosférico. Se ha presentado un aumento en la decoloración de los arrecifes de coral, especialmente durante los fenómenos asociados al Niño.

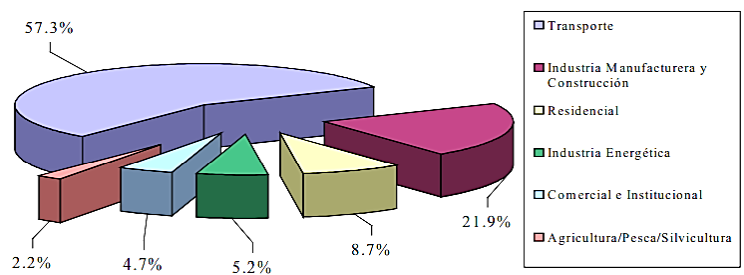
Sequías más intensas y duraderas se han presentado desde 1970 sobre amplias áreas, particularmente en los trópicos y los subtrópicos. Incrementos en la sequedad, asociada a temperaturas más altas y disminuciones en las precipitaciones han contribuido a cambios en los regímenes de las sequías.

De acuerdo a una investigación reciente del Instituto Smithsonian de Investigación Tropical, una variación anormal en el crecimiento de la flora amazónica se debe, precisamente, a que el cambio climático hace que disminuya la cantidad de dióxido de carbono que absorbe la selva, lo cual afecta también a las especies animales que la habitan y la polinizan.

El estudio indica que los árboles más fuertes aumentaron su velocidad de crecimiento, mientras que los más débiles lo retrasaron. A estos fenómenos se le puede agregar una lista de muchos otros efectos que se hacen cada vez más evidentes alrededor del planeta.

Según el informe de la Primera Comunicación Nacional sobre el Cambio Climático para Guatemala, del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, se registra un aporte a las emisiones de dióxido de carbono, según subsectores y actividad específica (ver figura 8). El que mayor representatividad muestra es el subsector del transporte seguido de la industria manufacturera y la construcción.

Figura 8. **Contribución por subsector a las emisiones de dióxido de carbono en Guatemala**



Fuente: Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Primera comunicación nacional sobre cambio climático*. p. 25.

2.4. Impactos del cambio climático

El interés principal de este trabajo de graduación es identificar las variaciones en los recursos hídricos de Guatemala en regiones bien definidas, y estas variaciones tienen su raíz a partir de los cambios en el clima general de las cuencas estudiadas a lo largo de los períodos de tiempo que acá se han podido estudiar.

2.4.1. Guatemala y sus recursos hídricos

El sistema hidrográfico de Guatemala se divide en tres vertientes hidrográficas principales: la vertiente del océano Pacífico, la del Mar Caribe y la del Golfo de México.

La vertiente del océano Pacífico abarca el 22,0 % del país y en esta se identifican 18 cuencas hidrográficas.

Algunos de los ríos de esta zona, llevan sedimentos volcánicos producidos por la cadena volcánica de la región central del país, y estos son depositados a lo largo de la costa y que contribuyen a las inundaciones costeras debido a las bajas profundidades de las marismas.

En la vertiente del Pacífico, los ríos son relativamente cortos, con una longitud media de 110 km. Sus fuentes se encuentran en la Sierra Madre a una altitud media de 3 000 msnm. La desnivelación es fuerte (entre 10,0 y 20,0 %) en las partes altas de las cuencas, mientras vuelve en pendientes mínimas en la planicie de la franja costera. La precipitación en la vertiente del Pacífico tiene períodos de gran intensidad, típica de las zonas costeras con una precipitación media anual de 2 200 mm.

El 31,0 % de la superficie del país es cubierta por la vertiente hidrográfica del Mar Caribe y cuenta con 10 cuencas hidrográficas. La escorrentía superficial media anual en esta cuenca se calcula en 31,9 km³. Esta cuenca cuenta con ríos de diversas características, de gran longitud como el Motagua, de unos 486 km y en menor dimensión como el río Dulce de uno 43 km de longitud. Además, estos ríos atraviesan regiones cálidas como lo hace el río Grande de Zacapa. En promedio los ríos de esta cuenca tienen una longitud de unos 240 km.

La vertiente hidrográfica del Golfo de México cubre el 47,0 % del territorio de Guatemala y cuenta con 10 cuencas hidrográficas. Los ríos de esta cuenca tienen los mayores flujos y drenan hacia México. La escorrentía superficial media anual en esta vertiente es de 43,3 km³. Los ríos en la vertiente del Golfo de México tienden a ser largos, sinuosos y relativamente caudalosos, con un promedio de unos 170 km de longitud, con crecidas de larga duración y cauces relativamente estables. Incluye los ríos Usumacinta, Chixoy y La Pasión, como los principales cuerpo de aguas superficiales.

Guatemala, como su nombre náhuatl lo indica, es una tierra de bosques. Es también un país montañoso y su régimen de precipitación está bajo la influencia de los patrones climáticos del océano Pacífico y Atlántico, tales como El Niño, La Niña y la temporada de los huracanes. La precipitación media anual oscila entre 700 mm en las regiones orientales del país, aproximadamente 1 000 mm en las regiones centrales, y 5 000 mm en las regiones del noreste.

La población actual en las zonas montañosas del noroeste es de aproximadamente cinco millones de habitantes y esta región tiene altos niveles

de precipitación (hasta 4 000 mm por año); las pendientes pronunciadas son susceptibles a la erosión.

Esta región es una zona con gran potencial de agua, pero también está sujeta a daños irreversibles causados por la pérdida de suelo y la alteración del ciclo del agua.

2.4.1.1. Principales ríos de Guatemala

Cada una de las vertientes se subdivide en cuencas, las cuáles son áreas tributarias de un río, es decir que es toda el área drenada por un río. Los límites de una cuenca se obtienen de la topografía del lugar. En las siguientes tablas, aparece una lista de las cuencas en que se divide Guatemala.

Tabla V. **Cuencas de la vertiente del océano Pacífico**

CUENCAS DE LA VERTIENTE DEL PACÍFICO					
Núm.	Cuenca	Área (km²)	Núm.	Cuenca	Área (km²)
1.1	Coatán	270	1.10	Coyolate	1 648
1.2	Suchiate	1 054	1.11	Acomé	706
1.3	Naranjo	1 273	1.12	Achiguate	1 291
1.4	Ocosito	2 035	1.13	María Linda	2 727
1.5	Samalá	1 510	1.14	Paso Hondo	512
1.6	Sis - Iacán	919	1.15	Los Esclavos	2 271
1.7	Nahualate	1 941	1.16	Paz	1 732
1.8	Atitlán	541	1.17	Ostúa - Güija	2 243
1.9	Madre Vieja	1 007	1.18	Olopa	310
Área total de la Vertiente del Pacífico (km ²)			23 990		

Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.

Tabla VI. **Cuencas de la vertiente del Caribe**

CUENCAS DE LA VERTIENTE DEL CARIBE					
Núm.	Cuenca	Área (km²)	Núm.	Cuenca	Área (km²)
2.1	Grande de Zacapa	2 462	2.5	Cahabón	2 459
2.2	Motagua	12 670	2.6	Sarstún	2 109
2.3	Río Dulce	3 435	2.7	Vertiente Belice	8 159
2.4	Polochic	2 811			
Área total de la Vertiente del Caribe (km ²)					34 105

Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.

Tabla VII. **Cuencas de la vertiente del Golfo de México**

CUENCAS DE LA VERTIENTE DEL GOLFO DE MÉXICO					
Núm.	Cuenca	Área (km²)	Núm.	Cuenca	Área (km²)
3.1	Cuilco	2 274	3.6	Xaclbal	1 366
3.2	Selegua	1 535	3.7	Chixoy	12 150
3.3	Nentón	1 451	3.8	La Pasión	12 156
3.4	Pojom	813	3.9	Usumacinta	2 638
3.5	Ixcán	2 085	3.10	San Pedro	14 335
Área total de la Vertiente del México (km ²)					50 803

Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.

2.4.2. Recursos hídricos y la hidrología

El ciclo hidrológico es fundamental para entender los procesos que se suceden en la Tierra. A su vez este depende directamente del clima de cada región así que cualquier cambio o variación en este afecta sin duda el ciclo natural del agua. Esto se puede ver de manera sencilla en un aumento o

disminución del caudal de los ríos, crecidas debido a tormentas o ya sea temporadas secas muy prolongadas generaran variaciones que pueden afectar en diversas maneras a las poblaciones humanas, a la fauna y la flora de cualquier región.

Cambios como sequias o aumentos de temperatura inciden directamente en los efectos de la evapotranspiración, tiempos de infiltración o ya sea la humedad del suelo.

En lo referente a la información de los diferentes usos que se le dan al recurso, en la mayoría de los casos no se cuenta con estadísticas actualizadas, por lo que se recurre a estimaciones gruesas en los usos más importantes del agua: agua potable y saneamiento, agricultura, energía, industria, pesca, turismo y otros. Así, solamente se puede realizar estimaciones por los cambios en el paisaje debido a las demandas antes mencionadas y como el clima ha influido en estos cambios.

Por otro lado, los recursos asignados por las municipalidades a programas de saneamiento y abastecimiento de agua potable, hace que cada vez sea más común encontrarse con comunidades sin servicio de agua constante y sobre todo de calidad.

Además, del crecimiento poblacional y la invasión de terrenos, el cambio del uso de los terrenos, por ejemplo, bosques talados para construcción de condominios o edificios para la industria, disminuyen la infiltración del agua en el terreno y aumenta la perforación de pozos para el abastecimiento de las nuevas comunidades.

2.4.3. Recursos hídricos y el clima

Ya se han mencionado con anterioridad las variaciones de las cuales depende el clima, los mecanismos ya sea radiativos o externos, internos e incluso cambios en el sistema solar harán en grande o pequeña medida cambios en las precipitaciones en diferentes áreas del globo terráqueo. Si estos cambios además son potencializados por factores de contaminación, las temporadas de lluvia, monzones, huracanes y otros elementos que constituyen el clima de una región afectarán directamente el recurso hídrico para el consumo humano, uso agrícola, industrial e incluso la calidad del agua para la vida marina y otros seres vivientes que depende de esta.

2.4.4. Impacto en los recursos hídricos

El cambio climático supone un importante factor potencializador del desgaste o degradación de los sistemas ya afectados por una demanda de recursos cada vez mayor, por malas gestiones de insostenibilidad en poblaciones y por la contaminación, que este en muchos casos puede ser mayor o igual magnitud en su influencia en el impacto climático que cambios naturales.

Estudios científicos como el reportaje de la Organización Mundial de la Salud, *10 datos sobre el cambio climático y la salud*, de octubre de 2012, han mostrado que la salud humana, ecosistemas y sectores socioeconómicos, son sensibles a los cambios del clima, y en particular a la rapidez del cambio climático debido a la contaminación.

Así, estos cambios climáticos influyen en la disponibilidad del recurso hídrico en el país. Mayores crecidas en épocas de lluvia, pueden generar desbordamientos de los ríos, y en época de estiaje prolongada, generaría

sequias, pérdida de cultivos y mayor frecuencia de incendios en bosques, reduciéndolos cada vez más y generando una especie de círculo vicioso. Menos lluvia, más incendios, menos bosques, los cuales propician un equilibrio en el ciclo hidrológico.

3. APLICACIÓN A LAS CUENCAS DEL RÍO NARANJO EN SAN MARCOS Y RÍO GRANDE DE ZACAPA

3.1. Escenario y modelo de análisis considerado

El escenario considerado para este trabajo han sido dos cuencas por demás diferentes en su topografía, clima y geología. Estas cuencas, la del río Naranjo en San Marcos, por sus diferentes microclimas y extensión territorial tan variada y sobre todo por sus terrenos elevados que se encuentran al norte de la misma, hacen una diferencia marcada con respecto a la de río Grande De Zacapa, que sus características generales son cálidas, áridas y de menor elevación.

Debido a que las variables utilizadas fueron la precipitación y la temperatura, se realizó una selección de las estaciones meteorológicas que cuenten con instrumentos que midan estas variables y además que estén distribuidas adecuadamente en el área comprendida de cada una de las cuencas. Para tales efectos, los datos de precipitación, temperatura mínima y máxima se tomaron de la base de datos del Insivumeh, en la que se encuentra la información histórica de nueve estaciones hidrológicas de tipo convencional.

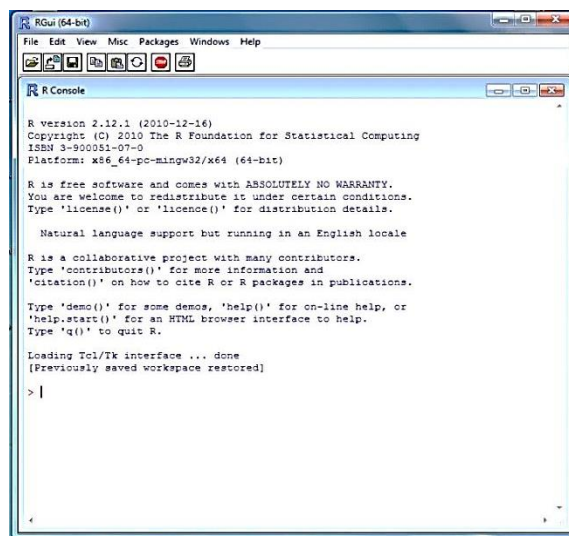
La selección se hizo a partir de criterios tales como la extensión de la serie histórica, la localización de las estaciones o representatividad y por supuesto, la calidad de los datos.

La mayoría de las estaciones abarca el período de 1970 a 2009. En algunos casos se recopilaron datos hasta el 2011 e inclusive iniciando en el 1969. Véanse la tabla VIII de datos y el mapa de localización de las estaciones por cuenca.

3.1.1. La metodología

Para la determinación de los indicadores o índices del cambio climático se ha utilizado el software RCLIMDEX. Inicialmente este programa fue desarrollado como ClimDex, basado en Microsoft Excel. El paquete computacional es de fácil utilización y permite el cálculo de numerosos índices de extremos climáticos. Fue desarrollado por Byron Gleason del National Climate Data Centre (NCDC) de NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration, por sus siglas en inglés.

Figura 9. Plataforma inicial de RCLimdex



Fuente: elaboración propia, con programa RCLimdex.

Posteriormente se implementó el programa en la plataforma R y surgió el paquete RClimDex (1.0). Este programa evalúa y calcula 27 índices básicos recomendados por el Equipo de Expertos de CCI/CLIVAR para Climate Change Detection Monitoring and Indices (ETCCDMI), así como también otros índices de temperatura y precipitación con límites definidos por el usuario. Uno de los principales objetivos de construir índices de extremos climáticos es para usarlos en estudios de monitoreo y detección de cambios climáticos.

El procedimiento para el cálculo de los índices extremos incluye los pasos descritos a continuación.

3.1.2. Procesamiento de la información y generación de índices

Los datos de precipitación, temperatura máxima y mínima de las estaciones finalmente seleccionadas, se proceden a sistematizar, de tal manera que cumplan ciertas características y se ajusten a los formatos de entrada de los archivos utilizados en el programa RClimdex. Los requisitos de cada archivo son los siguientes (ver tabla VIII):

- La primera columna debe ser el año de registro.
- La segunda columna corresponde al mes.
- La tercera columna indica el día.
- La cuarta columna es el dato de precipitación, con un decimal. Los vacíos deben ser llenados con el número -99.9, el cual es un valor indiferente para el programa y por ende no altera los resultados.

- La quinta y sexta columnas corresponden a los datos de temperatura máxima y mínima respectivamente, con un decimal. Los vacíos también deben llenarse con el número –99.9.
- El archivo de 6 columnas se debe grabar en formato de texto, es decir con extensión TXT, indicada como: Text (tab delimited) en las opciones de “guardar como”.
- Cuando en una fecha faltan los tres datos, se puede eliminar.

Tabla VIII. **Ejemplo de formato de datos para el archivo inicial de datos**

1979	10	10	0.0	18.0	3.6	
1979		10	11	0.4	17.6	9.0
1979		10	12	20.2	18.5	7.0
1979		10	13	0.0	21.5	7.7
1979		10	14	0.0	19.6	6.5
1979		10	15	0.1	20.0	9.0
1979		10	16	4.9	19.7	-9.99
1979		10	18	2.9	18.4	11.8
1979		10	19	5.6	20.4	8.8
1979		10	20	3.6	18.9	10.4

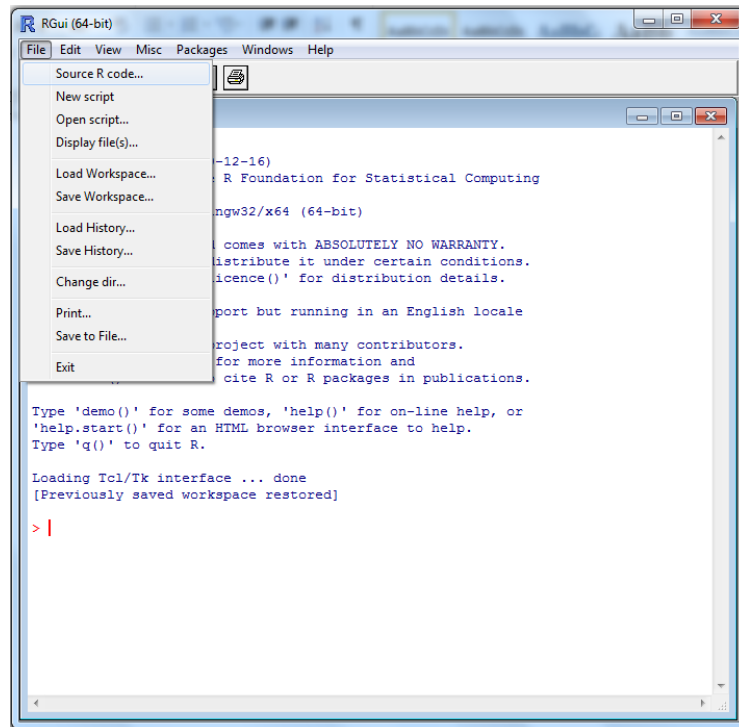
Fuente: elaboración propia con formato Word Office. txt.

Las columnas se ordenan de izquierda a derecha en las siguientes secuencias: Año, Mes, Día, PRCP, TMAX, TMIN. Las unidades de la precipitación PRCP= milímetros y las unidades de temperatura= grados Celsius o (°C).

Inicialmente se debe proveer al software de un archivo de control llamado rclimindex.r, el cual permite cargar los datos obtenidos de las estaciones.

En la ventana inicial se selecciona el menú *FILE* y luego el subíndice *SOURCE R CODE* (ver figura 10).

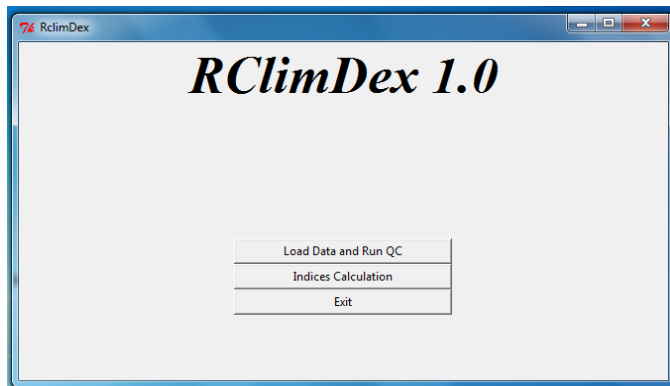
Figura 10. Menú *File* del software RClimdex



Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

Al desplegarse la ventana de búsqueda del archivo rclimindex.r, se selecciona este y el software muestra la siguiente ventana (ver figura 11).

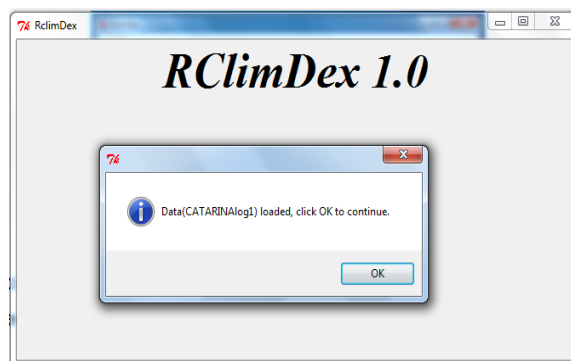
Figura 11. **Ventana de selección del procedimiento de control de calidad, CC o QC para el software RClimdex**



Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

Se selecciona la opción "*Load Data and Run QC*" y se debe buscar el archivo .TXT (ver figura 12) que se generó a partir de los datos obtenidos de cada estación. Luego, se desplegará una ventana como la que muestra la figura siguiente:

Figura 12. **Ventana de confirmación de la carga del archivo .TXT**

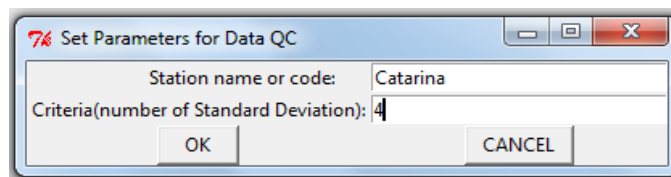


Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

Luego de aceptar y continuar dando un *click* en *OK*, el software solicitará algunos datos que el usuario debe determinar como lo son:

- El nombre o código de la estación a analizar.
- La cantidad de desviaciones estándar que se requieran en dicho análisis (ver figura 13).

Figura 13. **Ventana de datos de la estación y desviaciones estándar .TXT**



Fuente: elaboración propia, con programa Rclimdex.

El software solicitará esperar y confirmar las carpetas en las cuales serán archivados los resultados del análisis, ya sean valores a corregir como las gráficas que servirán para establecer un criterio al realizar el control de calidad CC corrigiendo datos, si fuera necesario.

Después de cargar los datos diarios de precipitación y temperatura máxima y mínima al programa Rclimdex (y de acuerdo al formato de datos para el archivo de datos inicial de la tabla VIII), se realiza el CC de los datos, el cual es un prerequisite para el cálculo de los índices y consta de un CC interno del software y un CC realizado por el usuario.

3.1.2.1. El control de calidad (CC) interno de RCLimDex

Este software desarrolla el siguiente procedimiento:

- Reemplaza todos los datos faltantes (actualmente codificados como -99.9) en un formato interno que reconoce RCLimDex (ejemplo: NA, no disponible).
- Reemplaza todos los valores no razonables por NA. Estos valores incluyen:
 - Cantidades de precipitación diarias menores que cero
 - Temperatura máxima diaria menor que temperatura mínima diaria

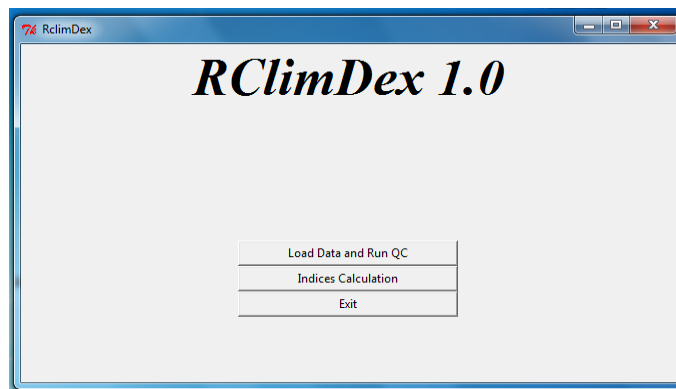
3.1.2.2. Control de calidad realizado por el usuario y control de homogeneidad

- Se identifican valores extremos (“*outliers*”) en temperaturas diarias máximas y mínimas. Los valores extremos son valores diarios que se encuentran fuera de un límite de la desviación estándar, establecidos por el usuario.
- Se escoge la media + 4 (3,5 y 3,0) desviaciones típicas para marcar los datos problemáticos de temperatura.
- Finalmente el usuario define si deja, modifica o elimina el dato.

Para calcular los índices extremos de cambio climático, se corre el programa RClindex, versión 1.0, cargando el archivo .TXT, que contiene los datos pluviométricos y de temperatura de cada estación meteorológica.

Y se selecciona la opción *Indices Calculation*, como se muestra en la figura 14:

Figura 14. **Ventana para iniciar el cálculo de los índices de RClindex**



Fuente: elaboración propia, con programa RClindex.

Se debe completar los datos o parámetros definidos por el usuario solicitados por Rclindex y continuar con el proceso, como se muestra a continuación (ver figura 15).

Figura 15. Datos para iniciar el cálculo de los índices de RClimdex

Parameter	Value
First year of base period	1961
Last year of base period	1990
Latitude of this station location	0
Longitude of this station location	0
User defined upper threshold of daily maximum temperature	25
User defined lower threshold of daily maximum temperature	0
User defined upper threshold of daily minimum temperature	20
User defined lower threshold of daily minimum temperature	0
User defined daily precipitation threshold	25

Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex

Completados los datos, se procede a seleccionar cuáles serán los índices que son de interés para el estudio realizado, como se ve en la figura 16 a continuación.

Figura 16. Ventana de índices a analizar por el software RClimdex

Index	Selected
SU25, FD0, TR20, ID0	<input type="checkbox"/>
User Defined SU, FD, TR, ID	<input type="checkbox"/>
GSL, growing season length	<input type="checkbox"/>
TXx, TXn, TNx, TNn	<input checked="" type="checkbox"/>
TX10p, TX90p, TN10p, TN90p	<input checked="" type="checkbox"/>
WSDI	<input type="checkbox"/>
CSDI	<input type="checkbox"/>
DTR	<input type="checkbox"/>
Rd1day	<input checked="" type="checkbox"/>
Rd5day	<input checked="" type="checkbox"/>
SDII	<input type="checkbox"/>
R10mm	<input checked="" type="checkbox"/>
R20mm	<input checked="" type="checkbox"/>
Rnnmm	<input checked="" type="checkbox"/>
CDD, CWD	<input type="checkbox"/>
R95p, R99p, PRCP TOT	<input checked="" type="checkbox"/>

Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

Tabla IX. Listado de índices que maneja el software RClimdex

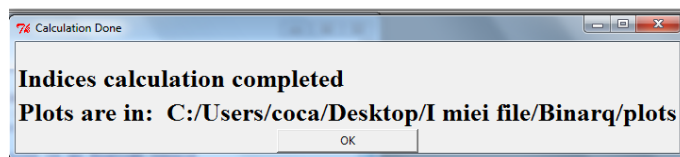
Código	INDICADOR / (UNIDAD)	DETALLE	AGRUPACIONES
01	CDD (Días)	Mayor número de días secos consecutivos en un año	Asociados al comportamiento de la precipitación y de eventos extremos de lluvia
02	CWD (Días)	Mayor número de días húmedos consecutivos en un año	
07	PRCTOT (mm)	Precipitación total al año	
08	R10mm (Días)	Numero de días en un año con lluvia mayor a 10mm	
09	R20mm (Días)	Numero de días en un año con lluvia mayor a 20mm	
10	R40mm (Días)	Numero de días en un año con lluvia mayor a 40mm	
11	R95P (mm)	Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (Prec. > 1,0mm)	
12	R99P (mm)	Numero de días en un año con lluvia mayor al percentil 99 para los días húmedos (Prec. > 1,0mm)	
13	RX1day (mm)	Máximo anual de precip. en 1 día	
14	RX5day (mm)	Máximo anual de precipitación en 5 días consecutivos	
15	SDII (mm/día)	Precipitación total anual /días con lluvia al año con (Prec. > 1,0mm)	
03	DTR (°C)	Diferencia media mensual entre la Temp. Máx. y la Temp. Min.	Asociados al comportamiento de la temperatura mínima (temperatura en la noche)
04	FD_ (Días)	Número de días al año cuando la temperatura mínima es menor al rango bajo de la Temp. Min. (Equivalente al percentil 33)	
05	FD0	Número de días en un año cuando la temperatura mínima es < 0 (días de heladas)	
06	ID_ (Días)	Número de días al año cuando la temper. mínima es mayor al rango alto de la Temp. mínima (Equivalente al percentil 66)	
18	TN10P (Días)	Noches frías: % de días con Temp. Min. menor al Percentil 10	
19	TN90P (Días)	Noches calientes: % de días con Temp. Min. mayor al Percentil 90	
22	TR20 (Días)	Noches calientes (2): Días al año cuando la temperatura mínima diaria es mayor a 20°C	
20	TNN (°C)	Temperatura nocturna mínima: Valor mensual mínimo de la temperatura mínima diaria	
21	TNX (°C)	Temperatura nocturna máxima: Valor mensual máximo de la temperatura mínima diaria	
28	CSDI (Días)	Conteo anual de días (por lo menos 6 días consecutivos) en que la temperatura mínima (TN) < percentil 10 (duración de periodos fríos)	
16	SU25 (Días)	Días al año con Temperaturas máximas mayor a 25°C	
23	TR_ (Días)	Número de días al año cuando la temperatura máxima es menor al rango bajo de la Temp. Max. (Equivalente al percentil 33)	
17	SU_ (Días)	Número de días en un año cuando la temperatura máxima es mayor al rango alto de la Temp. Max. (Equivalente al percentil 66)	
24	TX10P (Días)	Días fríos: % de días con Temp. Máx. menor al Percentil 10	
25	TX90P (Días)	Días calientes: % de días con Temp. Máx. mayor al Percentil 90	
26	TXN (°C)	Temperatura diaria mínima: Valor mensual mínimo de la temperatura máxima diaria	
27	TXX (°C)	Temperatura diaria máxima: Valor mensual máximo de la temperatura máxima diaria	
29	WSDI (Días)	Conteo anual de días (por lo menos 6 días consecutivos) en que la temperatura máxima (TX) > percentil 90 (duración de periodos calientes)	

Fuente: Manual del Usuario RClimDex (1.0). p. 14.

Para determinar cuáles son los índices correctos o necesarios se debe conocer el código que maneja el software RClimdex y la tabla IX los presenta a detalle.

Cuando el cálculo de los índices ha sido completado después de algunos minutos, se despliega una ventana que indica en cuál carpeta se encuentran las gráficas y los resultados que nos interesan, vea la figura 17.

Figura 17. **Ventana de índices almacenados por el software RClimdex**



Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

3.2. Datos para el período de 1969 a 2011

Ha sido necesario la obtención de una base de datos diaria consistente y lo más prolongada posible en el tiempo, esto con el fin de poder alcanzar los objetivos de este trabajo. El estudio se realizó a partir de datos de 4 estaciones en la cuenca del río Naranjo y 5 en la cuenca del río Grande de Zacapa.

Aunque unas pocas de ellas contenían datos desde 1979, se realizó la digitalización de estos ya que se encontraban únicamente en los registros históricos no digitales. Por esta razón, este documento se centra en el período 1979 - 2010.

No todas las estaciones tenían una calidad adecuada referente a la homogeneidad o del período de registro. El análisis requiere de series de tiempo, al menos con el 80 por ciento de los datos para el período de estudio.

El análisis de los datos de cada estación y su confiabilidad permitirá que sea mostrada la tendencia global de cada cuenca, ya sea de un aumento o disminución de la temperatura o si el recurso hídrico de estas ha disminuido o aumentado en el período de estudio.

Las estaciones y su período de registros se presentan en las tablas X y XI así como la ubicación de cada una se muestra en las figuras 18 y 19.

Tabla X. **Estaciones climáticas analizadas en la cuenca del río Naranjo en San Marcos**

Estación	Latitud	Longitud	Primer año	Ultimo año	Estado
Ayutla	-92,1394	14,6736	2002	2011	Activa
Catarina	-92,0772	14,8556	1970	2011	Activa
La Colonia	-91,9555	14,8252	1969	1987	Inactiva
San Marcos	-91,8094	14,9541	1971	2011	Activa

Fuente: elaboración propia con datos del Insivumeh.

Cabe mencionar que las estaciones Catarina y La Colonia no cuentan con registros completos y que esto puede influir en los resultados del análisis.

Tabla XI. **Estaciones climáticas analizadas en la cuenca del río Grande de Zacapa**

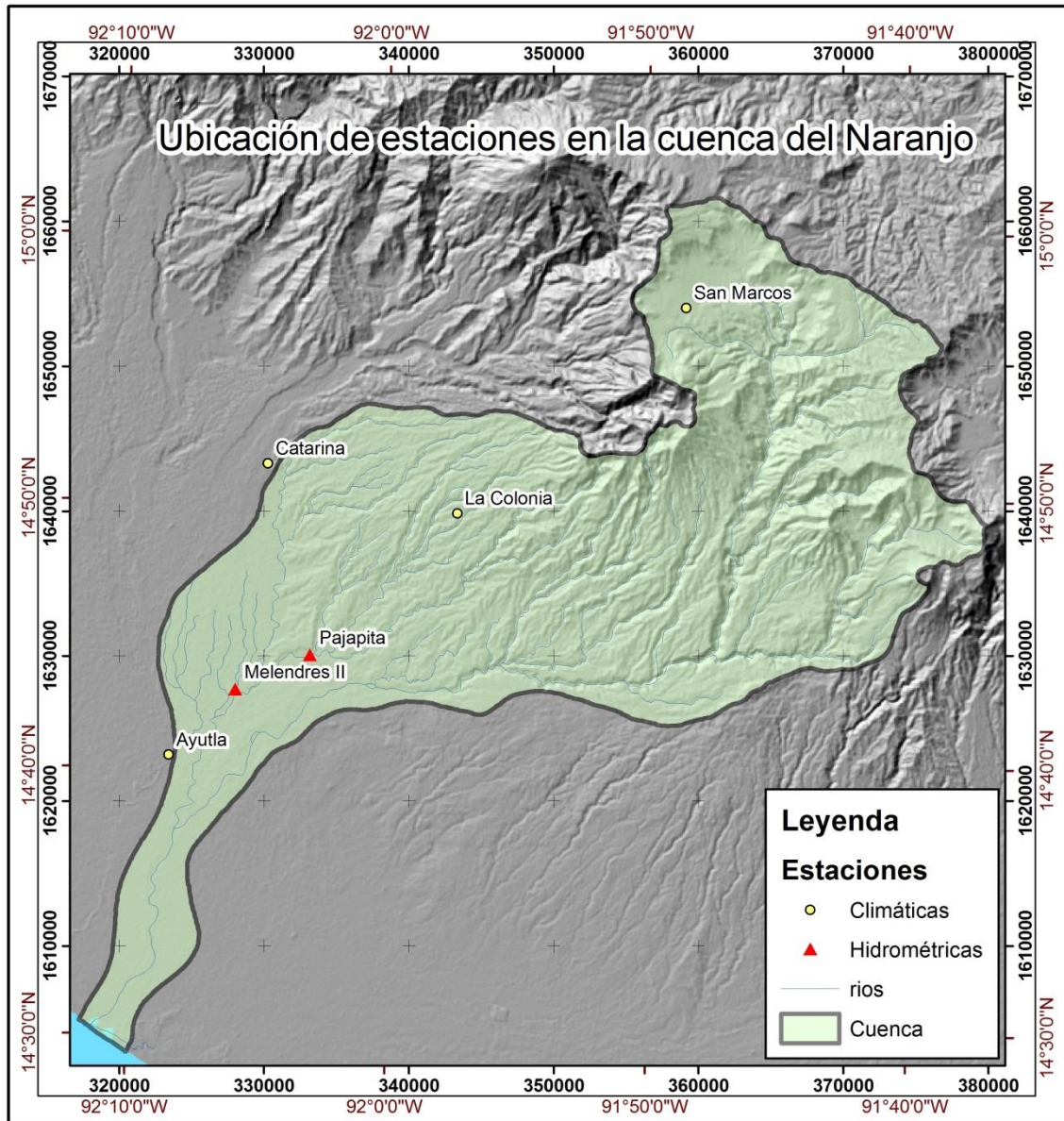
Estación	Latitud	Longitud	Primer año	Ultimo año	Estado
Camotán	-89,3728	14,8206	1970	2011	Activa
Esquipulas	-89,5086	14,5589	1970	2011	Activa
Ipala	-89,6180	14,6208	1971	1990	Inactiva
La Unión	-89,2911	14,9633	1971	2011	Activa
La Fragua	-89,5844	14,9642	1970	2011	Activa

Fuente: elaboración propia con datos del Insivumeh.

Cabe mencionar que la estación Ipala no cuenta con registros de 21 años y que esto puede influir en los resultados del análisis.

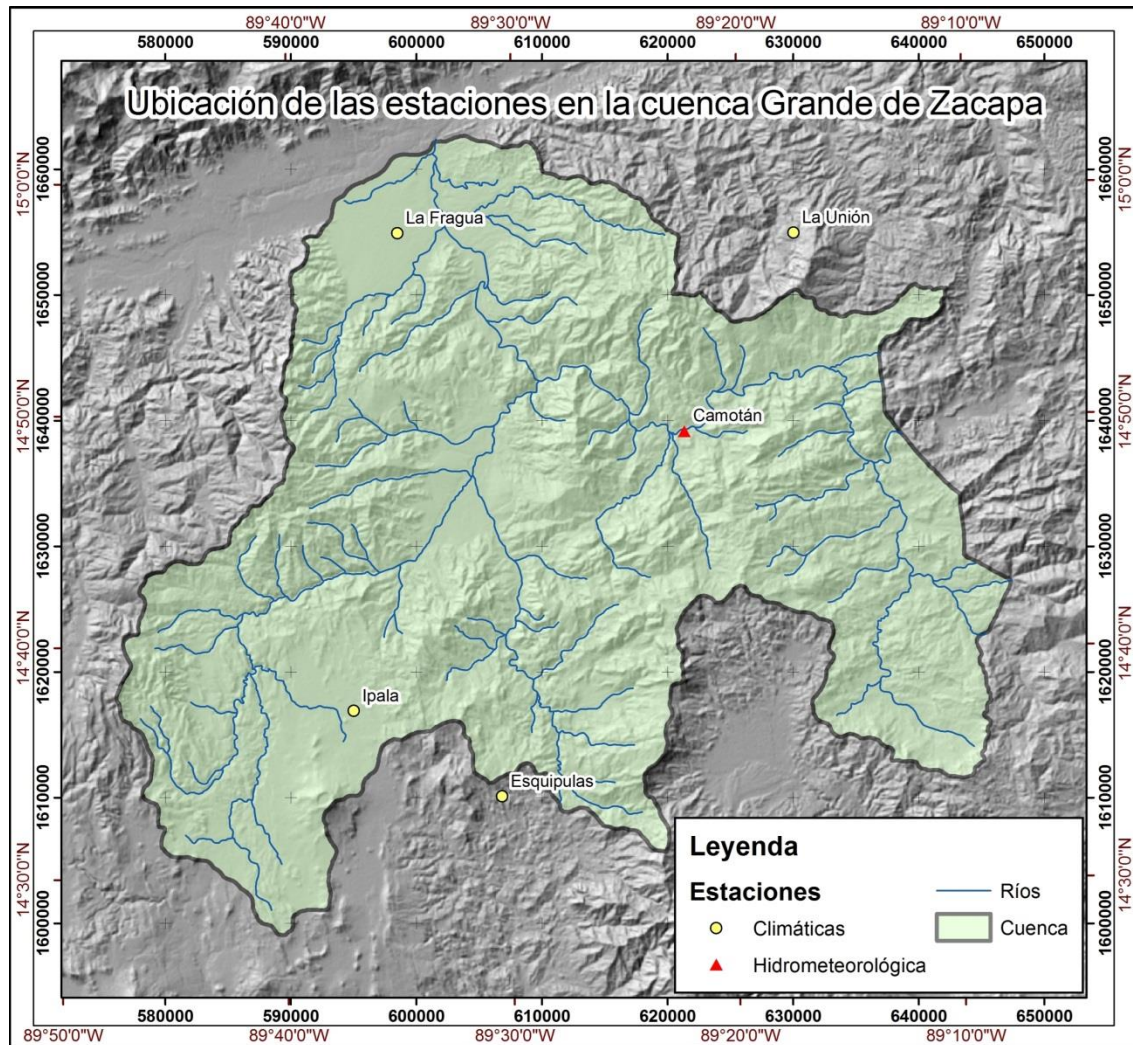
Las estaciones hidrométricas se analizarán en el capítulo 4, que describe a detalle la variabilidad de los caudales.

Figura 18. **Ubicación de las estaciones climáticas e hidrométricas de la cuenca del río Naranjo en San Marcos**



Fuente: elaboración propia, con programa Civil 3D.

Figura 19. **Ubicación de las estaciones climáticas e hidrométricas de la cuenca del río Grande de Zacapa**



Fuente: elaboración propia, con programa Civil 3D.

3.2.1. Rangos y saltos de tiempo en datos

Además de la generación de tablas de datos en formato digital Excel, RClimdex genera gráficos que permiten visualizar a lo largo del tiempo las variables analizadas, tales como precipitación y temperatura que detallan los rangos de tiempo analizados y los espacios vacíos que nunca pudieron ser completados; ya sea por tormentas o deslaves que dañaron el equipo o ya sea por la falta de mantenimiento a los mismos, estos datos no se encuentran registrados en los datos históricos del Insivumeh.

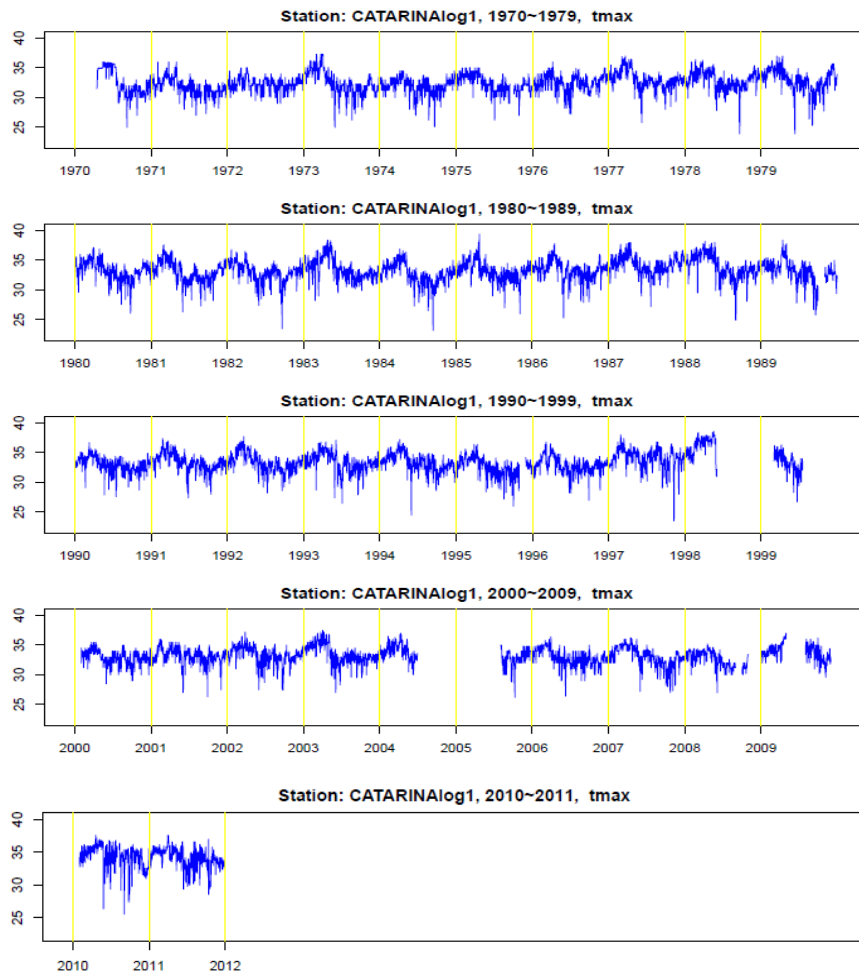
RClimdex proporciona gráficas que se desarrollan en intervalos de 10 años y los rangos máximo y mínimos de registro de cada variable. Véase a continuación, a manera de ejemplo, las gráficas generadas por RClimdex, para datos de temperatura máxima y mínima así como la gráfica de precipitación diaria.

En las figuras 20 a la 25 se puede evidenciar el inicio y el final del año hidrológico.

3.2.1.1. Temperaturas

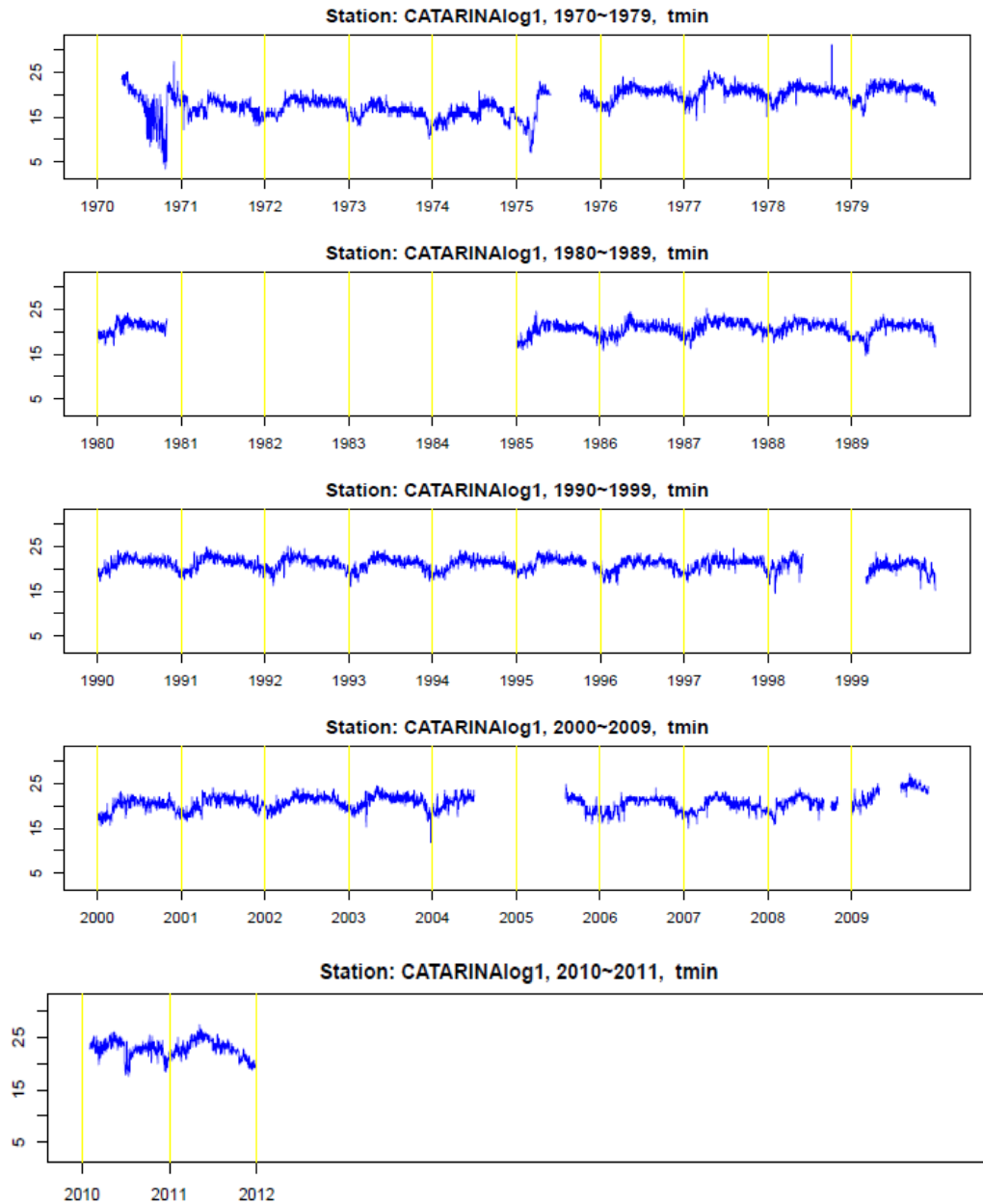
Es la magnitud referida a las nociones comunes de calor, frío, templado o tibio, medible mediante un termómetro.

Figura 20. **Temperaturas, máxima (t_{\max}) en estación Catarina en San Marcos**



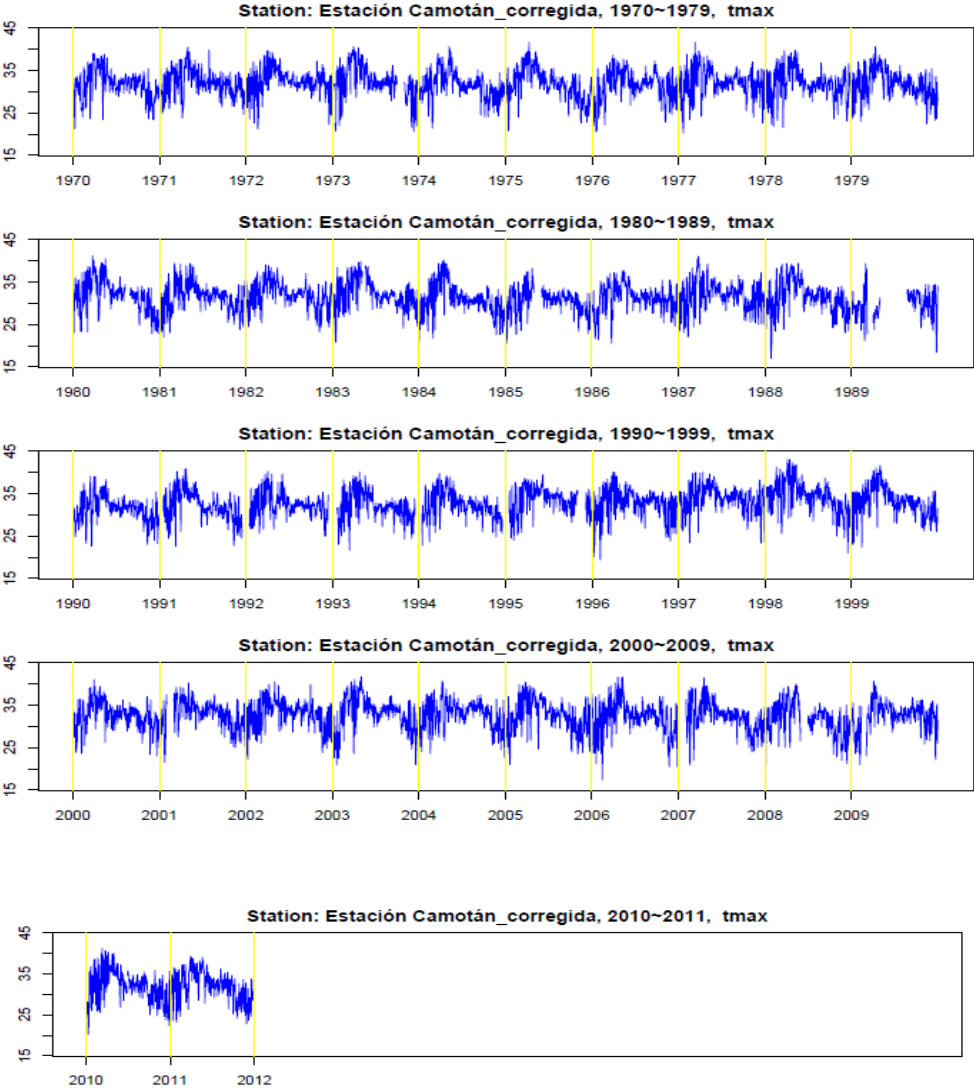
Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

Figura 21. **Temperaturas, mínima (t_{\min}) en estación Catarina en San Marcos**



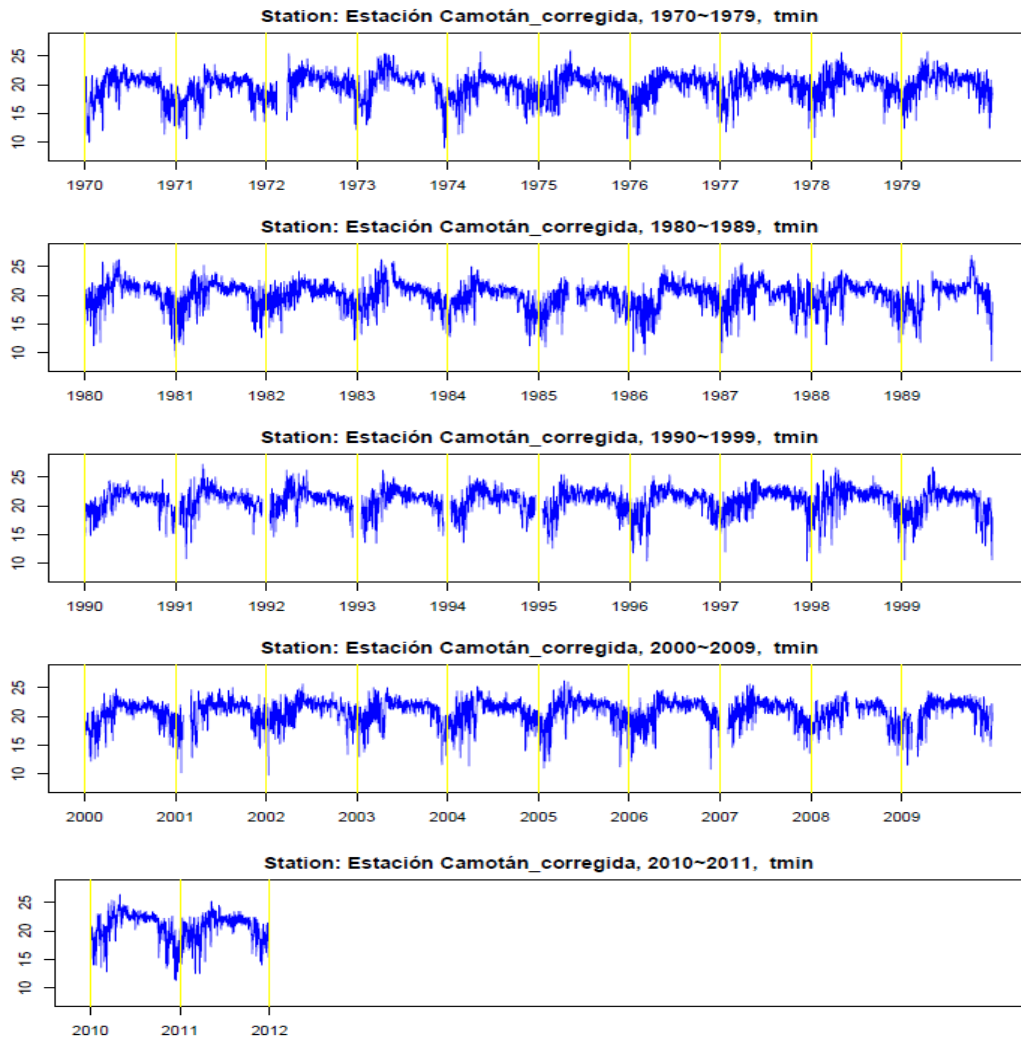
Fuente: elaboración propia, con programa RClindex.

Figura 22. Temperaturas, máxima (t_{max}) en estación Camotán, Zacapa



Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

Figura 23. Temperaturas, máxima (t_{min}) en estación Camotán, Zacapa

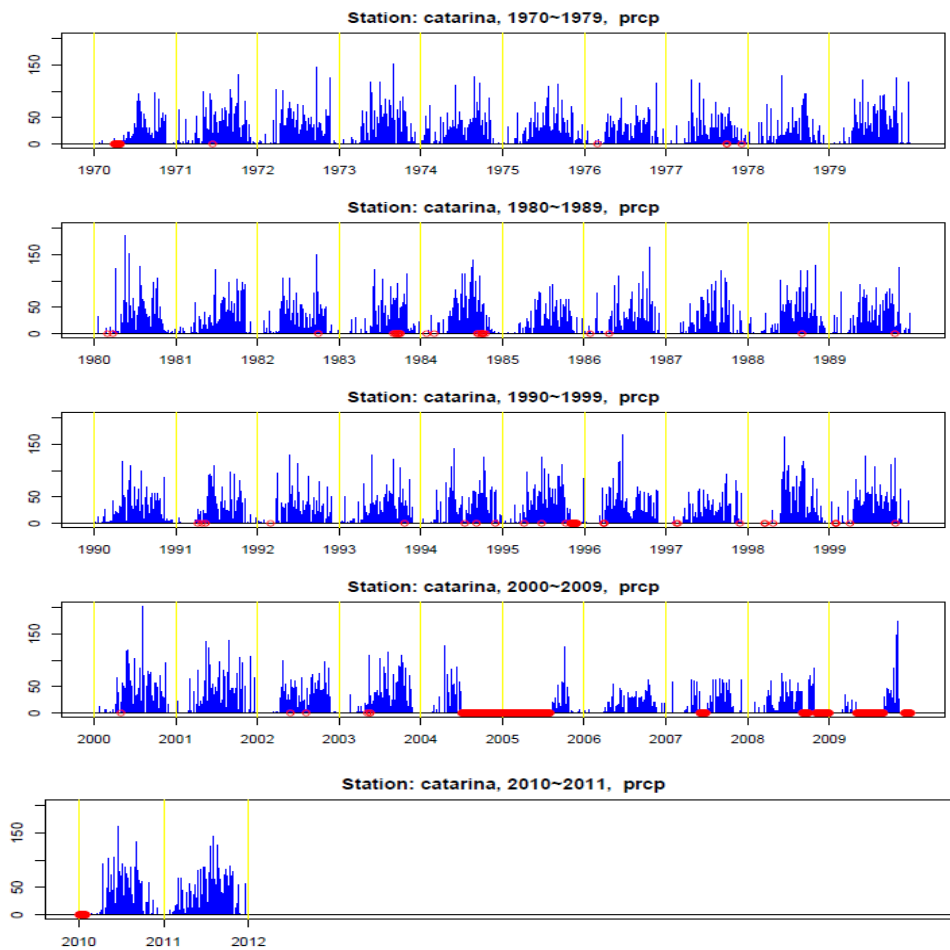


Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

3.2.1.2. Precipitaciones

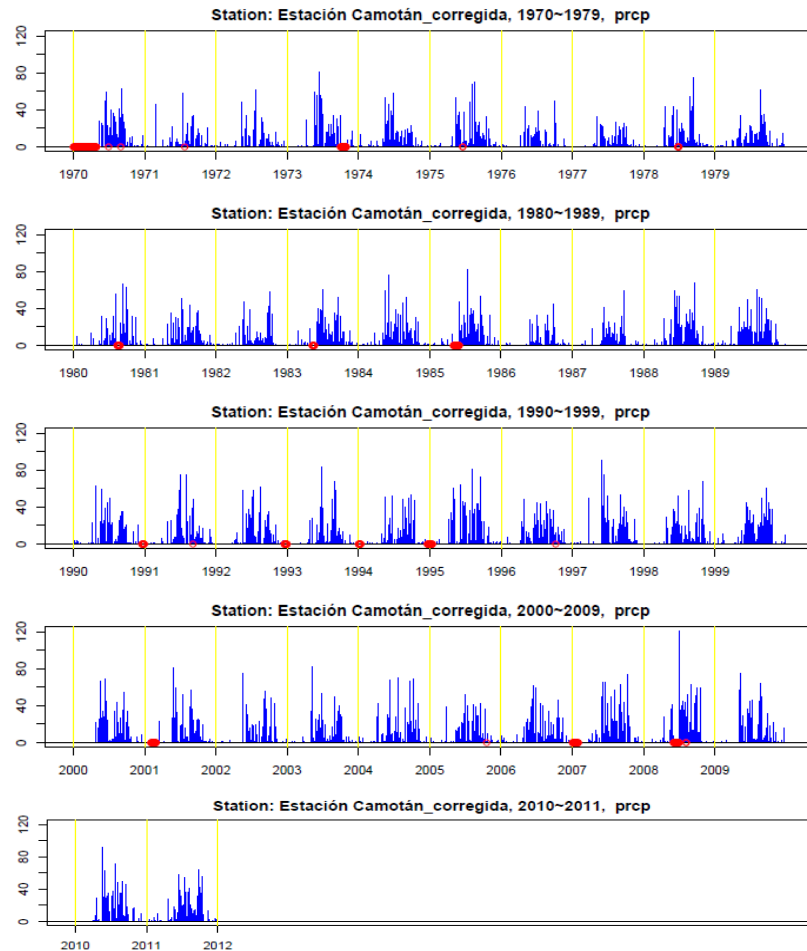
Es cualquier forma hidrometeoro que cae de la atmósfera y llega a la superficie terrestre.

Figura 24. Precipitación (prcp) en estación Catarina en San Marcos



Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

Figura 25. Precipitación (prcp) en estación Camotán en Zacapa



Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

Es notorio que existen espacios vacíos, representados con una línea roja o círculos, en la temperatura y en la precipitación ya que de los datos puntuales no poseía información alguna. Este tipo de gráfico permite también visualizar la época del año en que se generan las mayores precipitaciones, que aproximadamente en el tercer trimestre de cada año.

3.3. Generación de índices y gráficos de índices

Luego de haber llevado a cabo el procedimiento de control de calidad CC o extraqc (*extra quality control*), el programa RClimdex genera, previa selección de cada índice requerido, los gráficos necesarios para establecer las tendencias de cada una de las variables que han sido estudiadas.

Como se explicó con más detalle anteriormente, para propósitos de visualización, se grafican series anuales, junto con tendencias calculadas por regresión lineal de mínimos cuadrados (línea sólida en los gráficos) y regresión lineal con ponderamientos locales (línea punteada en los gráficos) tal como se muestra más adelante en algunas gráficas. Estadísticas del ajuste de curvas lineal se muestran en los gráficos.

Analizar uno a uno los indicadores generados por el programa resulta de sobremanera complicado, pero para todas las estaciones, estos índices o indicadores se agrupan y se analizan por ítem tal como se muestra en la tabla XII.

Los resultados de las series son almacenados en un subdirectorio o subcarpeta llamado Indices en formato Excel. Para propósitos de visualización, el software proporciona gráficas de series anuales, junto con las tendencias mediante regresión lineal de mínimos cuadrados (línea continua en el gráfico) y regresión lineal con ponderamientos locales (línea discontinua en la gráfica).

El proceso estadístico realizado por RClimdex del ajuste de curvas lineal se muestra en las gráficas. Estas gráficas se guardan en un subdirectorio llamado *PLOTS* en formato JPEG.

Tabla XII. **Listado de índices o indicadores utilizados**

Indicador	Detalle	Agrupación
PRCPTOT (mm)	Precipitación total al año	Asociados al comportamiento de la precipitación y de eventos extremos de lluvia
R95P (mm)	Número de días en un año con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos	
SDII (mm/día)	Precipitación total anual/ días con lluvia al año con (Prcp >1,0 mm)	
CDD	Mayor número de días secos consecutivos en un año	
CWD	Mayor número de días húmedos consecutivos en un año	
R10mm	Número de días al año con lluvia mayor a 10 mm	
R20mm	Número de días al año con lluvia mayor a 20 mm	
SU25 (días)	Días al año con temperatura media diaria mayor a 25 °C	
TR20 (días)	Días al año cuando la temperatura media diaria es mayor a 20 °C	

Fuente: *Manual del Usuario RClimDex (1.0)*. p. 14.

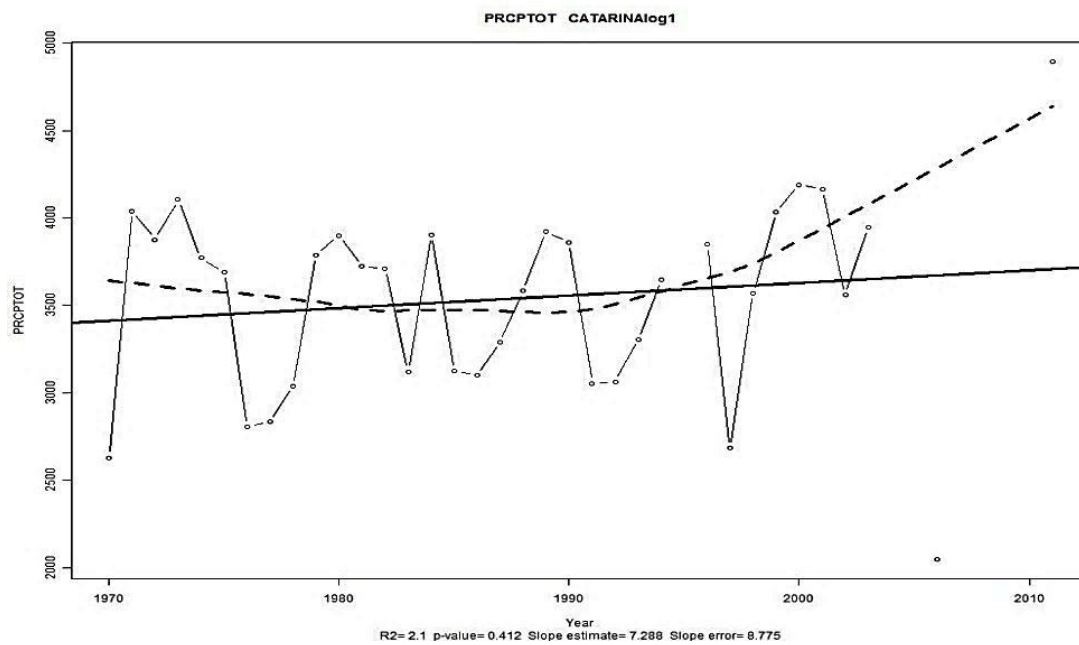
Cada gráfica muestra un valor de importancia, el *p-value*. Este valor indica si la serie es estadísticamente significativa (*p-value* < 0,05) o no. Además, se presenta la tendencia estimada o *slope estimate*, la cual define el valor de cambio del indicador, en otras palabras, es la pendiente de la recta trazada mediante la regresión de mínimos cuadrados.

A manera de ejemplo, se presenta continuación las gráficas obtenidas de los índices solicitados al software RClimdex de dos estaciones, una por cada cuenca analizada, Catarina en San Marcos y Camotán en Zacapa. Véase las figuras 26 a la 41.

3.3.1. Gráficas de índices en estación Catarina, San Marcos

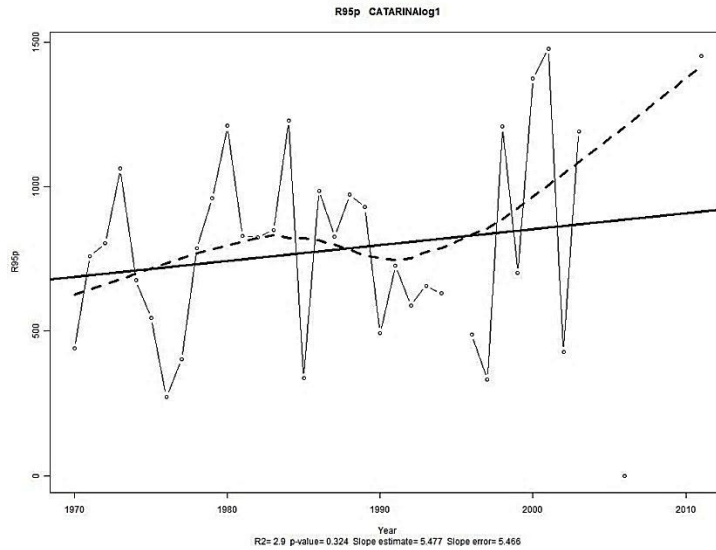
A continuación en la figura 26 se muestra en una gráfica de índices la precipitación total al año.

Figura 26. Precipitación total al año (PRCTOT)



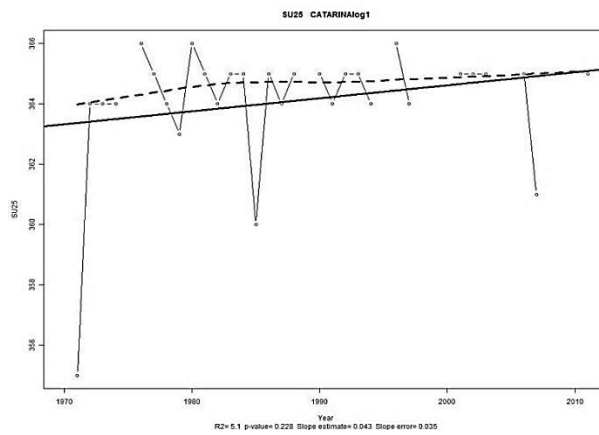
Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

Figura 27. **Número de días en un año, con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (R95p)**



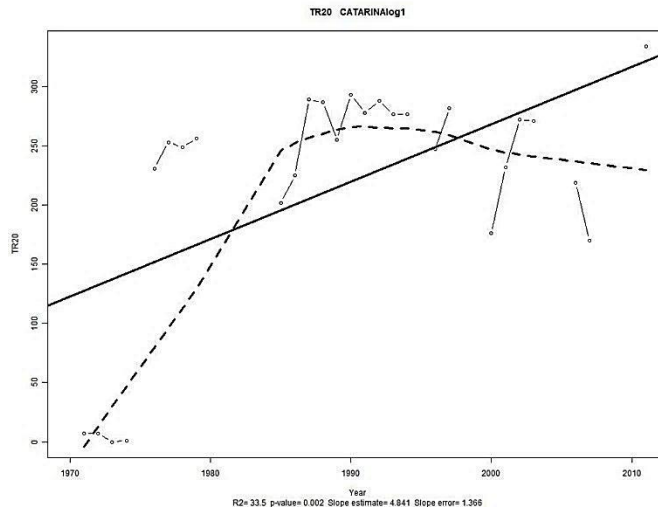
Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

Figura 28. **Días al año cuando la temperatura media diaria >25 °C (SU25)**



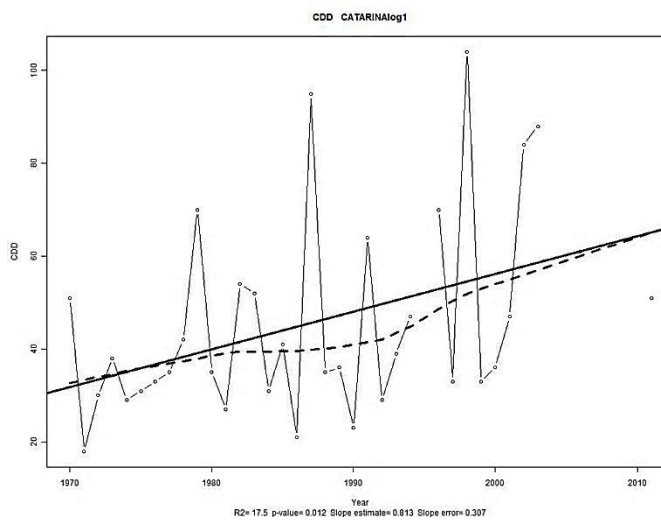
Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

Figura 29. **Días al año cuando la temperatura media diaria > 20 °C (TR20)**



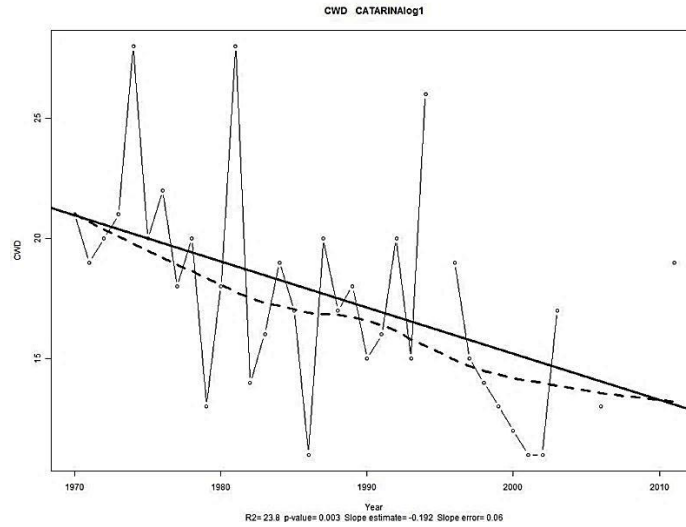
Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

Figura 30. **Mayor número de días secos consecutivos en un año (CDD)**



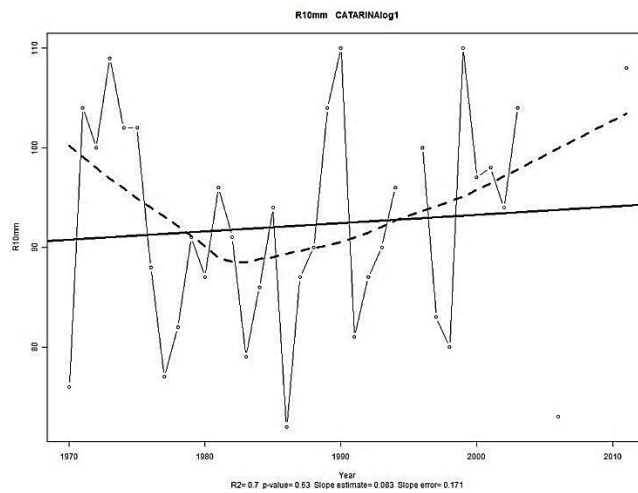
Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

Figura 31. **Mayor número de días húmedos consecutivos en un año (CDW)**



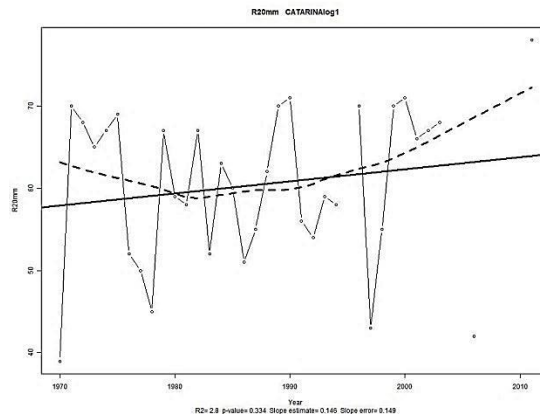
Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

Figura 32. **Número de días al año con lluvia mayor a 10 mm (R10 mm)**



Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

Figura 33. **Número de días al año con lluvia mayor a 20 mm (R20 mm)**

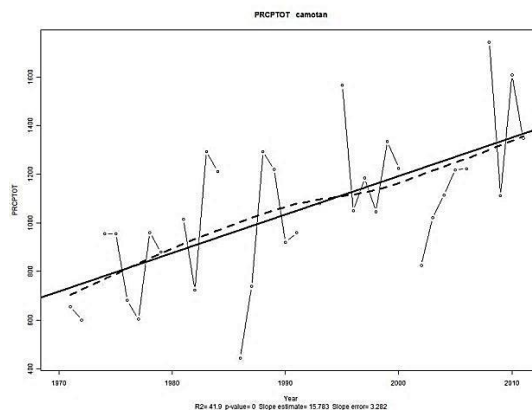


Fuente: elaboración propia, con programa RClindex.

3.3.2. Gráficas de índices en estación Camotán, Zacapa

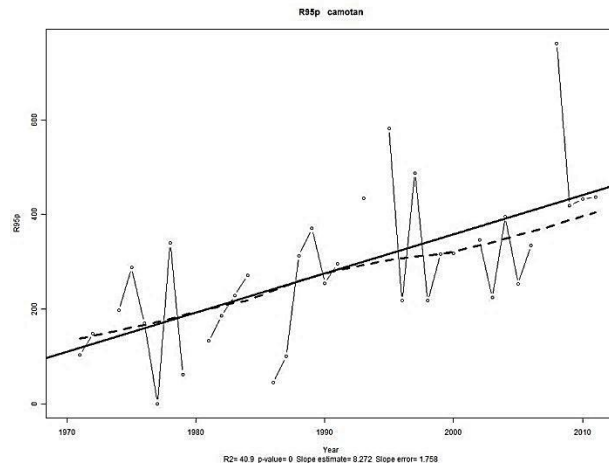
A continuación en la figura 34 se muestra en una gráfica de índices la precipitación total al año.

Figura 34. **Precipitación total al año (PRCTOT)**



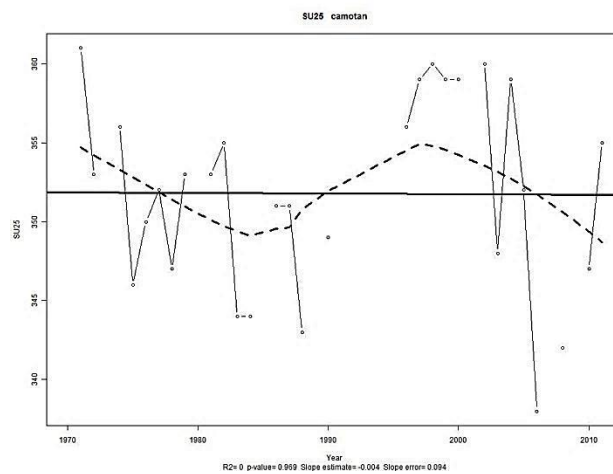
Fuente: elaboración propia, con programa RClindex.

Figura 35. **Número de días en un año con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (R95p)**



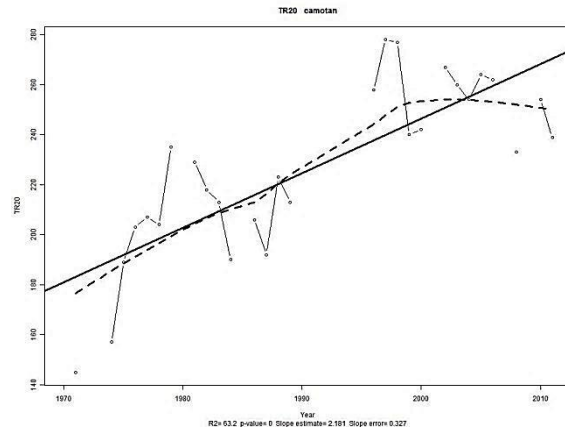
Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

Figura 36. **Días al año cuando la temperatura media diaria > 25 °C (SU25)**



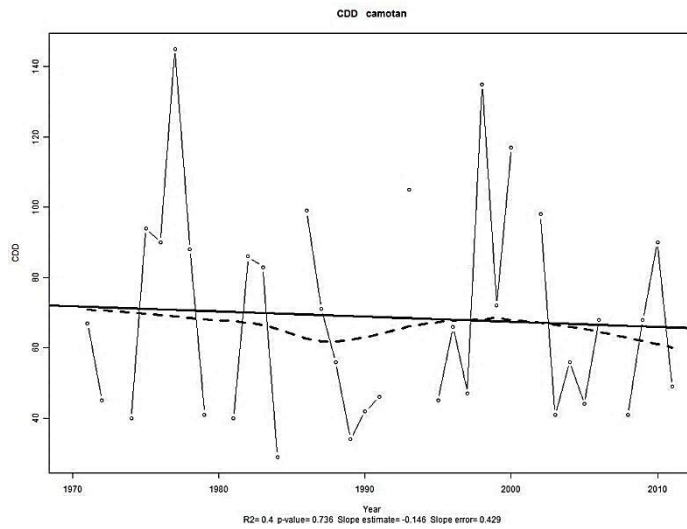
Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

Figura 37. **Días al año cuando la temperatura media diaria > 20 °C (TR20)**



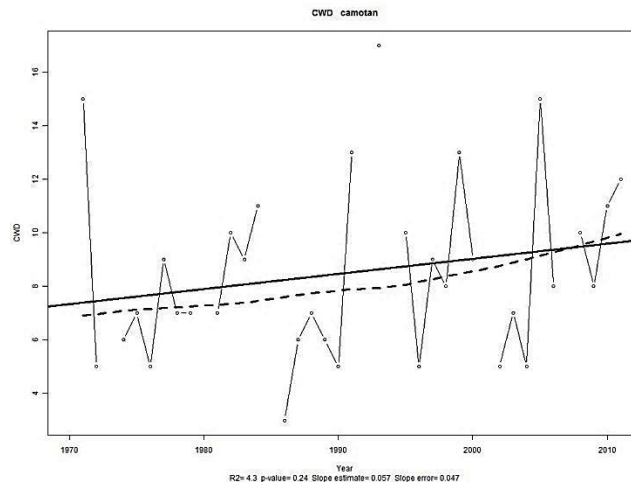
Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

Figura 38. **Mayor número de días secos consecutivos en un año (CDD)**



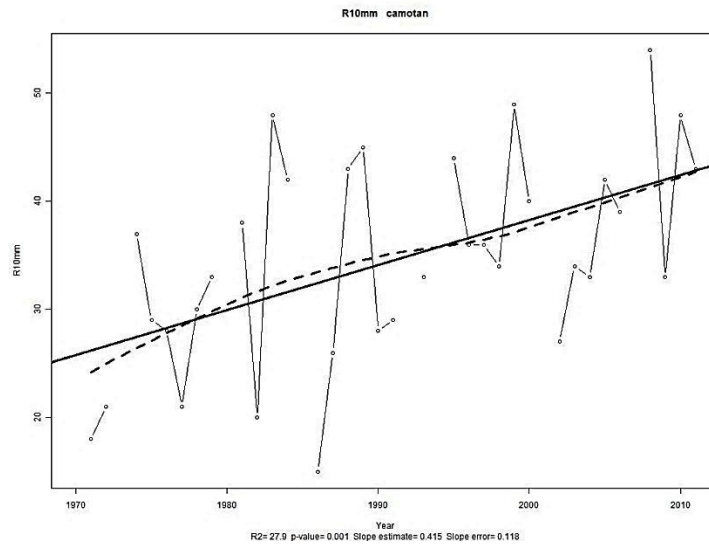
Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

Figura 39. **Mayor número de días húmedos consecutivos en un año (CWD)**



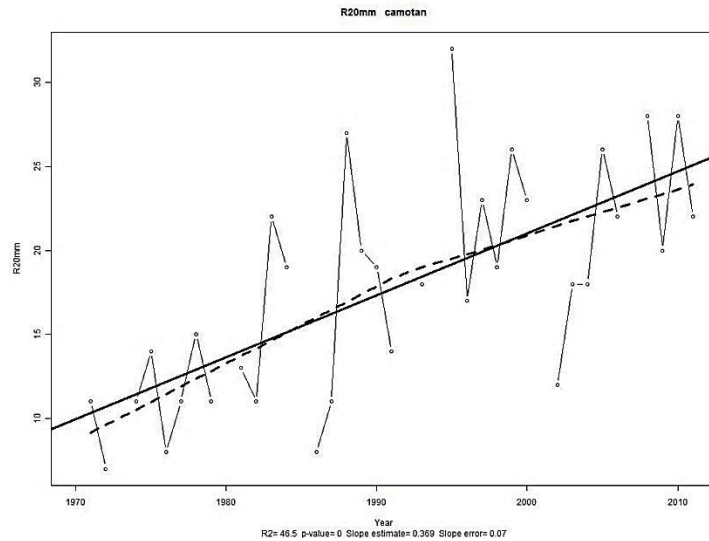
Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

Figura 40. **Número de días al año con lluvia mayor a 10 mm (R10 mm)**



Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

Figura 41. **Número de días al año con lluvia mayor a 20 mm (R20 mm)**



Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

3.4. Resultados

El dato utilizado de cada gráfica para establecer si existe o no un cambio o variación de la temperatura y de la precipitación en las regiones estudiadas, ha sido el valor de la pendiente que se generó. Se ha podido deducir mediante estas gráficas una tendencia positiva o de crecimiento y otra negativa o de tendencia decreciente, dependiendo de cada caso.

Cada estación fue sometida al estudio de precipitación y temperatura y se trazaron los datos relevantes durante aproximadamente los últimos 30 años en las cuencas de los ríos ya anteriormente mencionados.

3.4.1. Tendencia de la precipitación

Para el rango de tiempo estudiado se hace un análisis de la precipitación en cada cuenca. Este análisis permitirá establecer un panorama de cambio o continuidad en esta variable y mayormente cual puede ser la previsión para el recurso hídrico en el país, esto a partir de un sondeo a través de mapas zonificados mediante iso-líneas o con resultados puntuales por estación.

En las tablas XIII y XIV se hace un resumen de los indicadores utilizados en RClimdex para realizar el estudio de la precipitación.

Tabla XIII. **Resumen de la tendencia de índices de precipitación en el río Naranjo en San Marcos**

Estación	PRCPTOT	Tendencia	R95p	Tendencia	CDD	Tendencia	DWD	Tendencia	R10mm	Tendencia	R20mm	Tendencia
Ayutla	5,946		-19,154	-	0,214	+	0,000		1,83	+	0,33	+
Catarina	7,288		5,734	+	0,813	+	-0,192	-	0,03	+	0,16	+
La Colonia	-33,543		-39,489	-	1,008	+	0,164	+	1,96	+	0,14	+
San Marcos	29,074		14,457	+	-0,110	-	-0,058	-	1,02	+	0,56	+

Fuente: elaboración propia a partir de RClimdex.

Tabla XIV. **Resumen de la tendencia de índices de precipitación en el río Grande de Zacapa**

Estación	PRCPTOT	Tendencia	R95p	Tendencia	CDD	Tendencia	DWD	Tendencia	R10mm	Tendencia	R20mm	Tendencia
Camotán	15,783	+	8,272	+	-0,146	-	0,057	+	0,415	+	0,369	+
Esquipulas	8,211	+	2,252	+	D.I.		D.I.		D.I.		D.I.	
Ipala	-0,411	-	-2,157	-	-1,465	-	0,061	+	0,067	+	-0,096	-
La Unión	12,070	+	11,292	+	0,015	+	-0,032	-	0,300	+	0,258	+
La Fragua	7,779	+	4,240	+	-0,379	-	-0,007	-	0,213	+	0,146	+

Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

3.4.1.1. Tendencia de la precipitación acumulada anual

A partir del índice PRCPT, que relaciona la acumulación de la precipitación por año se muestra el comportamiento en cada cuenca y se hace un resumen a continuación.

3.4.1.1.1. Tendencia de la precipitación total anual en el río Naranjo en San Marcos

A partir del mapa de iso-líneas que se muestra en la figura 42, se puede establecer una idea de la tendencia al aumento de los eventos de precipitación.

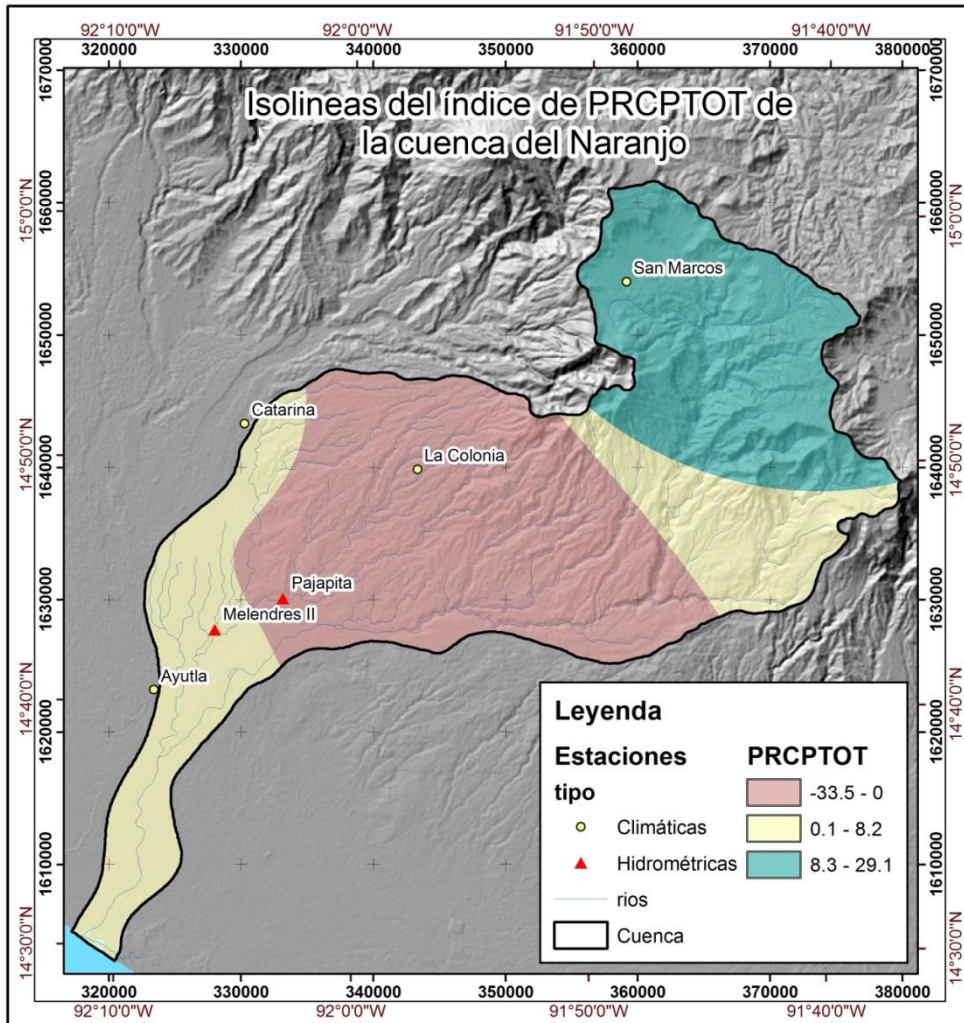
El color amarillo en la zona sur y suroeste, así como en la zona centroeste de la cuenca, muestran un moderada variabilidad de crecimiento

mientras que al norte del área bajo estudio, se manifiestan eventos con tendencias más marcadas, es decir un presencia de mayor precipitación anual marca la zona con un color verde.

Por otro lado, el color anaranjado, que se extiende por el centro de la cuenca abarca un alto porcentaje de la misma. De esto se establece una tendencia al decremento de la precipitación anual en dicha zona.

Debe hacerse mención en este punto que la tendencia general de la cuenca pareciera ser de crecimiento, excepto por la estación de La Colonia, pero se debe tomar en cuenta que dejó de funcionar en 1987. Lo que deja abierta una probabilidad de que los datos no obtenidos de esa zona en particular pudieran haber presentado tendencia positiva como las otras estaciones.

Figura 42. **PRCPTOT, o índice relacionado con la tendencia de la precipitación total anual, río Naranjo**



Fuente: elaboración propia, con programa Civil 3D.

3.4.1.1.2. Tendencia de la precipitación total anual en el río Grande de Zacapa

En este caso, también se hizo utilización de un mapa de iso-líneas que permite ver cuál es la tendencia al cambio en el área que comprende la cuenca del río Grande.

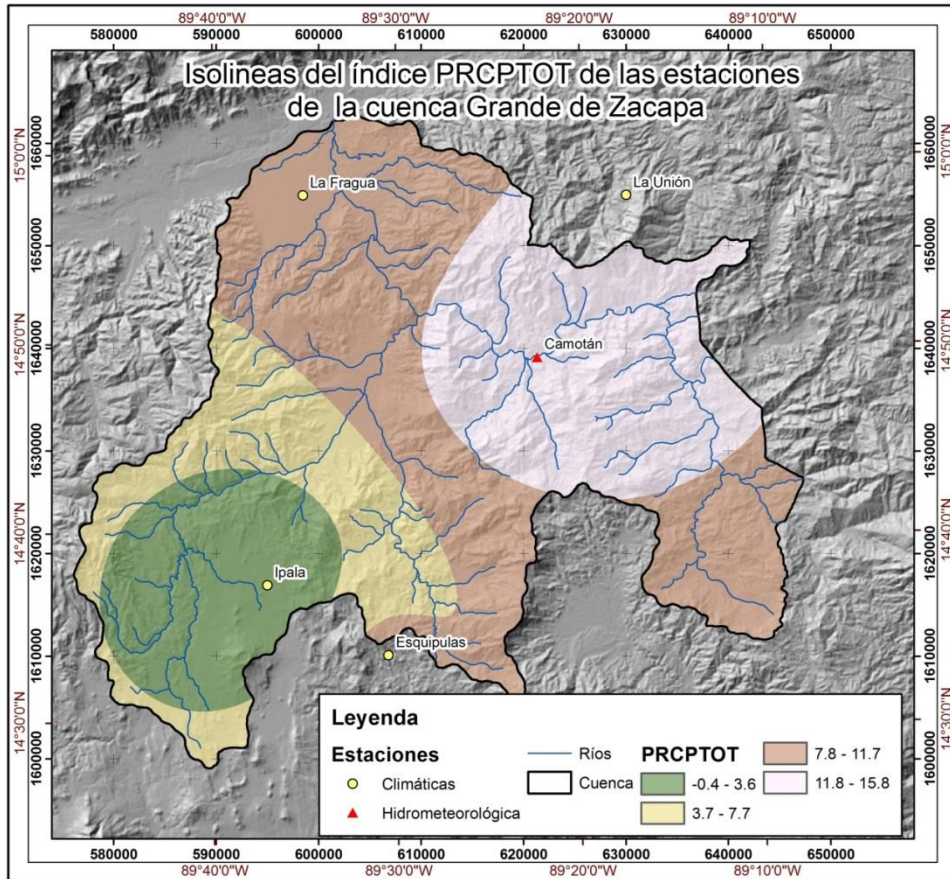
Para el caso de esta cuenca se utilizó rangos de temperatura y color diferente, el color café muestra un aumento moderado alto en la región Central, de igual manera en la zona sur este (ver la figura 43).

En la zona este de la cuenca se presenta una tendencia bien marcada al crecimiento y los eventos de precipitación parece ser que van en aumento. Esto se puede ver en color purpura claro en el mapa.

Hacia la región oeste, la tendencia es de crecimiento moderado pero hacia el suroeste se marca definitivamente una tendencia al decaimiento de los eventos de precipitación.

En general, la cuenca muestra que la precipitación total anual, tiende a aumentar excepto en la zona de la estación de Ipala, pero se debe destacar en este punto que dicha estación, ya no se encuentra trabajando pues solo tuvo actividad hasta 1990. Esta información deja abierta la probabilidad de que los datos no registrados en esa zona en particular pudieran haber presentado una tendencia positiva como lo muestran las otras estaciones.

Figura 43. **PRCPTOT, o índice relacionado con la tendencia de la precipitación total anual, río Grande de Zacapa**



Fuente: elaboración propia, con programa Civil 3D.

3.4.1.2. Tendencia de las precipitaciones fuertes diarias

El índice R95p, que establece la relación con las precipitaciones diarias de alta intensidad permitió establecer las algunas características del comportamiento de las cuencas.

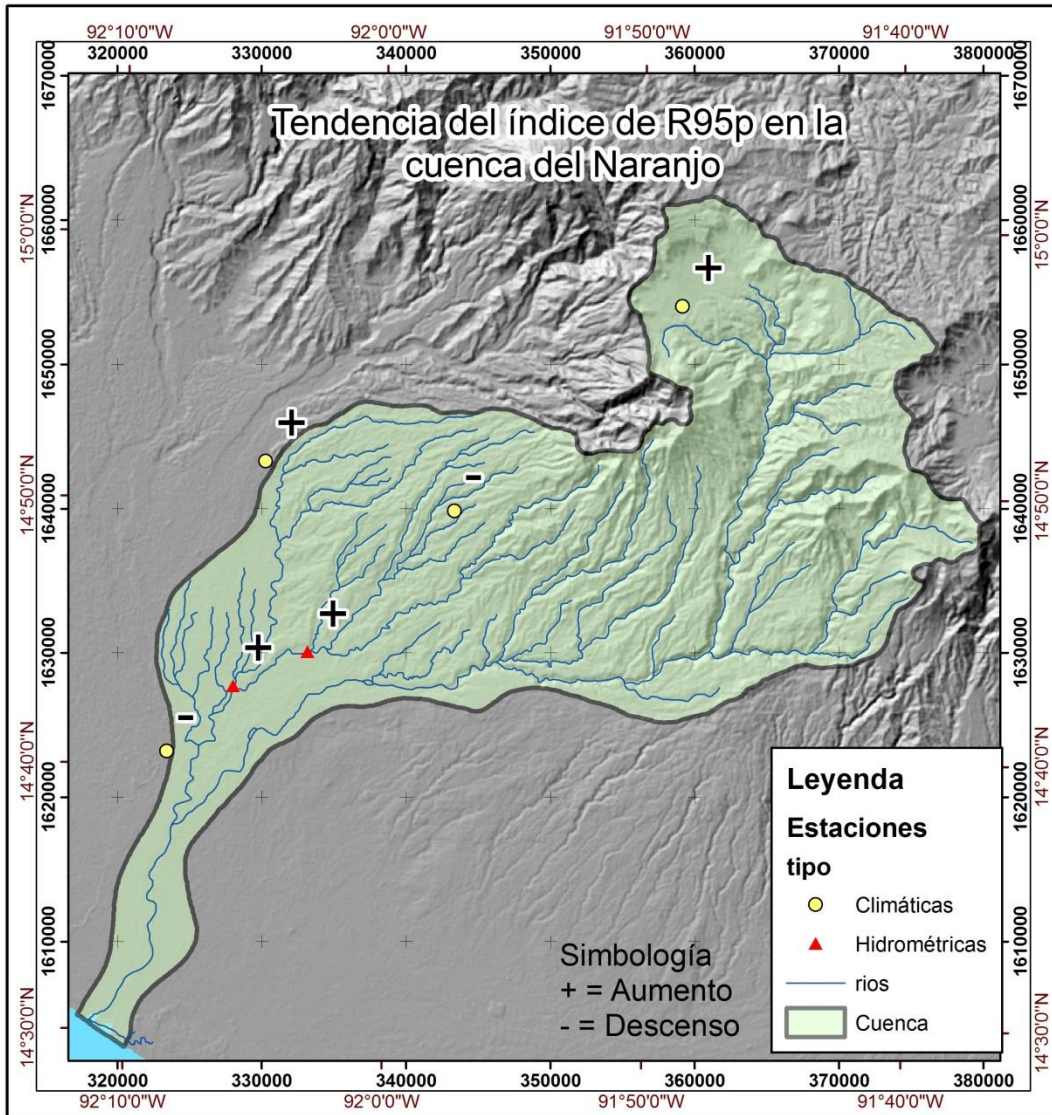
3.4.1.2.1. Precipitaciones fuertes diarias en el río Naranjo en San Marcos

Parece ser que los eventos relacionados con la precipitación para la cuenca del río Naranjo, que muestran una tendencia al crecimiento se ubican especialmente en las zonas que registran las estaciones de Catarina y San Marcos.

Los eventos de lluvias intensas o fuertes registrados en las estaciones de La Colonia y Ayutla, muestran una tendencia a disminuir aunque Ayutla lo muestra de modo más leve. Véase el mapa de datos puntuales de crecimiento o decaimiento en la figura 44 y compárese con la tabla XIV de la página 87.

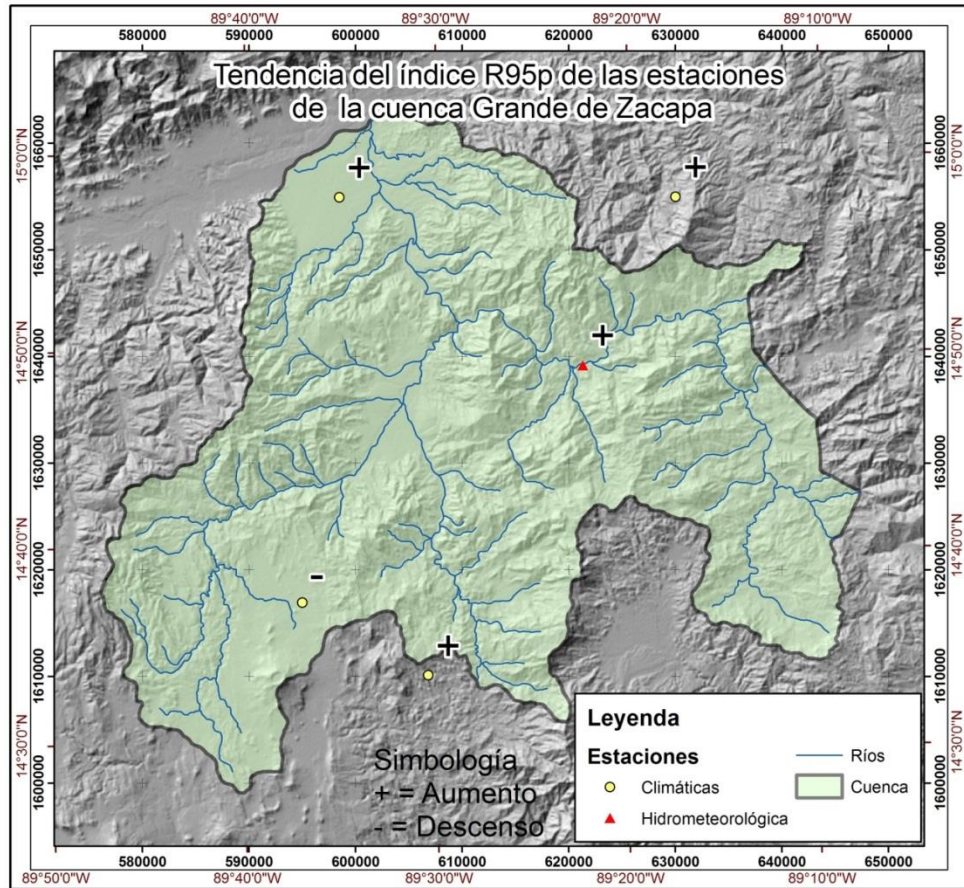
Adicionalmente se puede hacer una comparación con los eventos de precipitaciones total durante el año, el cual puede dar una idea de cuál es la interrelación que hay entre las estaciones.

Figura 44. R95p, índice relacionado con las precipitaciones intensas, cuenca del río Naranjo



Fuente: elaboración propia, con programa Civil 3D.

Figura 45. **R95p, índice relacionado con las precipitaciones intensas, cuenca del río Grande de Zacapa**



Fuente: elaboración propia, con programa Civil 3D.

3.4.1.2.2. Precipitaciones fuertes diarias en el río Grande de Zacapa

Para esta cuenca la única estación que presenta una tendencia negativa ante los eventos de precipitaciones fuertes es la de Ipala. El resto de las

estaciones muestran una clara tendencia al aumento a la manifestación de las lluvias de gran intensidad a través de los años estudiados (ver figura 45).

Como se sugirió anteriormente para la cuenca del río Naranjo, para San Marcos también se puede hacer una comparación con el mapa de las iso-líneas de tendencia de precipitación total anual (ver figura 43), y crearse una idea de cómo se interrelacionan las tendencias en cada estación.

3.4.1.3. Tendencia de la precipitación acumulada anual para septiembre y octubre

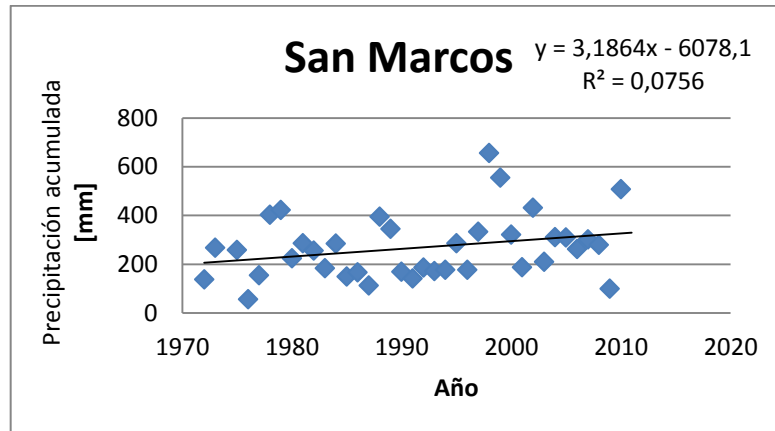
Debido a que en Guatemala están bien definidas las temporadas climáticas, la lluviosa y la seca, y según registros estadísticos, los meses finales de la época lluviosa son septiembre y octubre, se hace un análisis puntual de estos dos meses por cada año.

Se hará un análisis por los años en los cuales hay un registro de las precipitaciones, pues en algunos casos los datos históricos no existen y es precisamente en estos meses que se hace el análisis. Se muestra los datos puntuales anuales y la tendencia de crecimiento o decremento mediante las gráficas, y a manera de ejemplo dos estaciones por cada una de las cuencas estudiadas (ver figuras 46 a la 49).

3.4.1.3.1. Septiembre

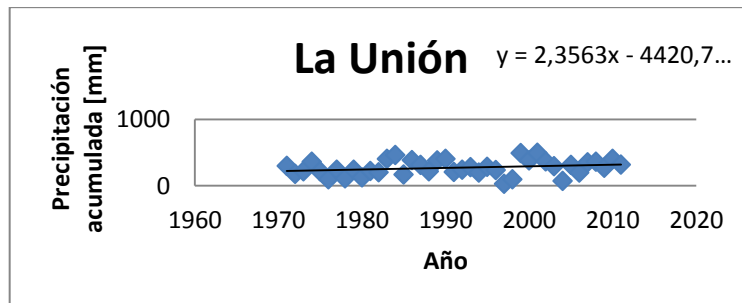
A continuación en la figura 46 se muestra en una gráfica la precipitación total de septiembre.

Figura 46. **Precipitación total de septiembre, estación San Marcos**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Figura 47. **Precipitación total de septiembre, estación La Unión, Zacapa**

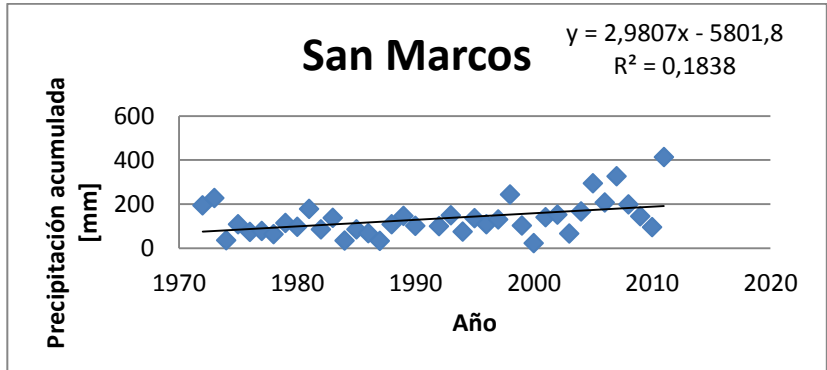


Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

3.4.1.3.2. **Octubre**

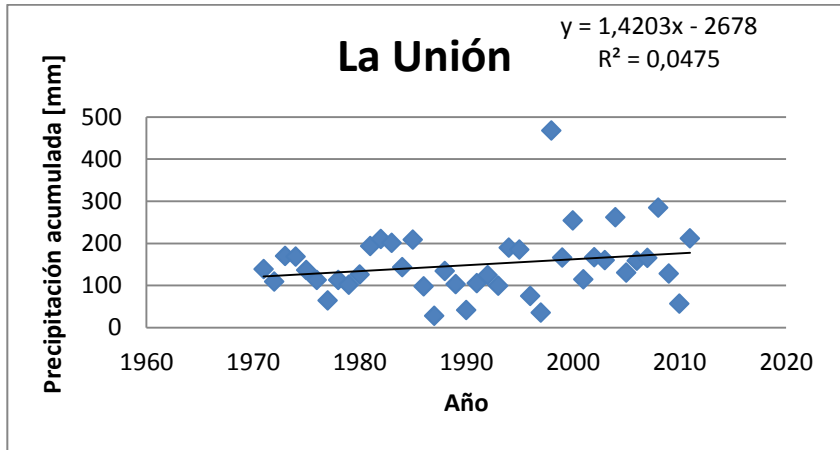
A continuación en la figura 48 se muestra en una gráfica la precipitación total del mes de octubre.

Figura 48. **Precipitación total de octubre, estación San Marcos**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Figura 49. **Precipitación total de octubre, estación La Unión en Zacapa**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

En las tablas XV y XVI se presenta un resumen de la tendencia de la tendencia de la precipitación acumulada anual de septiembre y octubre a modo de comprender cada estación y cada cuenca analizada.

Para realizar una lectura simple de esta variable de nuevo se utiliza el signo (+) para indicar que la tendencia es de incremento y el signo (-) indica un decaimiento o decremento de la precipitación en cada estación.

En general, después de realizar un análisis de cada estación en ambas cuencas, se puede observar que en septiembre la tendencia en general es de incremento de la precipitación acumulada, esto indica que para este mes, en el futuro se puede esperar mayores concentraciones de lluvia, y por tanto se puede prever posibles desbordamientos de los ríos y crecidas cada vez mayores.

Tabla XV. Resumen de la tendencia de la precipitación acumulada anual río Naranjo en San Marcos

Estación	Septiembre [mm/año]	Tendencia	Octubre [mm/año]	Tendencia
Ayutla	8,64	+	-25,35	-
Catarina	-0,822	-	3,85	+
San Marcos	3,186	+	2,981	+
La Colonia	3,311	+	-15,25	-

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. Resumen de la tendencia de la precipitación acumulada anual río Grande de Zacapa

Estación	Septiembre [mm/año]	Tendencia	Octubre [mm/año]	Tendencia
Camotán	1,939	+	2,671	+
Esquipulas	1,87	+	1,605	+
Ipala	2,076	+	-0,387	-
La Unión	2,356	+	1,420	+
La Fragua	0,305	+	-0,982	-

Fuente: elaboración propia.

Para octubre, se puede observar que en la cuenca del río Naranjo, en San Marcos, la tendencia es de crecimiento en el 50 % de las estaciones analizadas, y se debe tomar en cuenta que las estaciones que muestran un decremento en la tendencia, se encuentran inactivas, puede ser que los años que faltan para completar una serie similar a las estaciones activas, indiquen un aumento, y se necesitaría reactivarlas, pero esto sería una recomendación para que Insivumeh tome en cuenta para futuros estudios.

En la cuenca del río Grande de Zacapa, para octubre, la tendencia general es de crecimiento con un 60 % de las estaciones durante los años analizados y particularmente la zona de la estación Ipala se puede observar su tendencia negativa, pero se hace de nuevo la acotación que esta podría haber sido una tendencia positiva si existieran datos completos. En comparación con septiembre se presenta una tendencia negativa, puesto que se aproximan los días del final de la temporada lluviosa.

3.5. Tendencia de la temperatura media diaria

Dos de los índices que se utilizarán para determinar cuál ha sido la tendencia de la temperatura de cada cuenca son SU25 y TR20.

SU25 establece la relación en la cual se presentan la mayor cantidad de días en que la temperatura media diaria es mayor a los 25 °C, esto es, eventos de más calor en a través del tiempo. TR20, indica la temperatura que sobrepasa los 20 °C en el intervalo de tiempo estudiado.

Adicionalmente se hará un análisis de la temperatura media aritmética para hacer una relación entre la probabilidad de la ocurrencia de eventos de temperatura, a través de todo el intervalo de tiempo estudiado y las

probabilidades que pudieron o no cambiar en las décadas involucradas en todo el rango de tiempo. Esto con el fin de establecer si por cada década hay un desplazamiento a temperaturas mayores o menores o de otro modo, si estas se mantienen constantes.

SU25 y TR20 son los índices proporcionados por el software RClimdex que se presentan en las tablas XVII y XVIII a manera de resumen y permiten ver de manera sencilla si se presenta una tendencia de crecimiento de la temperatura media, al menos en las estaciones que aportaron datos suficientes para el análisis estadístico. Conjuntamente se incluyen los mapas de tendencia de iso-líneas para realizar una mejor interpretación de los datos numéricos.

En las estaciones en que se indica como tendencia D.I. o Datos Insuficientes, el programa RClimdex no pudo procesar los datos, ya que para este indicador fueron insuficientes en el intervalo de tiempo.

3.5.1. Temperatura media diaria en el río Naranjo en San Marcos

A continuación se muestra la temperatura media diaria en el río Naranjo en la tabla XVII.

Tabla XVII. **Temperatura media diaria en el río Naranjo en San Marcos**

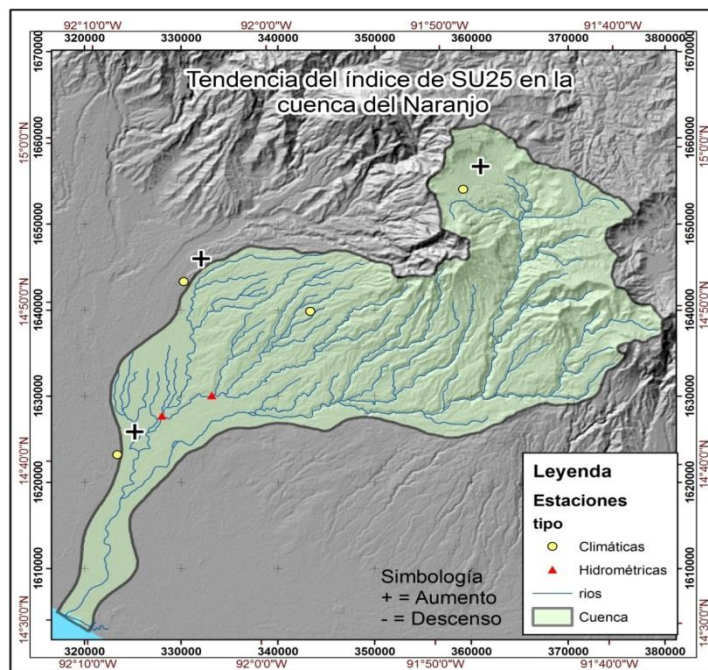
Estación	Días al año con Temperatura media diaria mayor a 25 °C (SU25) (días/año)	Tendencia	Días al año con Temperatura media diaria mayor a 20 °C (TR20) (días/año)	Tendencia
Ayutla	0,179		12,954	
Catarina	0,043		4,841	
La Colonia	D.I.		D.I.	
San Marcos	0,005		0	

Fuente: elaboración propia.

En el caso particular del índice TR20 de la estación de San Marcos, en la cual su pendiente de crecimiento es cero, puede hacerse una simple comparación con el índice SU25 el que da una tendencia al incremento de los días en que la temperatura media es de mayor a 25 °C, y así establecer una posible tendencia para el primer índice citado.

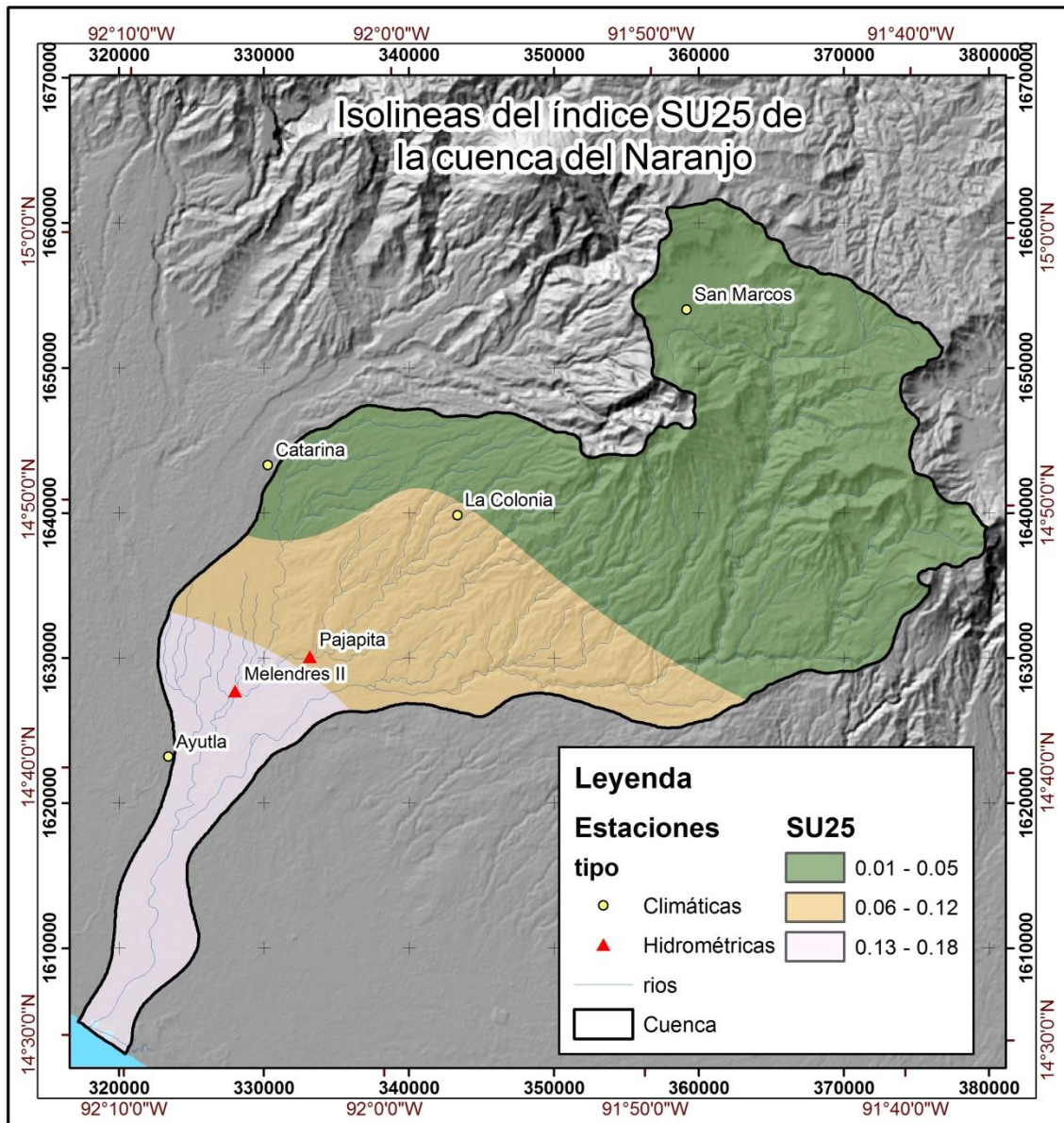
En manera general, la cuenca del río Naranjo, indica que la tendencia es de crecimiento en la ocurrencia días con temperatura media mayor a 20 y 25 °C. Y esta tendencia se puede apreciar en el mapa de iso-líneas que muestra como el área de la costa del pacifico es hacia donde se dirige el crecimiento más pronunciado (ver figura 50).

Figura 50. **Temperatura media diaria mayor a 25 °C en el río Naranjo mediante datos puntuales**



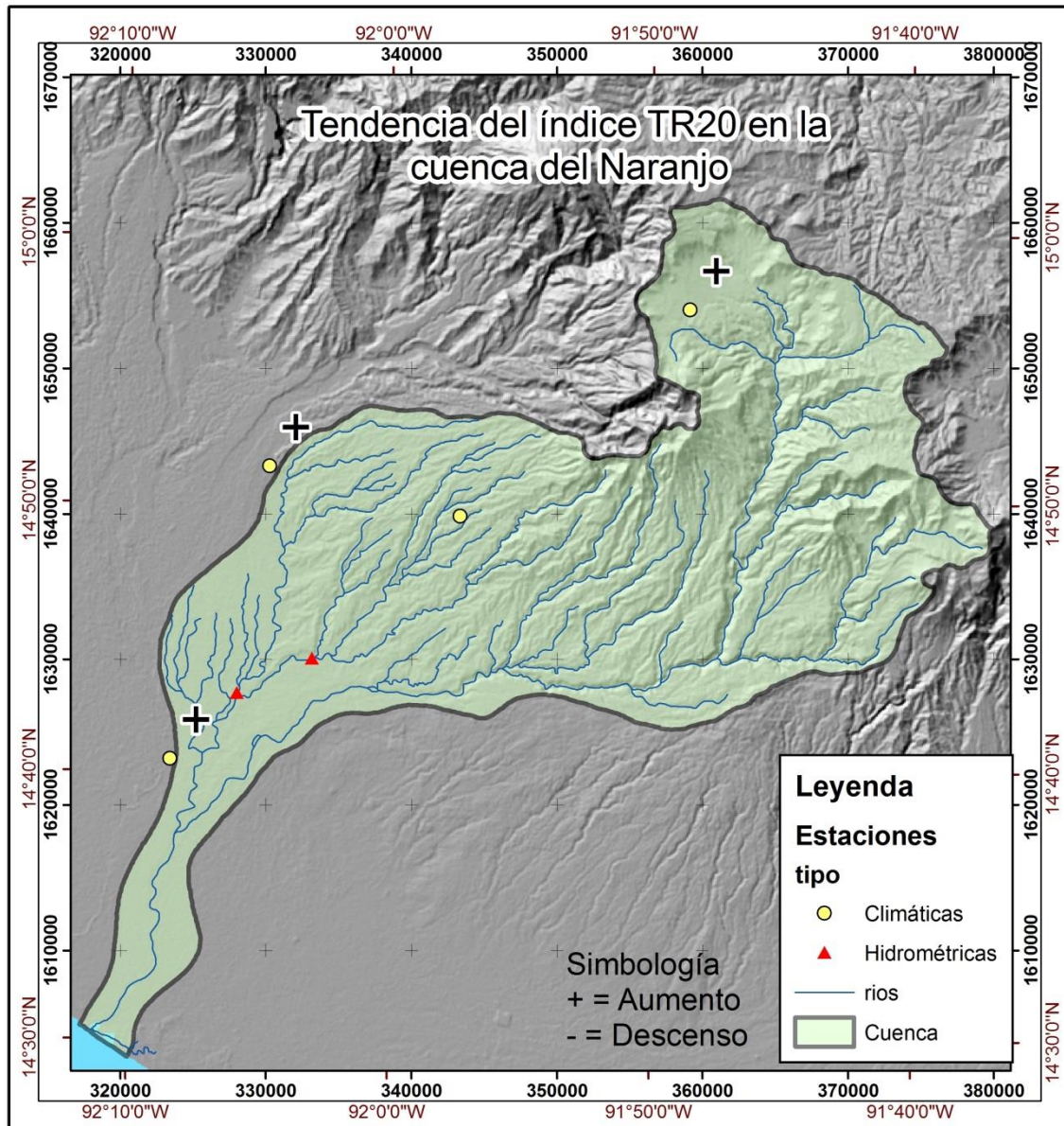
Fuente: elaboración propia, con programa Civil 3D.

Figura 51. Temperatura media diaria mayor a 25 °C en el río Naranjo mediante iso-líneas



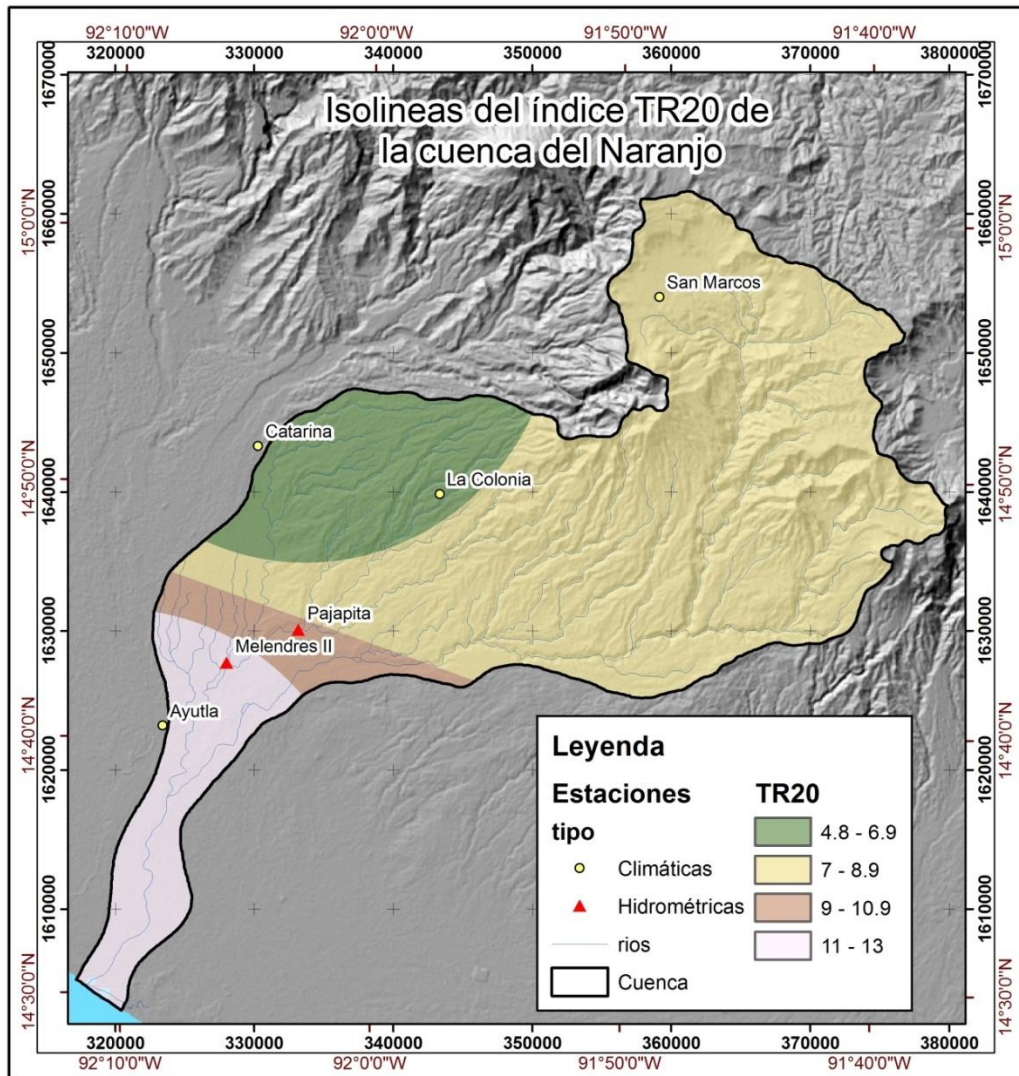
Fuente: elaboración propia, con programa Civil 3D.

Figura 52. Temperatura media diaria mayor a 20 °C en el río Naranjo mediante datos puntuales



Fuente: elaboración propia, con programa Civil 3D.

Figura 53. Temperatura media diaria mayor a 20 °C en el río Naranjo mediante iso-líneas



Fuente: elaboración propia, con programa Civil 3D.

3.5.2. Temperatura media diaria en el río Grande de Zacapa

A continuación se muestra la temperatura media diaria en río Grande de Zacapa en la tabla XVII.

Tabla XVIII. **Temperatura media diaria en el río Grande de Zacapa**

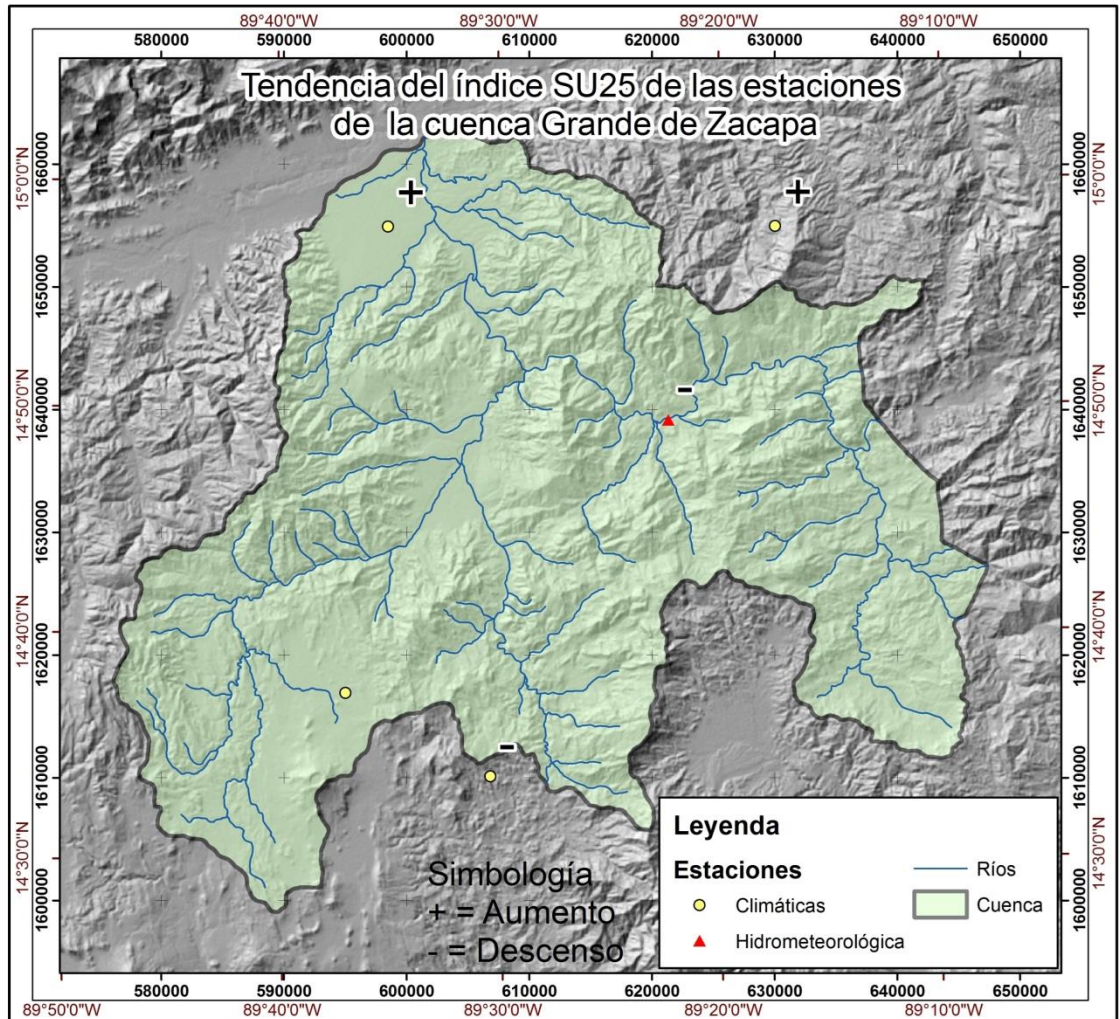
Estación	Días al año con Temperatura media diaria mayor a 25 °C (SU25) (días/año)	Tendencia	Días al año con Temperatura media diaria mayor a 20 °C (TR20) (días/año)	Tendencia
Camotán	-0,004		2,181	
Esquipulas	-0,342		0,607	
Ipala	D.I.		D.I.	
La Unión	0,985		1,219	
La Fragua	0,089		-0,748	

Fuente: elaboración propia.

En el caso particular de la estación de Ipala que no generó datos suficientes para el proceso estadístico, se puede apoyar en el análisis proporcionado en el mapa de iso-líneas y tratar de establecer una tendencia según el resto de datos. Estos mapas indican que en general, los días con mayor temperatura van en aumento, así se podría decir que existe una gran probabilidad que la zona que circunda la estación de Ipala presente una tendencia de crecimiento para los datos no registrados.

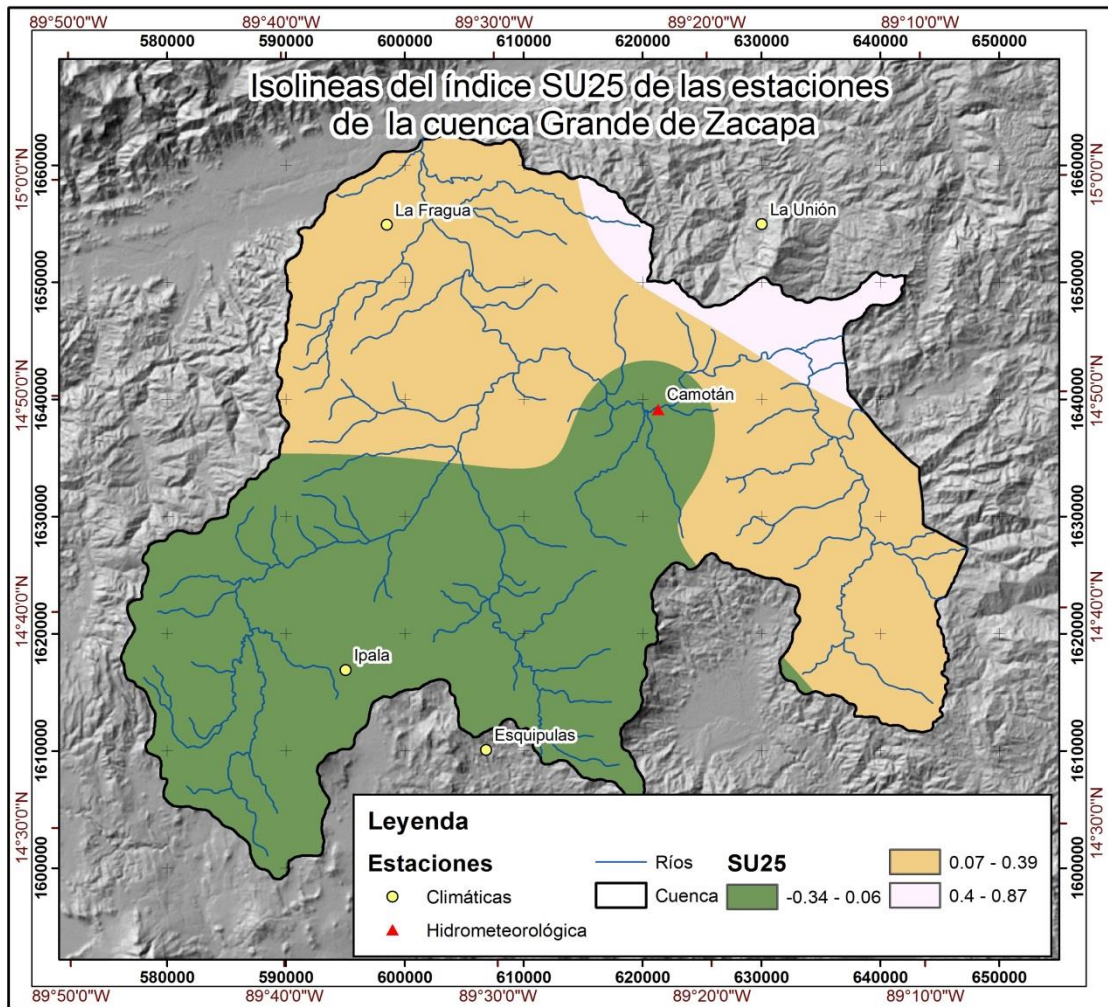
De manera general, la cuenca del río Naranjo, muestra que la tendencia es de crecimiento en la ocurrencia de mayor cantidad de días de calor o en que se registra temperaturas medias más elevadas. Las zonas que presentan una tendencia más marcada se encuentran a noroeste de la cuenca.

Figura 54. **Temperatura media diaria mayor a 25 °C en el río Grande de Zacapa mediante datos puntuales**



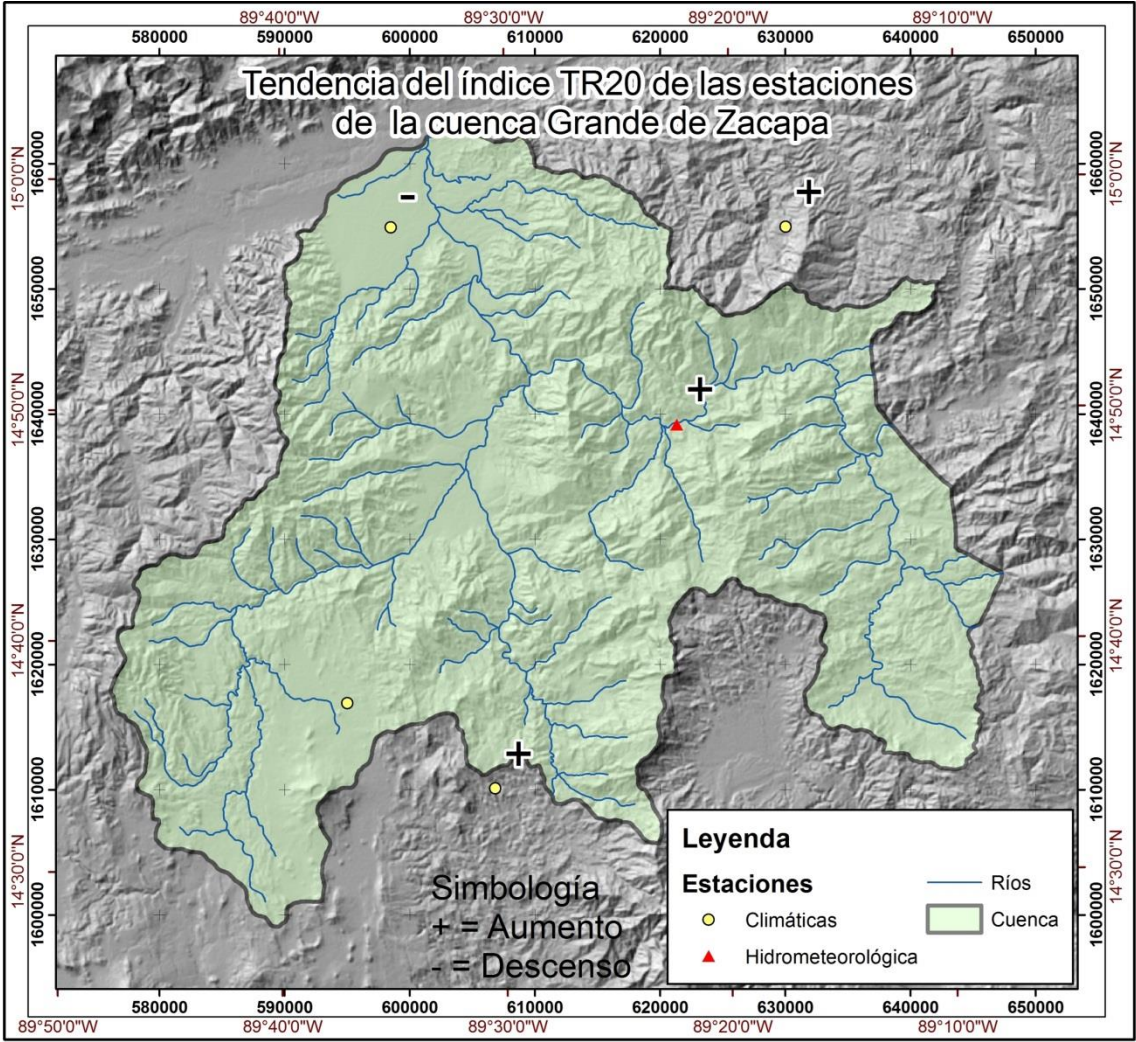
Fuente: elaboración propia, con programa Civil 3D.

Figura 55. Temperatura media diaria mayor a 25 °C en el río Grande de Zacapa mediante iso-líneas



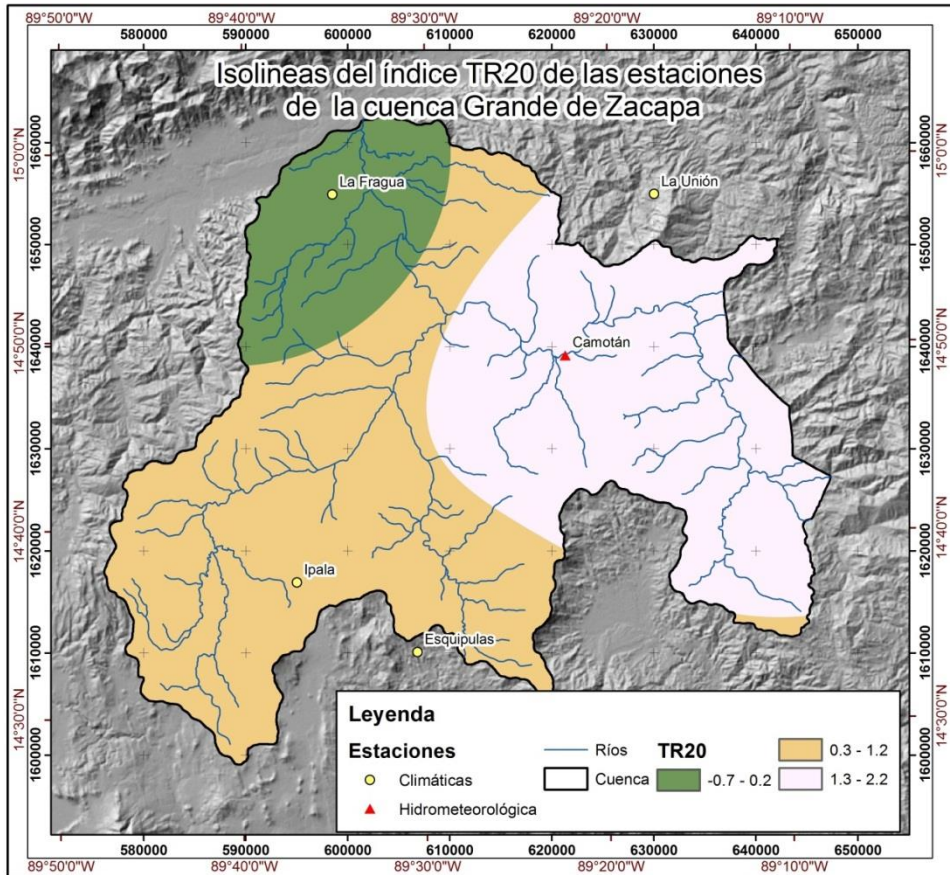
Fuente: elaboración propia, con programa Civil 3D.

Figura 56. **Temperatura media diaria mayor a 20 °C en el río Grande de Zacapa mediante datos puntuales**



Fuente: elaboración propia, con programa Civil 3D.

Figura 57. **Temperatura media diaria mayor a 20 °C en el río Grande de Zacapa mediante iso-líneas**



Fuente: elaboración propia, con programa Civil 3D.

Para tener una mejor idea de cómo ha sido la evolución de la tendencia de la temperatura media se muestran en las gráficas siguientes, elaboradas con el programa Excel, la probabilidad de ocurrencia puntual de cada evento de temperatura media diaria en las cuencas analizadas. Se utilizó una distribución de probabilidades estadística para generar estas gráficas.

Las probabilidades que se graficaron se obtuvieron a través de una tabla de distribución de frecuencias. Para la probabilidad del rango de tiempo completo de análisis se grafica una curva de color azul, que para la estación de San Marcos ha incluido de 1972 al 2011 y para la estación de La Fragua, se tomó en cuenta de 1970 al 2011 (ver tablas XIX y XX).

Se puede visualizar como las probabilidades de ocurrencia no se desplazan de manera abrupta por cada década incluida en el intervalo completo de análisis, es decir, si se percibe un desplazamiento, este es muy leve, lo que concuerda con las pendientes que generaron las gráficas de los índices de SU25 y TR20 proporcionados por RClimdex, las cuales eran pendientes de valores bajos (consultar las tablas XVII y XVIII).

Para la estación San Marcos, la temperatura media se centra con mayores probabilidades de ocurrencia entre los 13 y los 15 °C, con una marcada ocurrencia en los 14 °C (ver figura 58).

Para la estación La Fragua, las probabilidades se acumulan con mayor preponderancia entre los 27 y los 30 °C. Pero una marcada ocurrencia se centra entre los 28 y 29 °C (ver figura 59).

Tabla XIX. **Tabla de distribución de frecuencias de los datos de precipitaciones intensas diarias de la estación San Marcos período 1972 a 2011**

Lim inf	Lim sup	fi	hi
3,1	4	1	0,000 07
4,1	5	0	0,000 00
5,1	6	4	0,000 29
6,1	7	7	0,000 50
7,1	8	58	0,004 17
8,1	9	178	0,012 78
9,1	10	510	0,036 62
10,1	11	1 133	0,081 36
11,1	12	1 796	0,128 98
12,1	13	2 575	0,184 92
13,1	14	3 250	0,233 39
14,1	15	2 730	0,196 05
15,1	16	1 336	0,095 94
16,1	17	287	0,020 61
17,1	18	48	0,003 45
18,1	19	9	0,000 65
19,1	20	3	0,000 22
		13 925	1,000 00

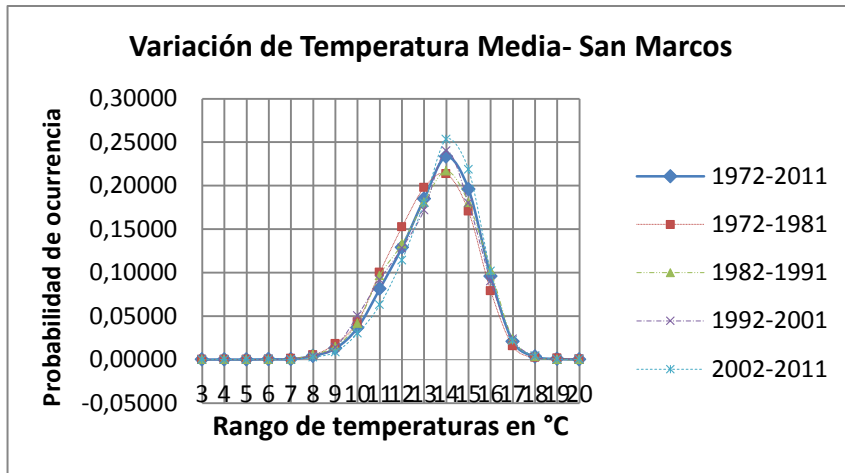
Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Tabla de distribución de frecuencias de los datos de precipitaciones intensas diarias de la estación La Fragua período 1970 a 2011**

Lim inf	Lim sup	fi	hi
16,1	17	1	0,000 07
17,1	18	2	0,000 14
18,1	19	11	0,000 76
19,1	20	36	0,002 47
20,1	21	81	0,005 57
21,1	22	130	0,008 94
22,1	23	257	0,017 66
23,1	24	444	0,030 52
24,1	25	750	0,051 55
25,1	26	1 245	0,085 57
26,1	27	2 046	0,140 63
27,1	28	3 025	0,207 92
28,1	29	3 000	0,206 20
29,1	30	1 847	0,126 95
30,1	31	898	0,061 72
31,1	32	465	0,031 96
32,1	33	198	0,013 61
33,1	34	85	0,005 84
34,1	35	22	0,001 51
35,1	36	6	0,000 41
		14 549	1,000 00

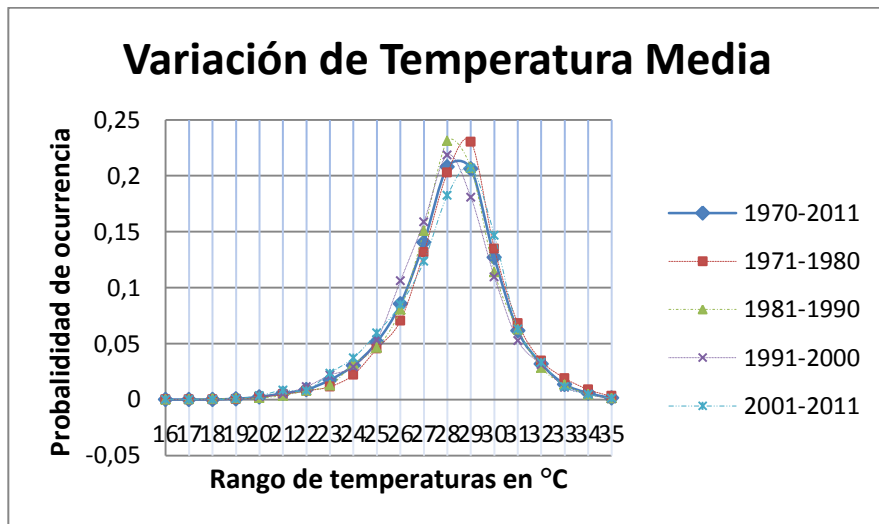
Fuente: elaboración propia.

Figura 58. **Variación de la temperatura media en estación San Marcos
cuenca del río Naranjo**



Fuente: elaboración propia.

Figura 59. **Variación de la temperatura media en estación La Fragua
cuenca del río Grande de Zacapa**



Fuente: elaboración propia.

4. ANÁLISIS DE CAUDALES

4.1. Análisis de la información

Una de las principales intenciones de este trabajo es determinar la variación del recurso hídrico en las cuencas bajo estudio. Por tal motivo, se debe analizar si las masas de agua, en este caso, los ríos, han presentado un aumento en sus niveles o una clara disminución de sus caudales a través del tiempo.

Se hizo uso de los datos proporcionados por el Insivumeh, de tal manera que cada estación se analizó utilizando también el software RClimdex. Lamentablemente, los datos disponibles en las cuencas de los ríos estudiados, son pocos y muchos datos de algunas estaciones, se descartaron pues no son suficientes en rangos de tiempo mayores a 10 años.

Así, se presenta únicamente dos estaciones de medición de caudales en la cuenca del río Naranjo en San Marcos, una Meléndrez II y la otra Pajapita (ver figura 18) y una sola estación en la cuenca del río Grande de Zacapa, esta es la estación de Camotán (ver figura 19).

4.2. Datos

Para la cuenca del río Naranjo en San Marcos, se cuenta con dos estaciones que presentaron un rango de tiempo mayor o igual a 10 años, y que los datos obtenidos se consideraron de buena calidad y permiten apreciar una

presencia clara de eventos en el tiempo. Véase la figura 60 que presenta la ubicación de las estaciones hidrométricas.

Para la cuenca del río Grande de Zacapa, se utilizó solamente la estación de Camotán, la cual presentó datos consistentes y de suficiente prolongación y continuidad en los años bajo estudio. Véase la figura 61 que presenta la ubicación de las estaciones hidrométricas.

Para poder generar los datos del análisis de caudales fue necesario forzar al software RCLindex a que realizara el cálculo de los índices. Esto fue debido a que el programa no tiene como tal un indicador específico para analizar los caudales.

Fue necesario utilizar los datos de aforo como si estos fueran datos de precipitación ya que estos, también se registran como datos puntuales diarios. Además se indicó que los datos de temperatura para este análisis fueran leídos como -99.9.

De esta manera, el software pudo interpretar los datos y generar los índices solicitados.

4.2.1. Estaciones hidrométricas

Se presenta a continuación en las tablas XXI y XXII cada estación analizada para el caudal.

Adicionalmente en las figuras 60 y 61 se muestra la ubicación de cada estación en las correspondientes cuencas bajo estudio.

Tabla XXI. **Estaciones de aforo cuenca del río Naranjo en San Marcos**

Estación	Latitud	Longitud	Elevación msnm	Primer año	Último año
Meléndrez II	-92,0992	14,7096	30	1973	1985
Pajapita	-92,0298	14,7138	75	1971	1981

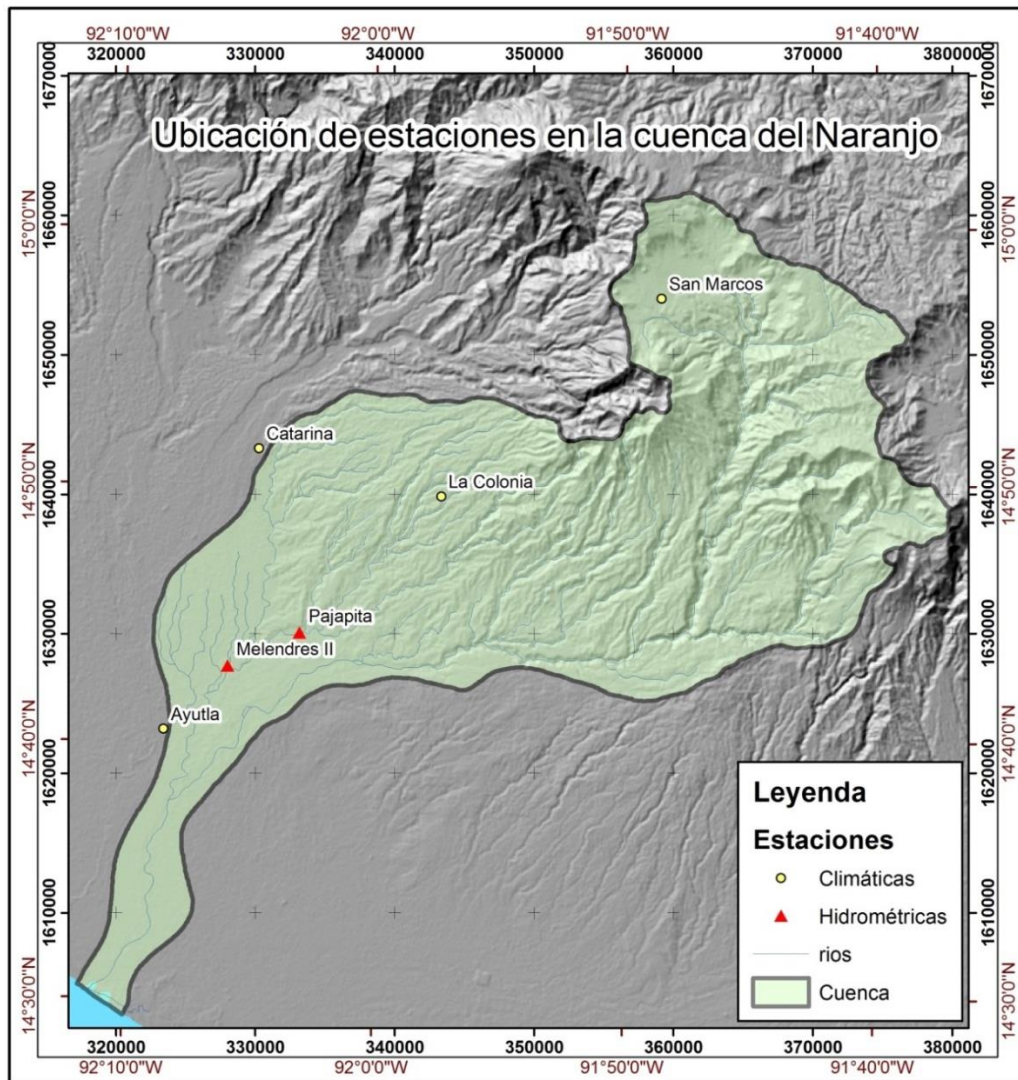
Fuente: elaboración propia, con datos del INSIVUMEH.

Tabla XXII. **Estaciones de aforo en la cuenca del río Grande de Zacapa**

Estación	Latitud	Longitud	Elevación msnm	Primer año	Ultimo año
Camotán	-89,3728	14,8206	450	1969	1981

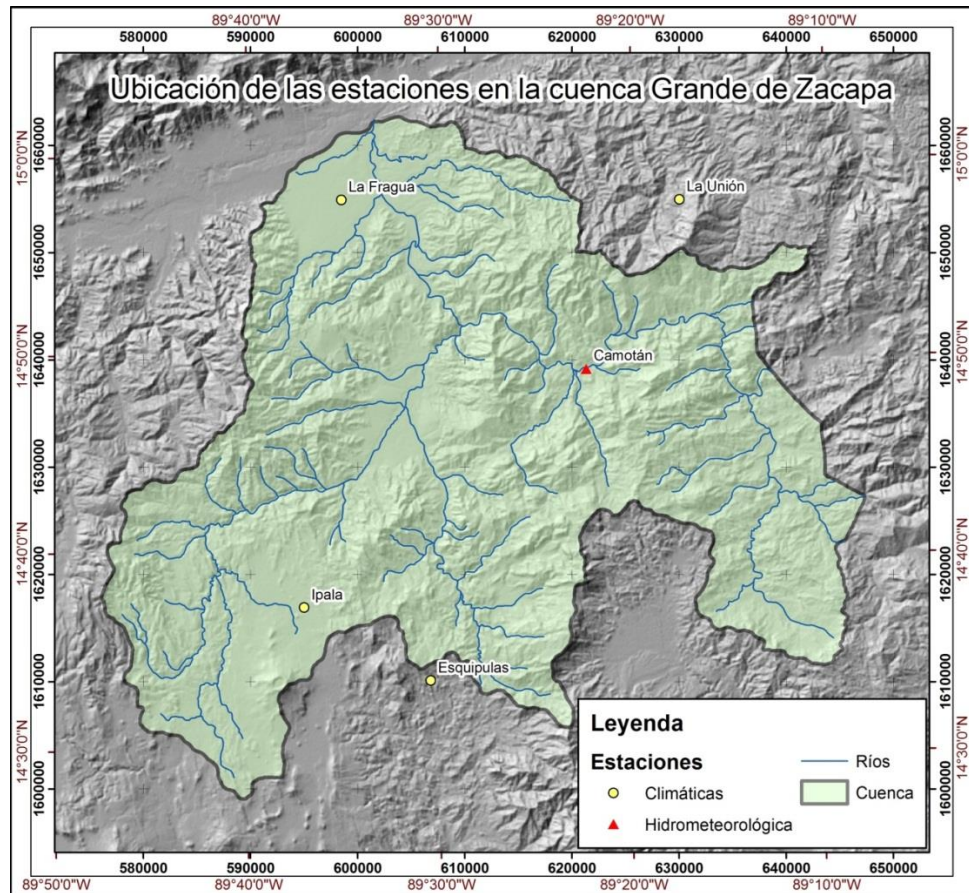
Fuente: elaboración propia, con datos del INSIVUMEH.

Figura 60. **Ubicación de las estaciones hidrométricas en la cuenca del río Naranjo**



Fuente: elaboración propia, con programa Civil 3D.

Figura 61. **Ubicación de la estación hidrométrica en la cuenca del río Grande de Zacapa**



Fuente: elaboración propia, con programa Civil 3D.

4.2.2. Rangos y saltos de tiempo en los datos

El software RClindex permite mostrar a continuación un grupo de gráficas que presentan a lo largo de un período de tiempo los datos de los aforos registrados en las estaciones bajo estudio y cuál ha sido su variación o comportamiento.

En las figuras 62 y 63 se aprecian los datos faltantes como una línea de color rojo de mayor grosor o un círculo también de color rojo.

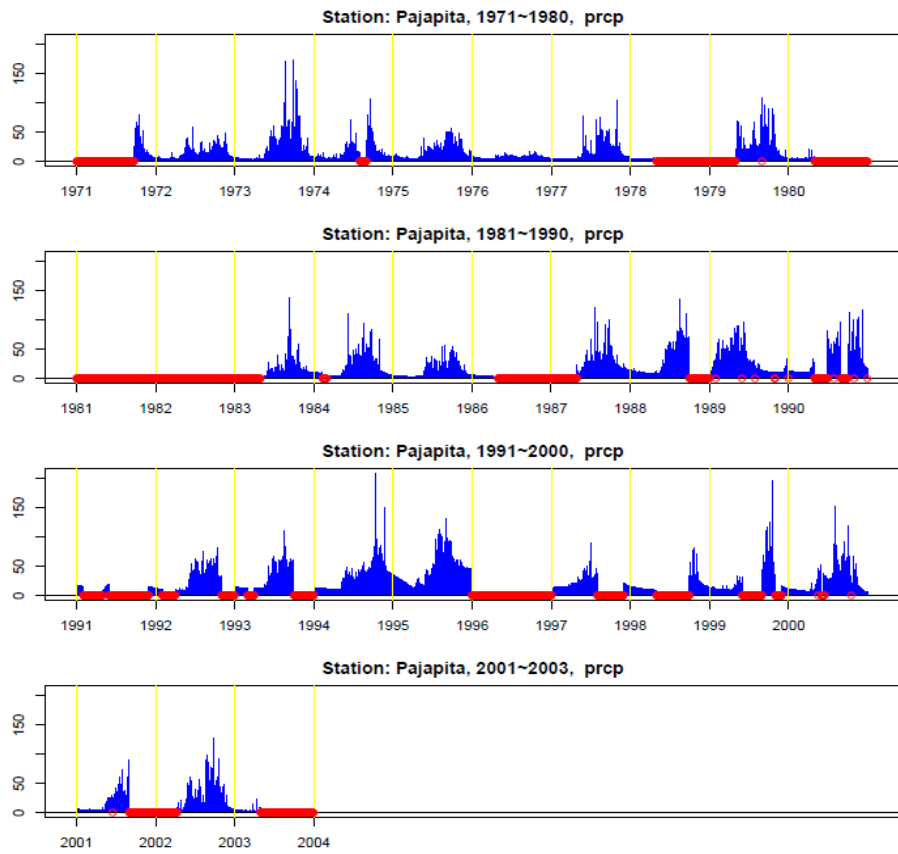
Tales datos, por desperfectos o desactivación de la estación no fueron registrados. Pero han sido suficientes para dar a conocer cuál puede ser una tendencia esperada en el futuro, claro, de manera estadística gracias al programa RClimdex.

En las gráficas se puede ver cómo en el tercer cuarto de cada año, el aforo aumenta su nivel, pues es en esta época la de septiembre y octubre.

En algunos casos se puede observar cómo se dibuja una línea vertical mayor que el resto. Esto indica que el nivel del caudal en ese día específico fue muy elevado, concordando con el análisis de los días de precipitación intensa o R95p como se analizó en el capítulo 3.

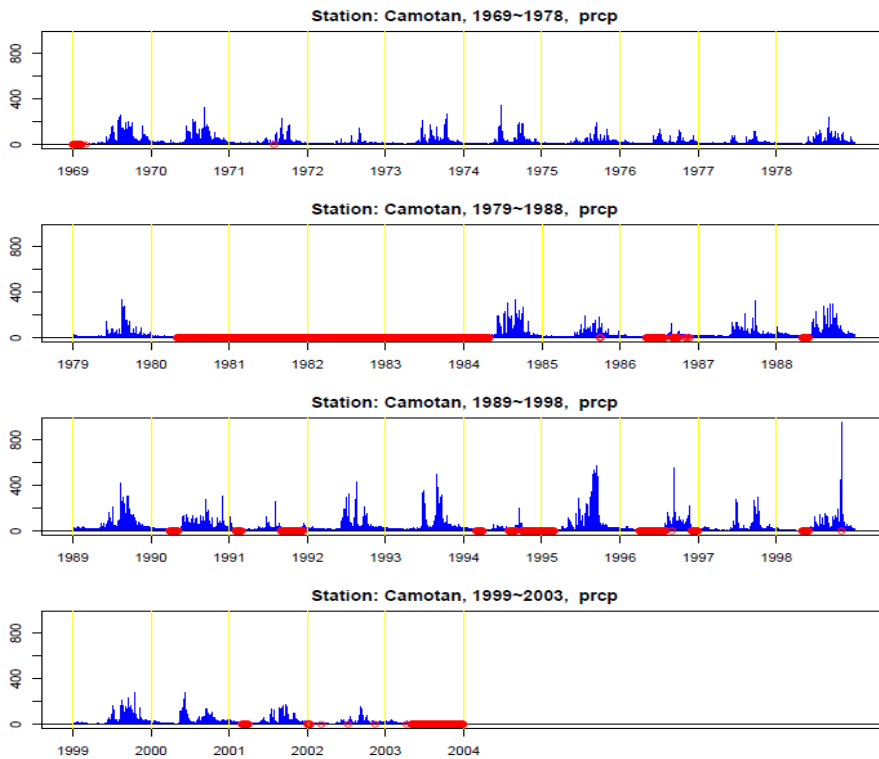
Se puede ver además, en la región que marca el cambio de año, como el valor se aproxima a cero, lo cual indica que los niveles de agua han bajado y es justo durante la época de estiaje que se manifiesta en el país.

Figura 62. Caudal medio anual en estación Pajapita, río Naranjo



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Figura 63. Caudal medio anual en estación Camotán, río Grande de Zacapa



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

4.3. Generación de gráficas y datos

Se estableció el valor del caudal medio anual a partir de los caudales medios diarios mostrados en metros cúbicos por segundo. Cada estación proporcionó un caudal promedio y la gráfica de tendencia o índice de tendencia indica si hay o no un aumento o disminución en el caudal promedio anual como se analiza a continuación.

De igual manera que en capítulos anteriores se mencionó que estas gráficas fueron generadas indicando en el software RClimdex, intervalos de tiempo e indicadores por utilizar.

A modo de ejemplo, se muestran a continuación las gráficas del comportamiento de cada estación analizada y cómo ha variado a través del tiempo.

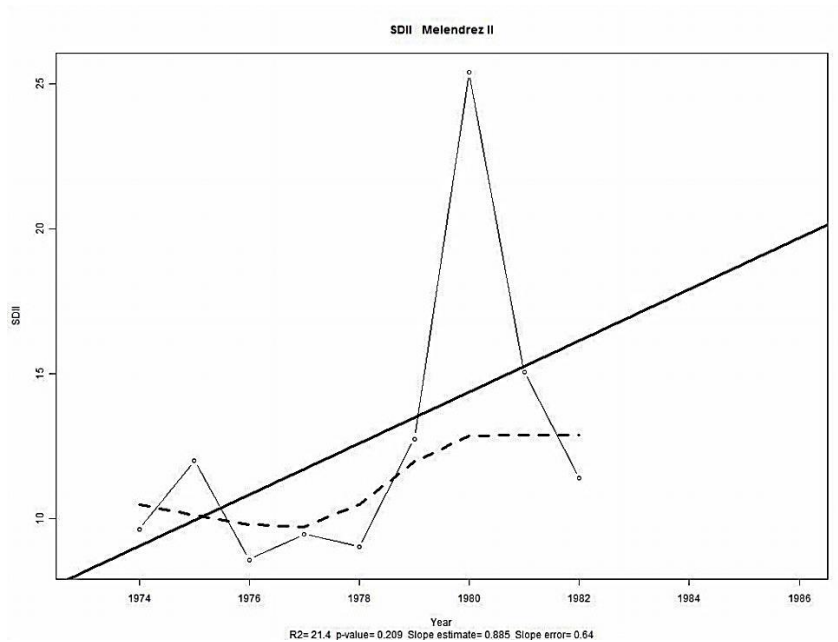
El valor de interés para el análisis, de nuevo es la magnitud de la pendiente de la gráfica obtenida.

En cada gráfica, se presentan las tendencias calculadas a partir de regresión línea de mínimos cuadrados (línea discontinua) y regresión lineal con ponderamientos locales (línea punteada) (ver figuras 64 a 66).

4.3.1. Caudal medio anual en estaciones de aforo en el río Naranjo en San Marcos

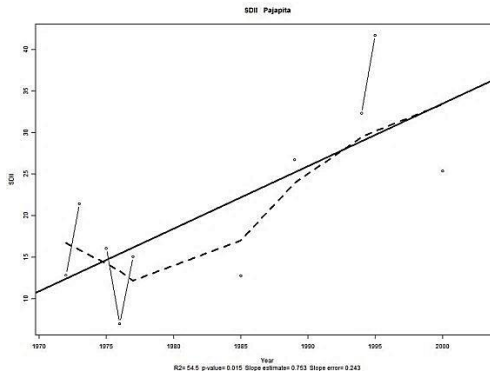
A continuación en la figura 64 se muestra el caudal medio anual en estaciones de aforo en el río Naranjo en San Marcos.

Figura 64. Caudal medio anual en estación Meléndrez II (SDII)



Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex

Figura 65. **Caudal medio anual en estación Pajapita (SDII)**

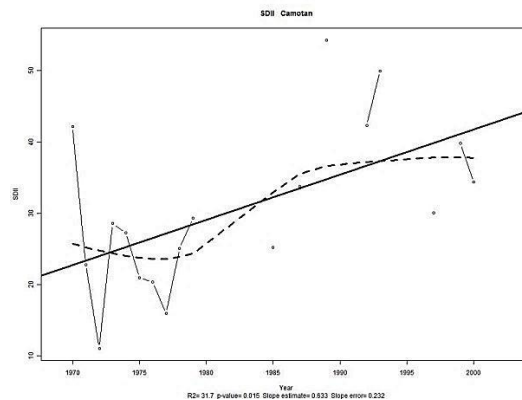


Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

4.3.2. **Caudal medio anual en estación de aforo en el río Grande de Zacapa**

A continuación en la figura 66 se muestra el caudal medio anual en estación de aforo en el río Grande de Zacapa.

Figura 66. **Caudal medio anual en estación Camotán (SDII)**



Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

4.4. Tendencia y resultados del caudal medio anual

A partir de las gráficas generadas por el software RClimdex, se pudo dar una posible proyección a futuro del cambio percibido en el caudal de cada río en las pocas estaciones de las cuales se obtuvo una información consistente.

Las tendencias o cambios notables se resumen en la tabla XXIII a partir del índice SDII.

Tabla XXIII. Resumen de resultados del caudal medio anual diario

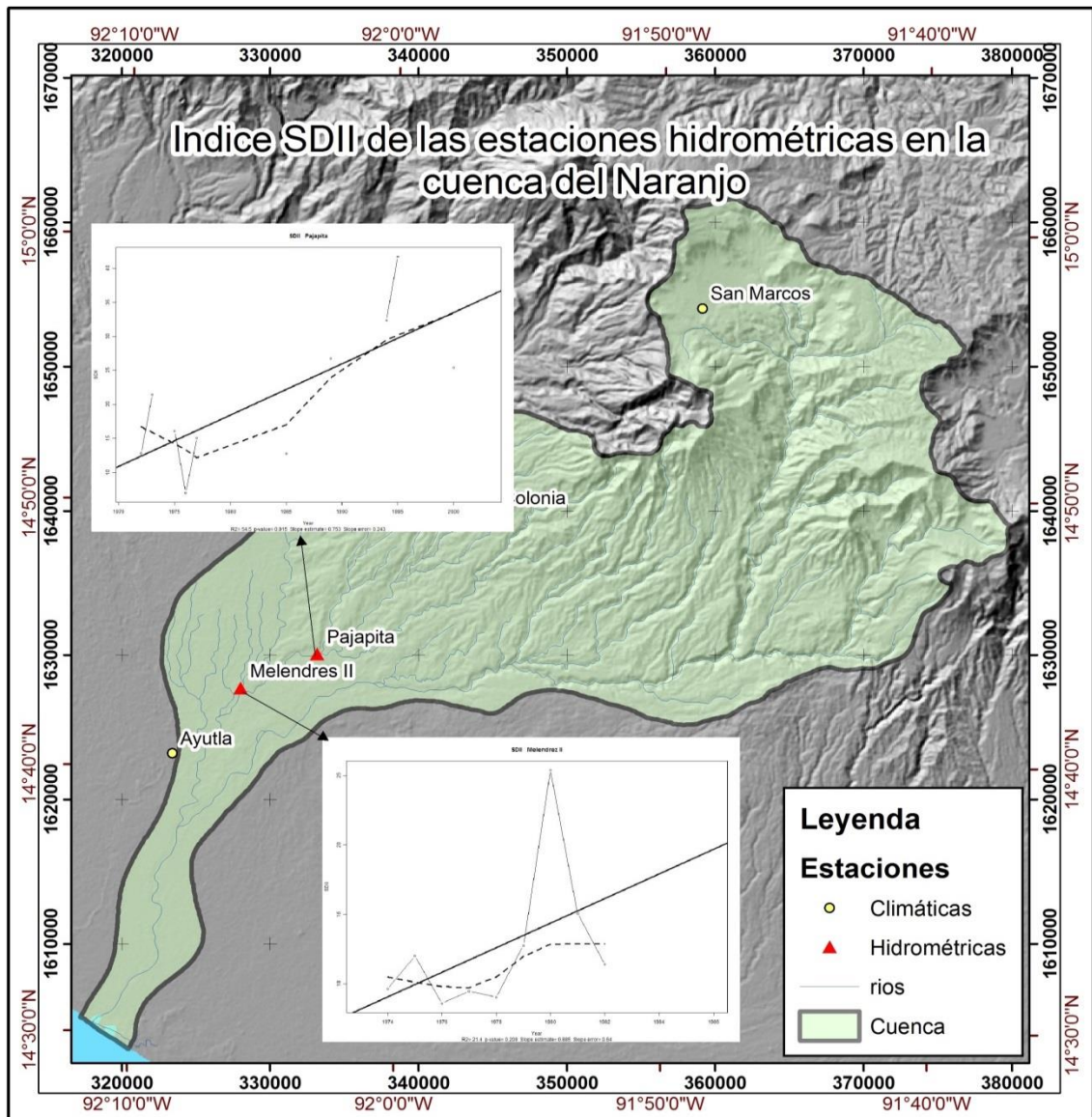
Cuenca	Estación	Caudal medio anual m ³ /año	(S) slope o pendiente en gráfica SDII	Tendencia
Río Naranjo San Marcos	Meléndrez II	25,906	0,885	+
	Pajapita	21,662	0,753	+
Río Grande de Zacapa	Camotán	33,930	0,633	+

Fuente: elaboración propia.

Aunque son muy pocas estaciones se puede apreciar que la tendencia en general de estos aforos es positiva (+). Adicionalmente se incluyen las gráficas de tendencia dentro de cada cuenca para este índice en las figuras 67 y 68.

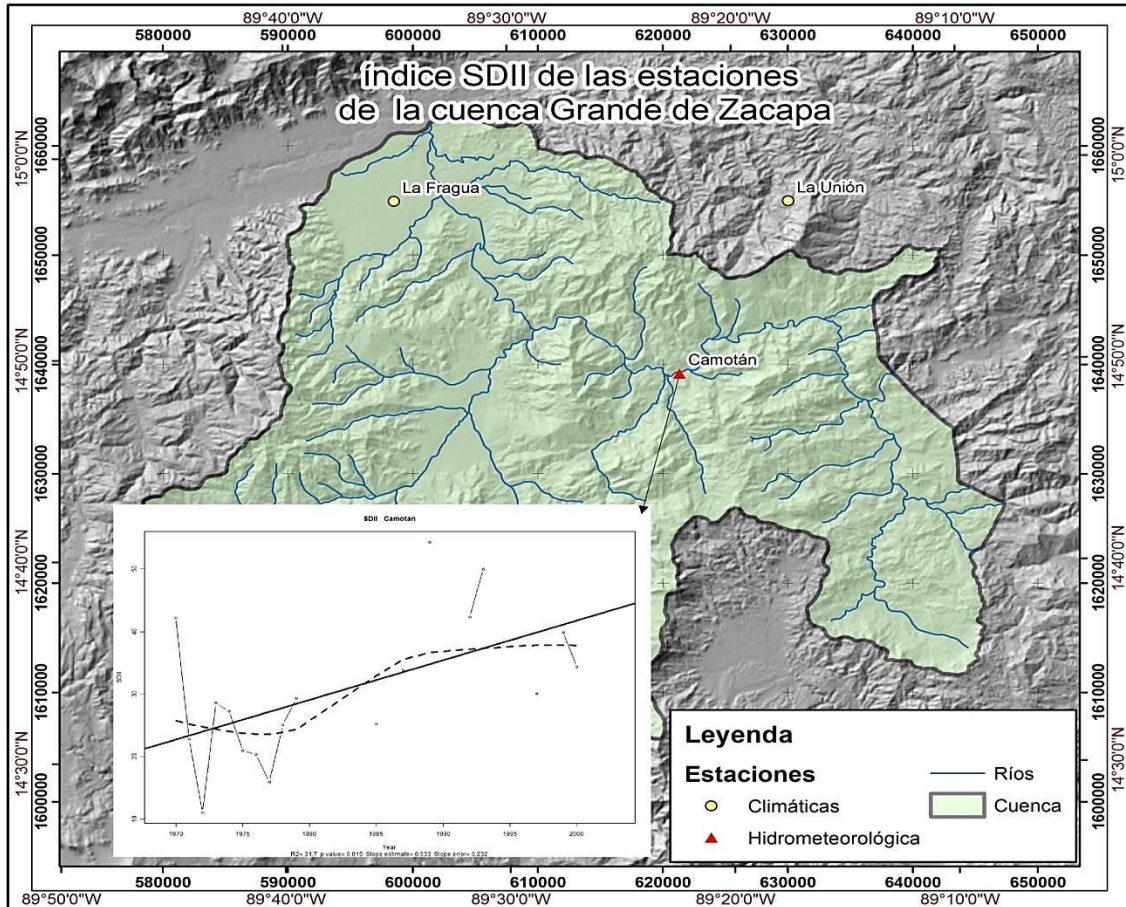
Por otra parte, las gráficas adjuntas en las figuras 67 y 68 muestran que las pendientes tienen una tendencia de crecimiento, lo que permite pensar y asumir que el aporte de los afluentes ha sido de crecimiento, concordando con las suposiciones que se hicieron en el caso de las precipitaciones anuales en las estaciones en las cuales los datos eran insuficientes o mostraban tendencias negativas, esto específicamente en la cuenca del río Naranjo en San Marcos.

Figura 67. Índice SDII o de caudal medio anual en cuenca del río Naranjo



Fuente: elaboración propia, con programa Civil 3D.

Figura 68. Índice SDII o de caudal medio anual en cuenca del río Grande de Zacapa



Fuente: elaboración propia, con programa Civil 3D.

4.5. Índice de caudal intenso

Este índice o indicador, el R95p utilizando datos de aforos, muestra cómo las crecidas son mayores para el percentil 95 en el intervalo de tiempo analizado.

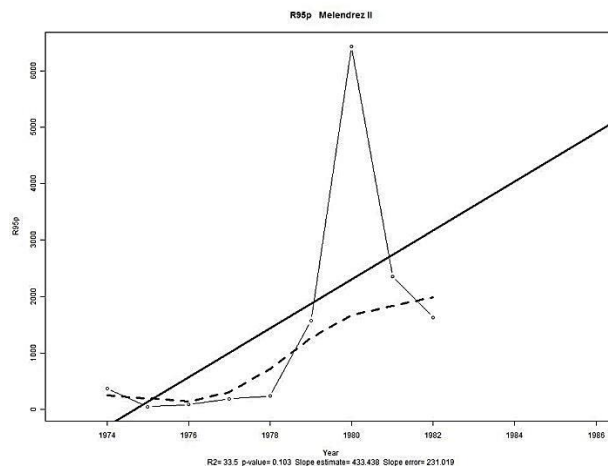
Puede decirse que en las dos cuencas se percibe una tendencia al aumento de los eventos de crecidas de los ríos o al aumento puntual del caudal registrado en las estaciones. La tabla XXIV presenta un resumen de los resultados obtenidos del valor de la pendiente de la gráfica del índice R95p generado por RClimdex. En las gráficas 69 a 71 se muestran las tendencias de las estaciones anteriormente analizadas para los aforos.

Tabla XXIV. **Índice R95p relacionado al caudal intenso o crecidas anuales**

Cuenca	Estación	(S) slope o pendiente en gráfica R95p	Tendencia
Río Naranjo San Marcos	Meléndrez II	433,438	+
	Pajapita	129,411	+
Río Grande de Zacapa	Camotán	117,948	+

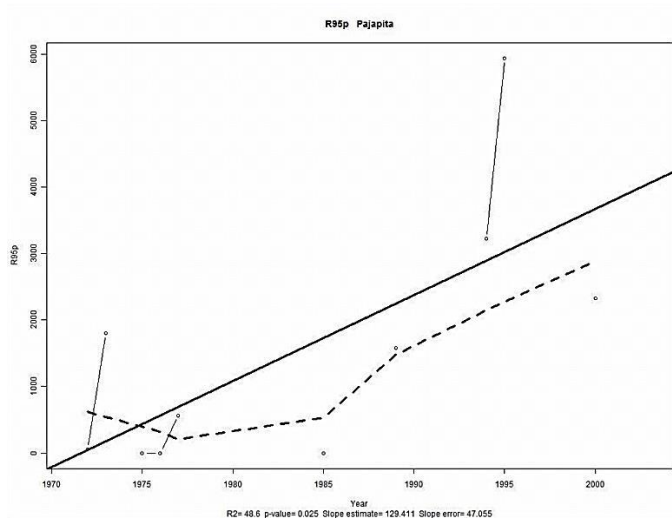
Fuente: elaboración propia.

Figura 69. **Caudal intenso anual en estación Meléndrez II (R95p)**



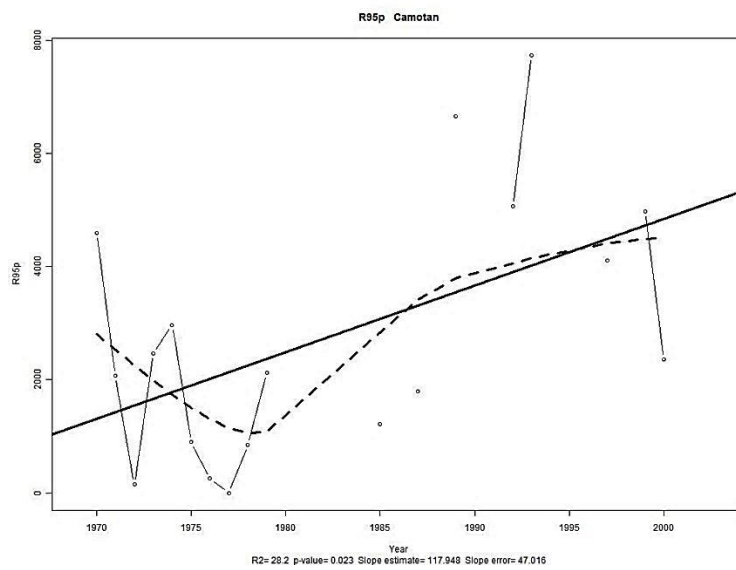
Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

Figura 70. **Caudal intenso anual en estación Pajapita (R95p)**



Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

Figura 71. **Caudal intenso anual en estación Camotán en Zacapa (R95p)**



Fuente: elaboración propia, con programa RClimdex.

Para la cuenca del río Naranjo, se evidencia una tendencia al crecimiento y aunque los datos son escasos se aprecia cómo las crecidas aumentan en la temporada final de cada año, sobre todo en la década de los ochentas y noventas, según la gráfica de la figura 62 y se puede corroborar con las pendientes en las gráficas de las figuras 69 y 70 para las estaciones de Pajapita y Meléndrez II.

La cuenca del río Grande de Zacapa muestra una tendencia de crecimiento en los eventos de las crecidas o caudales intensos principalmente al finalizar la temporada lluviosa además, que se muestra muy marcado el crecimiento en la década de los noventas. Se muestra la figura 71 como la pendiente del índice es positiva o de tendencia positiva (+).

4.6. Comparación de la tendencia de los caudales y de la precipitación

A este punto en el análisis se han proporcionado dos maneras de visualizar cuál es o puede ser la proyección de las lluvias en el futuro. Por tal motivo, se puede hacer una comparación entre estos dos índices, tanto el que relaciona los caudales extremos y el índice que analiza las precipitaciones extremas y determinar así, si hay una relación directa.

A continuación se proporciona en la tabla XXV que resume la variabilidad que a futuro afecta directamente a la precipitación incluyendo los índices de interés en cada estación de aforo.

La generalidad en cada cuenca muestra una preponderante tendencia al aumento de los eventos de precipitación extrema. Se puede observar en la figura cómo en ambas estaciones de aforo en San Marcos, la pendiente de la gráfica va en aumento para el índice R95p o percentil 95. Si se observa ahora

el percentil 95 para precipitaciones, se ve un que el 50 % de las estaciones muestran una tendencia al aumento en el registro de los eventos, tomando siempre en cuenta que la estación de La Colonia esta inactiva y puede dar cabida a que datos no registrados hayan tenido una tendencia al aumento.

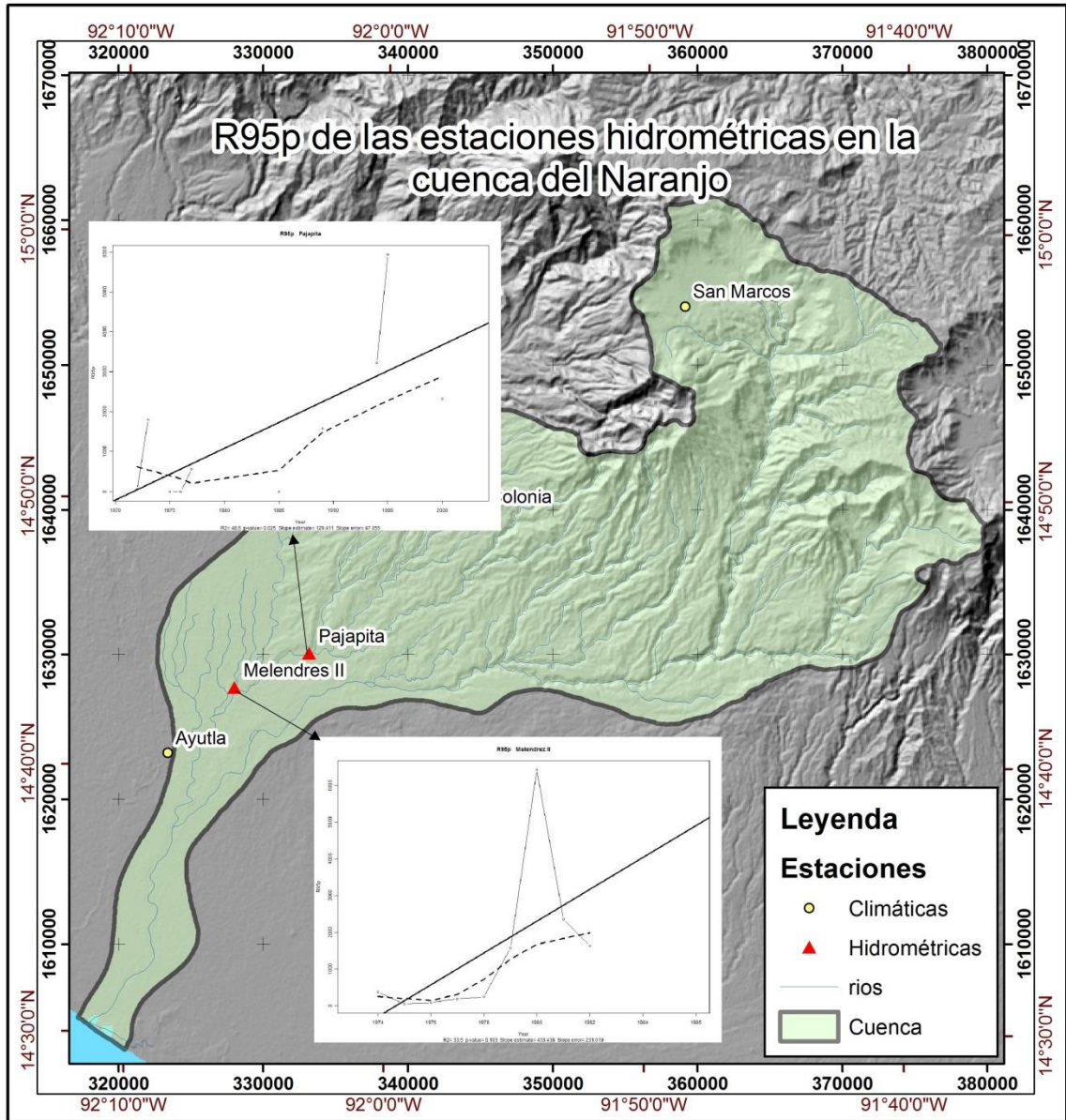
Por otro lado, en la cuenca del río Grande de Zacapa, se ve generalizado el crecimiento en ambos índices para el análisis de lluvia. Puede hacerse de nuevo una comparación en la región estudiada en la figura 72.

Tabla XXV. **Comparación entre eventos de caudales y lluvias intensas**

Cuenca	Estación	Caudales R95p	Tendencia	Estación	Precipitación R95p	Tendencia
Río Naranjo en San Marcos	Meléndrez II	433,438		Ayutla	-19,154	
				Catarina	5.734	
	Pajapita	129,411		La Colonia	-39,489	
				San Marcos	14.457	
Río Grande de Zacapa	Camotán	117,948		Camotán	8.272	
				Esquipulas	2,252	
				Ipala	-2,157	
				La Unión	11.292	
				La Fragua	4.240	

Fuente: elaboración propia.

Figura 72. Índice R95p o de caudales intensos anuales en estación San Marcos



Fuente: elaboración propia, con programa Civil 3D.

CONCLUSIONES

1. Con base en los índices analizados se hizo evidente una tendencia al aumento de los eventos de la precipitación para la cuenca del río Naranjo, los cuales se hacen más notorios en su región norte, aunque en la zona central se manifiestan eventos de disminución, pero esto puede ser debido a la ausencia de datos consistentes en el rango de tiempo analizado. Adicionalmente se ve que los eventos de precipitación intensas indican que anualmente hay una tendencia al aumento.
2. Para la cuenca del río Grande de Zacapa, se observa una tendencia de aumento de los eventos de precipitación en casi toda la zona, excepto al suroeste. Además, es necesario evidenciar que los días en los cuales los eventos de precipitación intensa tienden a aumentar a lo largo de los rangos de tiempo estudiados.
3. Los índices que determinan la variabilidad de la temperatura en las estaciones climáticas analizadas muestran una tendencia general al aumento de la temperatura media anual en la cuenca del río Naranjo en San Marcos, con mayor intensidad en la zona sur de la cuenca, y con menor intensidad a medida que se desplaza el análisis hacia el norte de esta. Aunque no se pudo obtener datos lo suficientemente consistentes de algunas estaciones, otros índices como la presencia de días secos, permitiría asumir que la temperatura va en aumento generalizado.

4. Para la cuenca del río Grande de Zacapa, los índices de temperatura analizados muestran que la tendencia en la mayor parte de las estaciones estudiadas, es de crecimiento, sobre todo en la región noreste de la misma. Puede decirse que en general la presencia de eventos de días calurosos se prolonga cada vez más.
5. La tendencia de los caudales medios anuales y los caudales intensos, para ambas cuencas bajo estudio muestran una definitiva tendencia al aumento. Se hace más evidente al finalizar la época de lluvia en el país, los gráficos muestran eventos puntuales más intensos para septiembre y octubre.
6. Aunque se contó con pocas estaciones hidrométricas que carecían de suficientes datos, estos permiten apreciar que existe eventos de crecidas con mayor frecuencia y este hecho concuerda con los índices de precipitaciones que a su vez eran en general de aumento. Las zonas en las cuales no se pudo establecer un índice de precipitación o no hubo datos suficientes, podría dar la pauta a pensar que son de aumento, ya que esos datos coincidirían con los valores caudales que van en aumento.

RECOMENDACIONES

1. Para determinar a futuro tendencias más exactas a nivel nacional, es necesario reactivar las estaciones que han cesado con la recolección de datos. Así, el Insivumeh podrá ofrecer a los profesionales interesados en este tema, mayor información para su análisis y así comprender de mejor manera las tendencias del clima en el país.
2. Es necesario, a través de las instituciones ya sea estatales o privadas que las estaciones climáticas e hidrológicas, localizadas en las cuencas de todo el país, sean atendidas con mayor cuidado, y darles el mantenimiento que requieren para poder trabajar constantemente.
3. La Facultad de Ingeniería, con el apoyo de la Escuela de Ingeniería Civil y el Insivumeh, pueden trabajar en conjunto para hacer actualizaciones constantes de los datos históricos de eventos climáticos e hidrológicos. Esto con el fin de proporcionar un campo de estudio más amplio para los profesionales de la ingeniería a largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA

1. BENAVIDES BALLESTEROS, Henry Oswaldo; LEÓN ARISTIZABAL, Gloria Esperanza. *Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*. Guatemala: INSIVUMEH-Ideam. Subdirección de Meteorología, 2007. 102 p.
2. *Climate Research Branch Environment Canada Downs view: Manual del Usuario RCLimDex (1.0)*. Canadá: CIIVEN, 2004. 22 p.
3. FERNÁNDEZ CARRASCO, Pedro. *Estudio del impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos: Aplicación en diecinueve pequeñas cuencas en España*. Tesis Doctoral. España: Universidad Politécnica de Madrid, 2002. 267 p.
4. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). *Cambio Climático 2001, Informe de Síntesis. Tercer Informe de Evaluación*. Ginebra: IPCC, 2001. 161 p.
5. _____. OMM; PNUMA. *Cuarto Informe de Evaluación Sobre el Cambio Climático*. Ginebra, Suiza: PNUMA, 2007. 114 p.
6. Instituto Geográfico Nacional. Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas. *Estudio morfométrico de la cuenca del río Naranjo, San Marcos*. Guatemala: IGN, Departamento de Agua Superficial, División de Investigación de Recursos de Agua, 1975. 36 p.

7. Instituto Nacional de Estadística. *Estimaciones de la población total por municipio. Período 2008-2020. Guatemala*. [en línea] Organismo Judicial de Guatemala <<http://www.oj.gob.gt/estadisticaj/files/población-total-por-municipio1.pdf>>. [Consulta: 15 de septiembre de 2013]
8. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. *Registros históricos de Guatemala: 1969 a 2011*. Guatemala: INSIVUMEH, 2011. 100 p.
9. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. *Recursos hídricos de Guatemala* [en línea] MAGA <<http://www.infoiarna.org.gt/guateagua/Subtemas/>> cuencas hidrográficas. [Consulta: 10 de mayo de 2013]
10. _____. *Gran atlas de las cuencas hidrológicas de Guatemala*. Guatemala: MAGA, 2007. 178 p.
11. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Primera Comunicación Sobre Cambio Climático*. Guatemala: MARN, 2001. 124 p.
12. Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. Dirección General de Caminos. [en línea] Caminos Red Vial de la República de Guatemala, <<http://www.caminos.gob.gt/documentos/RedVialRegistrada/>> Red Vial de la República de Guatemala 2013. [Consulta:15 de septiembre de 2013]
13. WILLIAMS, G.E. *Possible relation between periodic glaciation and the flexure of the Galaxy*. *Earth Planet. Sci. Lett*, 1975. Vol.26, 576 p.