

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

ÁREA INTEGRADA



TRABAJO DE GRADUACIÓN

**VALIDACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO CON BASE EN EL MODELO
CMIP5 Y EL ESCENARIO DE EMISIONES RCP 8.5 PARA LA VERTIENTE DEL PACÍFICO
DE GUATEMALA PARA LOS PERIODOS 2001 AL 2013**

MELVIN ESTUARDO NAVARRO GONZÁLEZ

GUATEMALA, SEPTIEMBRE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

ÁREA INTEGRADA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

**VALIDACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO CON BASE EN EL MODELO
CMIP5 Y EL ESCENARIO DE EMISIONES RCP 8.5 PARA LA VERTIENTE DEL PACÍFICO
DE GUATEMALA PARA LOS PERIODOS 2001 AL 2013**

**PRESENTADO A LA HONORABLE JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA
DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

POR

MELVIN ESTUARDO NAVARRO GONZÁLEZ

**EN EL ACTO DE INVESTIDURA COMO
INGENIERO AGRÓNOMO EN**

RECURSOS NATURALES RENOVABLES

EN EL GRADO ACADÉMICO DE

LICENCIADO

GUATEMALA, SEPTIEMBRE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

RECTOR

Dr. Carlos Guillermo Alvarado Cerezo

JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA

DECANO	Dr. Tomás Padilla Cambara
VOCAL PRIMERO	Dr. Tomás Padilla Cambara
VOCAL SEGUNDO	Ing. Agr. M.Sc. Cesar Linneo García Contreras
VOCAL TERCERO	Ing. Agr. M.Sc. Erberto Raúl Alfaro Ortiz
VOCAL CUARTO	P. Agr. Josué Benjamín Boche López
VOCAL QUINTO	Br. Rut Raquel Curruchich Cúmez
SECRETARIO	Ing. Agr. Juan Alberto Herrera Ardón

GUATEMALA, SEPTIEMBRE 2015

Guatemala, septiembre de 2015

Honorable Junta Directiva
Honorable Tribunal Examinador
Facultad de Agronomía
Universidad de San Carlos de Guatemala

Honorables miembros:

De conformidad con las normas establecidas por la Ley Orgánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, tengo el honor de someter a vuestra consideración el Trabajo de Graduación **“VALIDACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO CON BASE EN EL MODELO CMIP5 Y EL ESCENARIO DE EMISIONES RCP 8.5 PARA LA VERTIENTE DEL PACIFICO DE GUATEMALA PARA LOS PERIODOS 2001 AL 2013”** como requisito previo a optar al título de Ingeniero Agrónomo en Recursos Naturales Renovables, en el grado académico de Licenciado

Esperando que el mismo llene los requisitos necesarios para su aprobación, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Melvin Estuardo Navarro González

TRABAJO DE GRADUACIÓN QUE DEDICO:

A:

DIOS

Supremo Creador del universo, porque sin el nada soy en esta vida, porque de El emana toda la sabiduría y el entendimiento, porque siempre ha tenido un propósito para mi vida y hoy lo veo consumado con mucha felicidad.

“Confía de todo corazón en El Señor y no en tu propia inteligencia” Prov. 3:5

MIS PADRES

Ing. Agr. Melvin Osbelí Navarro Fuentes y MEPU. Silvia Judith González de Navarro, por todo el apoyo incondicional que me brindaron todos estos años y sobre todo por darme la vida, por creer en mí y por hacer de mi un hombre de bien, temeroso de Dios y con claros principios y valores, ustedes son mi mayor tesoro en esta vida.

MIS HERMANAS

Claudia, Silvia y Ana Lucía, por compartir conmigo este momento de mucha alegría y satisfacción, por estar incondicionalmente para mí siempre, ojalá este sea un ejemplo para ustedes que las anime a luchar por todo lo que se propongan en la vida. Las amo con todo mi corazón.

MI NOVIA

Mónica Michelle Ajanel muchas gracias por tu apoyo incondicional todo este tiempo, por haber llegado a mi vida en el momento preciso, gracias por ser el ángel que Dios utiliza para guiar mi camino, Te Amo con todo mi corazón.

MI GUATEMALA

País de la eterna primavera, dulce patria mía hoy vengo a honrarte y dedicarte este logro con mucho orgullo y felicidad.

MIS SERES QUERIDOS

Por estar presentes este día compartiendo esta felicidad a mi lado.

AGRADECIMIENTOS

A Dios: Mi Guía, mi fortaleza y mi sustento en toda mi vida.

A Mis padres: por su apoyo incondicional y sus consejos, los amo con todo mi corazón.

A mi querida Facultad de Agronomía: por formarme y brindarme los conocimientos en mi carrera profesional, fue un honor haber estado por tus aulas mi querida casa de estudios.

A mis asesores: Dr. Marco Tulio Aceituno, Dr. Marvin Salguero, Ing. Agr. Alfredo Suárez, por su confianza y apoyo a la realización de este documento, mi más sincero agradecimiento.

A todos mis catedráticos por brindarme y compartir su conocimiento en todo momento.

A mi grupo de amigos Ana, Claudia, Diego y Mariano, por compartir conmigo momentos maravillosos e inolvidables que vivimos en cada curso, en cada laboratorio, en cada momento dentro de nuestra querida facultad, muchas gracias por formar parte de mi vida, todos son muy especiales para mí.

A Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático por darme la oportunidad de realizar mi EPS en tan prestigiosa institución, por todo el apoyo brindado todo este tiempo, agradezco especialmente al programa de Investigación en Clima e Hidrología: Ing. Agr. Alfredo Suárez (Coordinador), P. Agr. Carlos Ramírez (Técnico de clima), Lic. Sergio Gil Villalba (Especialista en hidrología), Ing. Agr. Elmer Orrego (Investigador). También a Ing. Agr. Luis Enrique Reyes (Coordinador programa MIC) por apoyarme en mi formación académica y profesional, y a todo el equipo maravilloso de personas que conforman ICC muchas gracias por su apoyo.

A INSIVUMEH e INDE, por el apoyo brindado a esta investigación.

ÍNDICE

CONTENIDO	PÁGINA
1 CAPITULO I. DIAGNOSTICO DEL PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN EN CLIMA E HIDROLOGÍA, INSTITUTO PRIVADO DE INVESTIGACIÓN SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO, SANTA LUCÍA COTZUMALGUAPA, ESCUINTLA, GUATEMALA, C.A.....	1
1.1 PRESENTACIÓN	2
1.2 MARCO CONCEPTUAL	3
1.2.1 Ubicación	3
1.2.2 Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático –ICC-	3
1.2.3 Programas del Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático	5
1.3 OBJETIVOS	11
1.3.1 Objetivo General.....	11
1.3.2 Objetivos específicos.....	11
1.4 METODOLOGÍA.....	12
1.4.1 Principales áreas de trabajo del programa de Clima e Hidrología.	12
1.4.2 Evaluación del plan estratégico contra POA's 2011 a 2013	12
1.5 RESULTADOS	13
1.5.1 Principales áreas de trabajo del programa de Clima e Hidrología	13
1.5.2 Evaluación del Plan estratégico en función de POA's de 2011 a 2013	14
1.6 CONCLUSIONES	34
1.7 RECOMENDACIONES.....	35
1.8 BIBLIOGRAFIA	36
2 CAPÍTULO II. VALIDACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO CON BASE EN EL MODELO CMIP5 Y EL ESCENARIO DE EMISIONES RCP 8.5 PARA LA VERTIENTE DEL PACÍFICO DE GUATEMALA PARA LOS PERÍODOS 2001 A 2013	37
2.1 PRESENTACIÓN	38
2.2 MARCO CONCEPTUAL	40
2.2.1 Climatología.....	40
2.2.2 Meteorología.....	40
2.2.3 El clima y sistema climático	40
2.2.4 Elementos del clima.....	42
2.2.5 Cambio Climático.....	44
2.2.6 Gases de Efecto Invernadero	44
2.2.7 Política Nacional de Cambio Climático.....	45
2.2.8 Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático.....	45
2.2.9 Modelación del cambio climático.....	45
2.2.10 ¿Qué es un modelo climático?	46
2.2.11 Modelo CMIP5.....	47

CONTENIDO	PÁGINA
2.2.12 Escenarios de cambio climático	49
2.2.13 Escenarios RCP 8.5	52
2.2.14 Modelos de Circulación General	52
2.2.15 Modelo Climático Regional (MCR)	53
2.2.16 Reducción de escala (Down-scaling)	54
2.3 Marco referencial	55
2.3.1 República de Guatemala	55
2.3.2 Estudios sobre escenarios de cambio climático para Guatemala	55
2.3.3 Vertiente del Pacífico de Guatemala	57
2.3.4 Guatemala y su clima	57
2.4 OBJETIVOS.....	60
2.4.1 General	60
2.4.2 Específicos.....	60
2.5 METODOLOGÍA	61
2.5.1 Validación de escenarios de cambio climático	61
2.5.2 Determinación del grado de incertidumbre de los modelos utilizados.	78
2.6 RESULTADOS.....	80
2.6.1 Validación de escenarios de cambio climático	80
2.6.2 Determinación del grado de incertidumbre de los escenarios de Cambio Climático. .	98
2.7 CONCLUSIONES	101
2.8 RECOMENDACIONES	102
2.9 BIBLIOGRAFÍA	103
3 CAPITULO III. INFORME DE SERVICIOS PRESTADOS AL PROGRAMA DE CLIMA E HIDROLOGÍA DEL INSTITUTO PRIVADO DE INVESTIGACIÓN SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO, SANTA LUCÍA COTZUMALGUAPA, ESCUINTLA, GUATEMALA C.A.....	106
3.1 SERVICIO 1. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA CAÑA DE AZÚCAR.	107
3.1.1 Presentación	107
3.1.2 Objetivos:	108
3.1.3 Metodología	109
3.1.4 Resultados	113
3.1.5 Conclusiones	123
3.1.6 Recomendaciones	124
3.1.7 Bibliografía	125
3.2 SERVICIO 2. BASE DE DATOS OFICIAL DEL ICC	126
3.2.1 Introducción	126

CONTENIDO**PÁGINA**

3.2.2	Objetivos.....	127
3.2.3	Metodología.....	128
3.2.4	Resultados.....	129
3.2.5	Conclusiones.....	134
3.2.6	Recomendaciones.....	134
3.2.7	Bibliografía.....	134

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Mapa de ubicación Finca Camantulul.....	4
Figura 2	Estructura organizacional del ICC.....	6
Figura 3	Visión esquemática de los componentes del sistema climático mundial.....	42
Figura 4	Relación del CMIP5 con otras organizaciones.....	48
Figura 5	Representación del enfoque de anidamiento del Modelo Climático Regional.....	54
Figura 6	Localización geográfica de Guatemala.....	55
Figura 7	Red de estaciones meteorológicas administradas por INSIVUMEH.....	58
Figura 8	Red de estaciones meteorológicas administradas por el ICC.....	59
Figura 9	Representación gráfica de la opción herramientas de multidimensión.....	63
Figura 10	Creación de una capa raster NetCDF a partir de un archivo en formato NetCDF.....	64
Figura 11	Archivo en formato raster generado a partir del formato NetCDF.....	65
Figura 12	Opciones para convertir un archivo raster NetCDF a formato raster.....	66
Figura 13	Representación de las opciones para convertir un archivo raster NetCDF a raster.....	67
Figura 14	Representación de la forma en que se puede seleccionar el mes a trabajar.....	68
Figura 15	Opciones que se encuentran de la barra de georreferenciación.....	68
Figura 16	Herramienta utilizada para georreferenciar el raster en base al shape de referencia.....	69
Figura 17	Archivo raster a ser georreferenciado en base a shape con coordenadas definidas.....	70
Figura 18	Barra de herramientas para georreferenciar un ráster.....	70
Figura 19	Opciones disponibles dentro de la barra de georreferenciación.....	71
Figura 20	Resultado final del proceso de georreferenciación.....	72
Figura 21	Estaciones meteorológicas utilizadas para el proceso de validación.....	73
Figura 22	Herramienta utilizada para la extracción de los valores de las variables de interés.....	74
Figura 23	Tabla de atributos que muestra los valores obtenidos.....	75
Figura 24	Opción utilizada para exportar la tabla de atributos de ArcGis a Microsoft Excel.....	76
Figura 25	formato utilizado para exportar los datos desde ArcGis.....	77
Figura 26	Tabla final para la realización de análisis estadísticos.....	77
Figura 27	Comparación de resultados obtenidos temperatura media.....	80

CONTENIDO**PAGINA**

Figura 28 Resultados de correlación obtenidos para la variable de temperatura media.....	81
Figura 29 Distribución de regiones para temperatura media utilizadas para la validación.....	85
Figura 30 Comparación de temperatura estimada con la temperatura real por cada región.	86
Figura 31 Correlación de resultados obtenidos a nivel de regiones para temperatura media.....	87
Figura 32 Comparación visual de resultados obtenidos para la variable de precipitación.	90
Figura 33 Resultados de correlación obtenidos para la variable de precipitación.....	90
Figura 34 Días del año con lluvia mayor a 40 mm, ciudad Guatemala período 1970-2003.....	92
Figura 35 Distribución de regiones para precipitación utilizadas para la validación.....	94
Figura 36 Comparación de precipitación estimada con precipitación real por región.	95
Figura 37 Correlación de resultados obtenidos a nivel de regiones para precipitación.....	96
Figura 38 Ubicación de la Vertiente del Pacífico en la capa georreferenciada.....	110
Figura 39 Herramienta utilizada para la extracción de valores de precipitación.....	111
Figura 40 Resultado de la extracción de valores de precipitación en la Vertiente del Pacífico.....	111
Figura 41 Herramienta utilizada para la reclasificación.	112
Figura 42 Resultado obtenido del proceso de reclasificación.....	112
Figura 43 Escenario futuro para la variable de temperatura media año 2040.....	115
Figura 44 Escenario futuro para la variable de precipitación año 2040.....	117
Figura 45 Área potencial de la caña de azúcar para el año 2040.....	118
Figura 46 Escenario futuro para la variable de temperatura año 2070.....	119
Figura 47 Escenario futuro para la variable de precipitación año 2070.....	120
Figura 48 Área potencial de la caña de azúcar para el año 2070.....	121
Figura 49 Estructura utilizada para el ordenamiento de la base de datos.	129
Figura 50 Resultado final de la tabla resumen generada para cada variable.....	132

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1 Evaluación de actividades del POA 2011, según objetivo número 1.....	17
Cuadro 2 Evaluación de actividades del POA 2011, según objetivo número 2.....	20
Cuadro 3 Evaluación de actividades del POA 2011, según objetivo número 3.....	21
Cuadro 4 Evaluación de actividades del POA 2012, en función del objetivo 1.....	25
Cuadro 5 Evaluación de actividades del POA 2012, en función del objetivo 2.....	28
Cuadro 6 Evaluación de actividades del POA 2013, en función del objetivo 1.....	31
Cuadro 7 Descripción de las familias de escenarios.....	50
Cuadro 8 Prueba t para la variable de temperatura media.....	82
Cuadro 9 Resumen de pruebas de t para las regiones de temperatura media.....	88
Cuadro 10 Prueba t para la variable de precipitación.....	91
Cuadro 11 Resumen de pruebas de t para las regiones de precipitación.....	97
Cuadro 12 Incertidumbre de los escenarios de cambio climático para temperatura media.....	98
Cuadro 13 Incertidumbre de los escenarios de cambio climático para precipitación.....	99
Cuadro 14 Características climáticas en la zona cañera.....	115
Cuadro 15 Tabla dinámica generada para resumen de resultados de la base de datos.....	130
Cuadro 16 Formato utilizado para la generación del resumen en función de cada variable.....	131

VALIDACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO CON BASE EN EL MODELO CMIP5 Y EL ESCENARIO DE EMISIONES RCP 8.5 PARA LA VERTIENTE DEL PACIFICO DE GUATEMALA PARA LOS PERIODOS 2001 AL 2013

RESUMEN

El siguiente trabajo de graduación se realizó como parte del Ejercicio Profesional Supervisado de Agronomía –EPSA- durante los meses de febrero a noviembre del año 2014, en el Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático –ICC-, Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla, Guatemala. C.A.

El capítulo I se enfoca en la realización de un diagnóstico del programa de Investigación en Clima e Hidrología. Este diagnóstico contempló la recopilación de información primaria y secundaria con la finalidad de conocer las principales áreas de trabajo del programa, así mismo para determinar el grado de cumplimiento de cada una de las actividades llevadas a cabo durante el periodo comprendido en los años 2011 a 2013. Estas actividades fueron evaluadas en función de los Planes Operativos Anuales (2011 a 2013) para posteriormente ser comparadas con cada una de las líneas de trabajo del plan estratégico del Instituto.

El Capítulo II contempla la realización de la investigación, en la cual se validaron las proyecciones de los escenarios de cambio climático planteados por la Universidad Nebraska-Lincoln (UNL) para Guatemala, así mismo se determinó el grado de incertidumbre de estas proyecciones para que tener una mejor certeza de las mediciones que estos realizan. Las variables de interés para la validación fueron temperatura media y precipitación. El área de estudio fue la Vertiente del Pacífico de Guatemala, por ser la principal área de influencia del instituto (ICC) y por ser una zona altamente productiva para el país.

Para el proceso de validación se usaron los archivos de salida generados por la UNL para los periodos 2001 a 2013, en estos archivos se encuentran los valores de temperatura media y precipitación por mes. También se dispuso de los registros históricos de las estaciones meteorológicas del Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC), Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) y del Instituto Nacional de Electrificación (INDE), las cuales se encuentran distribuidas en la mayor parte de la Vertiente del Pacífico.

Se llevó a cabo la construcción de una tabla con un dato observado (a partir de los archivos de salida generados por la UNL) y un dato real (dato obtenido de los registros históricos de las estaciones meteorológicas) los cuales fueron la base para la realización de los respectivos análisis estadísticos para validar las proyecciones de los escenarios y así mismo conocer el grado de incertidumbre de estos.

Los resultados demuestran que para la variable de temperatura media, las proyecciones de los escenarios son muy acertadas a tal punto que únicamente presentan un 17% de incertidumbre en sus proyecciones. Para la variable de precipitación las proyecciones de los escenarios parecen no ser tan acertadas debido a que los análisis estadísticos demuestran que presentan un grado de incertidumbre del 63%.

Es importante mencionar que la escala temporal de los escenarios de cambio climático tiene mucho que ver en las predicciones que estos tengan debido a que el análisis también se realizó a nivel de regiones (a nivel más local) en el cual se aprecia que al reducir el área de estudio los escenarios de cambio climático varían en sus predicciones y el grado de incertidumbre aumenta, por lo que es aconsejable utilizarlos únicamente a una escala más global (Nivel de vertientes o de país).

Por último en el capítulo III se presentan los resultados de los servicios prestados al programa, en el cual uno de los más importantes fue la realización de los posibles escenarios climáticos para el cultivo de la caña de azúcar a los años 2040 y 2070 en las variables de temperatura media y precipitación.

**1 CAPITULO I. DIAGNÓSTICO DEL PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN EN CLIMA E
HIDROLOGÍA, INSTITUTO PRIVADO DE INVESTIGACIÓN SOBRE CAMBIO
CLIMÁTICO, SANTA LUCÍA COTZUMALGUAPA, ESCUINTLA, GUATEMALA, C.A.**

1.1 PRESENTACIÓN

El cambio climático es un tema de suma importancia en la actualidad debido a los efectos a largo plazo que este produce en el sistema terrestre. Existen varios factores que indican que el clima en la tierra ha venido cambiando, uno de los más importantes es debido a la variación de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI), aerosoles en la atmósfera, las variaciones de la cubierta terrestre y de la radiación solar, que alteran el equilibrio energético del sistema climático (IPCC, 2008).

Ante esta situación y tomando en cuenta que Guatemala es un país altamente vulnerable a los efectos que el cambio climático pueda ocasionar, fue fundado el Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático –ICC- en el año 2010, con el objetivo de contribuir al diseño de estrategias que contribuyan a la reducción de la vulnerabilidad, mitigación y adaptación al cambio climático, especialmente en comunidades, sistemas productivos e infraestructura de la región de la Vertiente del Pacífico especialmente en la zona de influencia de los ingenios que integran la Asociación de Azucareros de Guatemala (AZASGUA).

Para lograr el cumplimiento de este objetivo se crearon 5 programas de los cuales, dos son de ellos enfocados en investigación (Programa de Clima e Hidrología y Programa de Sostenibilidad de Sistemas Productivos), mientras que otros dos son los encargados de implementar y promover acciones a nivel de campo (Programa de Manejo Integrado de Cuencas y Programa de Gestión de Riesgos de Desastres) mientras que el quinto programa (Desarrollo de Capacidades y Divulgación), coordina acciones encaminadas a preparar a actores clave y la población en general para enfrentar el cambio climático.

Mediante la realización del presente diagnóstico enfocado al Programa de Investigación en Clima e Hidrología, como primer punto se identificaron las principales líneas de trabajo del programa para posteriormente evaluar en función del Plan estratégico y POA's de los años 2011 a 2013, el cumplimiento de cada una de las actividades específicas desarrolladas para cada línea de trabajo del programa. Es importante mencionar a pesar de todo que las actividades formales de cada programa fueron iniciadas hasta el año 2012 según consulta a miembros del equipo que conforman ICC.

1.2 MARCO CONCEPTUAL

1.2.1 Ubicación

El Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático –ICC- se encuentra ubicado en la finca Camantulul, Santa Lucía Cotzumalguapa, km 92.5 carretera a Mazatenango, anexo en las oficinas de Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar (CENGICAÑA), Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla.

El municipio de Santa Lucía Cotzumalguapa tiene una extensión territorial de 432 Km² y una elevación media de 356 metros sobre el nivel del mar. La distancia a la cabecera departamental es 34 Km., y a la ciudad capital es 90 Km, ubicándose en las coordenadas geográficas: Latitud: 14° 18' N Longitud: 91° 1' W (Figura 1).

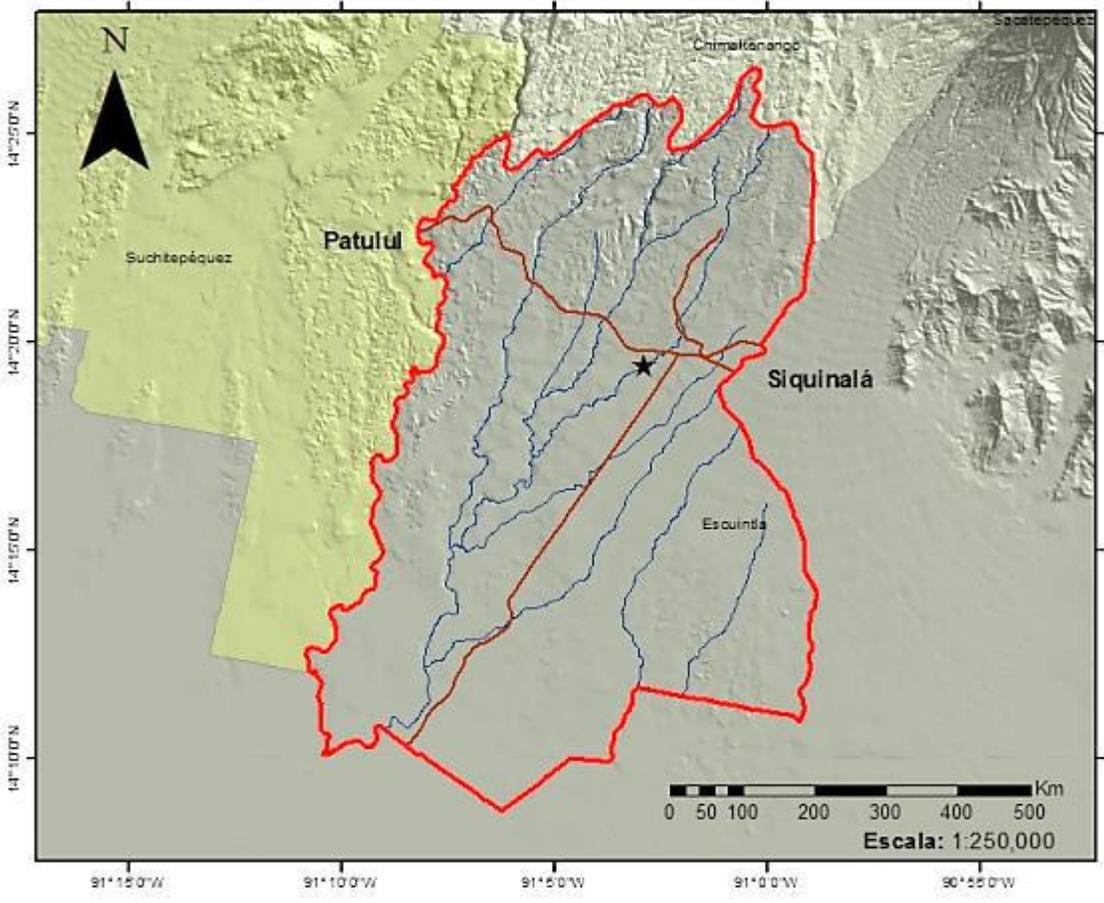
1.2.2 Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático –ICC-

Es la institución fundada por el sector azucarero de Guatemala, para contribuir en acciones que desarrollen procesos adecuados de mitigación y adaptación al cambio climático en las comunidades, procesos productivos e infraestructura en la región (ICC, 2011). El instituto tiene como objetivo principal, ser una institución privada, líder en investigación y promoción de proyectos, para la mitigación y la adaptación al Cambio Climático en las comunidades, los procesos productivos y la infraestructura de la región de influencia de sus miembros.

La Visión del instituto es ser una institución privada líder en investigación y promoción de proyectos, para la mitigación y la adaptación al Cambio Climático en las comunidades, los procesos productivos y la infraestructura de la región de influencia de sus miembros.

Su misión es: Crear y promover acciones y procesos que faciliten la mitigación y la adaptación al cambio climático en la región, con base en lineamientos técnico-científicos.

Mapa de Ubicación, Finca Camantulul, Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla



Ubicación de la Finca Camantulul

- ★ Finca Camantulul
- ▭ Límite municipal Santa Lucía Cotz.
- Red Vial
- Ríos

Sistema de Proyección: GTM
Datum: WGS 84
Editado por: Marie Andrée Liere
Guatemala 2011

Fuente: MAGA



Fuente: Liere, 2012

Figura 1 Mapa de ubicación Finca Camantulul.

1.2.3 Programas del Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático

El instituto fue creado como una organización de apoyo, por lo que desde el comienzo se dio a conocer entre sus miembros, organizaciones relacionadas y actores locales. Los mecanismos de apoyos contemplados por parte del instituto son: 1) generar información y estudios que sirvan de insumo para la planificación y toma de decisiones; 2) impulsar proyectos y acciones con base científica, técnica y viabilidad económica; 3) contribuir con el desarrollo de capacidades en grupos clave de la sociedad (ICC, 2012).

Los objetivos principales que persiguen son:

- Aportar a la disminución del impacto en eventos climáticos sobre poblados, sistemas de producción e infraestructura.
- Contribuir a la reducción de gases de efecto invernadero.
- Facilitar la adaptación de las comunidades, sistemas de producción e infraestructura al clima futuro.

Para lograr estos objetivos, se crearon cinco programas, los cuales se pueden observar en la figura 2. Dos de ellos (en color azul) se enfocan en realizar investigación, otros dos (en color verde) se encargan de implementar y promover acciones y el quinto coordina acciones encaminadas a preparar a actores clave y a la población en general para enfrentar el cambio climático.



Fuente: ICC, 2014

Figura 2 Estructura organizacional del ICC

a. Programa de Investigación en Clima e Hidrología

El objetivo de este programa es generar información y análisis sobre el clima y los recursos hídricos que contribuyan al bienestar de la población y a la sostenibilidad de los sistemas productivos. En especial se busca que los mismos no se vean afectados por eventos extremos y los cambios que se puedan dar a futuro, lo cual cae en el ámbito de la adaptación al cambio climático.

Dentro de sus actividades principales están:

- Administración de la red de estaciones del sector azucarero
- Elaborar Modelos climáticos y amenazas potenciales
- Realizar Estudios de inundaciones
- Realizar Análisis de eventos extremos.

b. Programa de Sostenibilidad de Sistemas Productivos

El objetivo primordial de este programa es contribuir a la sostenibilidad de los sistemas productivos prioritarios del ICC a través de la gestión ambiental.

Dentro de sus actividades principales están:

- Elaboración de la Política Ambiental de ASAZGUA.
- Realización del inventario de gases de efecto invernadero de la producción de azúcar y de la generación de electricidad.
- Identificación y promoción de medidas de adaptación al cambio climático.
- Asesoría a las acciones forestales productivas de los ingenios.

c. Programa de Manejo Integrado de Cuencas

Este programa persigue impulsar e implementar acciones para mantener la integridad de los recursos naturales en las cuencas tomando en cuenta su contexto social.

Dentro de sus actividades principales están:

- Recopilar y generar información básica de las cuencas y establecer la línea base
- Fomentar y acompañar procesos de organización social para el manejo de cuencas.
- Incidir en el manejo y protección de bosques.
- Apoyar el manejo integrado del agua.
- Contribuir en la protección de suelos.

d. Programa de Gestión de Riesgo de Desastres

Este programa persigue influir en la reducción del riesgo de desastres impulsando acciones con base en el análisis de factores naturales y sociales. Aparte de identificar las principales

amenazas climáticas, este programa busca hacer aportes para su comprensión y vigilancia a través del tiempo.

Dentro de sus actividades principales están:

- Evaluación de la vulnerabilidad de poblados, infraestructura y sistemas de producción
- Análisis de amenazas, especialmente de las inundaciones
- Elaboración de propuestas de obras, para reducción de desastres y adaptación al cambio climático.

e. Programa de Desarrollo de Capacidades y Divulgación

Su objetivo primordial es incidir en que aumente la capacidad de la población y los sistemas productivos de reaccionar ante los cambios en el clima.

Dentro de sus actividades principales están:

- Divulgar información pertinente utilizando medios escritos y digitales.
- Ejecutar programas de educación y concientización a través de la organización de eventos.
- Brindar asesoría y acompañamiento a las instituciones y empresas miembros del instituto.
- Coordinar la capacitación y actualización constante del personal del ICC para poder desempeñar su labor de la manera más profesional posible.

Equipo profesional del ICC (2013)

Dirección General	Dr. Alex Alí Guerra Noriega
Asesor	Dr. Luis Alberto Ferraté Felice
Gestor de proyectos	M.Sc. Martín Pérez Álvarez
Asistente de Dirección	S.B Sharon Arias de López

Programa de Investigación en Clima e Hidrología

Coordinación	Ing. M.Sc. José Alfredo Suárez Urrutia
Investigador en hidrología	Lic. Sergio Gil Villalba
Técnico	P.Agr. Carlos Aníbal Ramírez Calo
Técnico	Ing. Agr. Elmer Adolfo Orrego León
Practicante universitario (EPS-FAUSAC)	P. For. Cindy Estrada Montiel

Programa de Sostenibilidad de Sistemas Productivos

Coordinación	Ing. M.Sc. Oscar González
Técnico SIG y asistente de investigación	Dmo. Gonzalo Alexander López Franco

Programa Manejo Integrado de Cuencas

Coordinación	Ing. Agr. Luis Enrique Reyes García
Técnico	P. Agr. Juan Andrés Nelson Ruiz
Técnico	P. Agr. Roberth López Morales
Coordinador Proyecto Mangle ICC-Magdalena	Lic. Jorge Maza Vivar
Practicante universitario (EPS-FAUSAC)	MEPU Alma Santos Pérez

Técnico Forestal

P. For. Brayan Cujcuj López

Programa Gestión de Riesgo de Desastres

Coordinación

Arq. German Gualberto Alfaro Ruiz

Técnico

P. Admon. Francisco Alejandro Fuentes González

Practicante universitaria (EPS-
FARUSAC)

Br. Susana Guerra González

Practicante universitaria (URL)

SO. Dora Salpec Palma

Programa Desarrollo de Capacidades y Divulgación

Coordinación

Ing. M.A. Pablo Yax López

Técnico

Ing. Agr. Carlos Humberto Rodríguez

Personal de apoyo

Asistente administrativo

P.C. Luis Obed López Choquín

Apoyo en campo y oficinas

Carlos Israel Tivo Ávila, Sergio Estuardo Escobar,
Marvin José Zamora, Romelia de Jesús Barrios y
Silvia Margarita Coyán Chamo

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Realizar un diagnóstico del Programa de Investigación en Clima e hidrología para conocer el cumplimiento de las actividades plasmadas en el plan estratégico del instituto.

1.3.2 Objetivos específicos

Recopilar información sobre las áreas de trabajo del programa de Investigación en Clima e hidrología.

Evaluar el plan estratégico del Instituto con los POA's de los años 2011 a 2013 en función del porcentaje del cumplimiento de cada una de las actividades desarrolladas.

1.4 METODOLOGÍA

1.4.1 Principales áreas de trabajo del programa de Clima e Hidrología.

En base a los documentos que han sido generados por parte del programa se determinaron las principales áreas de trabajo en las cuales se enfoca el programa, estos documentos son: Informes de labores correspondientes al período 2011 a 2013, así como boletines climáticos, trabajos de licenciatura que han sido generados por estudiantes de licenciaturas o maestrías así como también en la página web oficial del ICC.

Un documento muy importante para conocer las líneas de acción del programa fue el plan estratégico del Instituto, dado a que en dicho documento se pudo conocer el objetivo primordial del programa, así como las actividades principales del mismo.

1.4.2 Evaluación del plan estratégico contra POA's 2011 a 2013

Para llevar a cabo esta actividad, se deben conocer las actividades ejecutadas por el programa de Clima e Hidrología en estos años, para posteriormente evaluar su grado de cumplimiento y verificar en función del POA y el plan estratégico la importancia de estas.

1.5 RESULTADOS

1.5.1 Principales áreas de trabajo del programa de Clima e Hidrología

Las principales áreas de trabajo del programa son las siguientes:

a. Climatología

Se ha definido como la línea principal de investigación la modelación de los escenarios climáticos futuros para Guatemala. Esta modelación permitirá la elaboración de recomendaciones para la adaptación al cambio climático de los sistemas productivos y comunidades contenidos dentro del área geográfica de acción del ICC. Esta área de investigación incluye el análisis del comportamiento de los sistemas climáticos globales y regionales como el ENSO (El Niño –Oscilación del Sur, por sus siglas en inglés) y su influencia sobre los sistemas locales. (ICC, 2012)

b. Hidrología

En cuanto al manejo de los recursos hídricos, se han planteado tres líneas de investigación con el objetivo de generar información la mitigación y reducción de la vulnerabilidad a los efectos del cambio climático, la cual es un insumo importante para el programa de Gestión de Riesgo y Desastres. La segunda línea es la generación de modelos hidrológicos e hidráulicos de los cauces principales de las cuencas prioritarias.(ICC,2012)

c. Hidrología subterránea

Una de las principales preocupaciones del ICC es saber las consecuencias de la explotación actual de los mantos acuíferos de la costa sur y cuáles deberían ser las condiciones óptimas

que garanticen la sostenibilidad del recurso. Es por eso que se ha planteado la necesidad de generar información básica que permita estudiar el comportamiento de los mantos freáticos y su dinámica dentro de las cuencas hidrológicas.(ICC, 2012)

1.5.2 Evaluación del Plan estratégico en función de POA's de 2011 a 2013

En el plan estratégico se tienen los siguientes objetivos:

- Realizar investigación científica que permita crear estrategias y acciones de mitigación y adaptación al cambio climático
- Brindar asesoría y asistencia permanente de carácter técnico-científico a distintos sectores

Según el Plan estratégico del ICC se tiene establecido el siguiente objetivo para el programa de Investigación en Clima e Hidrología:

Objetivo por programa

Clima e hidrología (investigación): generar información y análisis sobre el clima y los recursos hídricos que contribuyan a afrontar los retos presentes y futuros.

Plan operativo anual (2011)

OBJETIVO 1: Proveer a los usuarios de la AIA información meteorológica y climática de calidad de una red de estaciones en buen funcionamiento y con cobertura para la zona cañera y cuencas que la contienen

En el marco del cumplimiento del primero objetivo planteado por la institución, se desarrollaron actividades específicas con la finalidad de que cada una de ellas evaluadas en función del cumplimiento de las mismas, contribuyeran al cumplimiento de dicho objetivo.

Estaciones automáticas administradas por el ICC, en funcionamiento: Como se observa en la tabla 1. Para lograr alcanzar este resultado se llevaron a cabo diferentes actividades específicas las cuales se desarrollaron por parte de las personas especialistas en el tema, en este caso el Ingeniero Alfredo Suárez (coordinador del programa de clima e hidrología) y el técnico Carlos Ramírez.

A raíz de que el personal responsable del manejo de la red de estaciones meteorológicas automáticas de CENGICAÑA fuera contratado por el ICC, y la lógica de que el Instituto debe ser el ente responsable del manejo de la información climática que la AIA Guatemala, las juntas directivas del ICC y de CENGICAÑA aprobaron que la administración de la red de estaciones y el Sistema de Información Meteorológico pasara a ser responsabilidad del Programa de Investigación en Clima e Hidrología.

Bajo esta dirección, se consideró para el año 2011 crear un plan de expansión de la red de estaciones a aquellas zonas cañeras sin cobertura, así como monitorear los fenómenos hidroclicmáticos en las partes medias y altas de las cuencas. De esta cuenta, a finales del año 2011, se adquirieron siete nuevas estaciones con tecnología GPRS¹. Dos de ellas estaban destinadas al monitoreo de la parte media de las cuencas del Coyolate y Achiguate,

¹ GPRS: (General Packet Radio Services): es una técnica de conmutación de paquetes, que es integrable con la estructura actual de las redes GSM.

entre los 900 y los 1,500 metros sobre el nivel del mar. Otras tres estaciones estaban consideradas para instalarse en los departamentos de Retalhuleu (municipio de Retalhuleu), Suchitepéquez (entre los municipios de Cuyotenango y San Lorenzo) y Jutiapa (en el municipio de Pasaco a orillas del río Los Esclavos (Para el año 2011 se contaban con 16 estaciones). Las últimas dos estaciones fueron consideradas como reemplazo a estaciones que tienen problemas de telemetría (Tululá y San Rafael). (Informe de labores, 2011)

Según la tabla 1. Para lograr cumplir el primer resultado y por lo tanto contribuir al objetivo planteado, se plantearon 7 actividades específicas, la mayoría de estas (4 actividades) fueron desarrolladas casi en su totalidad, siendo éstas: Mantenimiento de estaciones automáticas, captura de información meteorológica, estaciones –ICC- sitios potenciales y tipo de estación y por último la identificación de sitios potenciales de estaciones –AIA- de acuerdo a los requerimientos del cliente la cual fue cumplida en un 100%.

Se logró identificar que 3 actividades específicas complementarios al primer resultado no lograron ser cumplidas ni desarrolladas debido a diversos factores, siendo el más fundamental que para la primera semana de noviembre del mismo año se hizo la solicitud de compra de los equipos de soluciones analíticas, ante lo cual la adquisición de los mismos no fue posible a la brevedad posible, dando lugar al nulo cumplimiento de estas actividades.

Base de datos histórica de información climática generada en las estaciones automáticas y convencionales de la AIA: para lograr el cumplimiento de esta actividad, se llevaron a cabo 2 sub actividades específicas: Estructuración, actualización y corrección de la base de datos de las estaciones automáticas y Estructuración, actualización y corrección de la base de datos de las estaciones convencionales, las cuales fueron cumplidas en una gran parte de acuerdo a la tabla 1.

Consolidar el proceso de control de calidad de la información meteorológica en las etapas de generación, almacenamiento y entrega de información: dentro del marco de actividades que se realizaron para garantizar el cumplimiento de esta actividad, se dividieron

en 2 actividades específicas para tal fin: Elaboración de boletines semanales y mensuales y elaboración de informes según solicitud.

Esto fue parte de la continuidad que se le dio al trabajo que CENGICAÑA realizaba en cuanto a la emisión de boletines climáticos semanales de los cuatro estratos altitudinales de la zona cañera para usuarios de los ingenios miembros del ICC. También se emitieron boletines semanales ejecutivos con información climática de las últimas 4 zafras y boletines de balance hídrico decadal. (Informe de labores, 2011)

Cuadro 1 Evaluación de actividades del POA 2011, según objetivo número 1

Resultado o producto esperado	Actividades específicas	Indicadores	% de ejecución
Estaciones automáticas administradas por el ICC, en funcionamiento	Mantenimiento de estaciones automáticas	Registro de mantenimiento mensual por estación (16 estaciones)	83%
	Captura de información meteorológica	Base de datos meteorológica semanal completa	85%
	Reemplazo de estaciones antiguas de la AIA	Estaciones reemplazadas	0%
	Estaciones -ICC - Sitios potenciales y tipo de estación	Sitios identificados	50%
	Estaciones- -AIA - Sitios potenciales de acuerdo a los requerimientos del cliente	Sitios identificados	100%
	Instalación de estaciones meteorológicas ICC	Estaciones instaladas	0%

	Instalación de estaciones meteorológicas AIA	Estaciones instaladas	0%
Base de datos histórica de información climática generada en las estaciones automáticas y convencionales de la AIA	Estructuración, actualización y corrección de la base de datos de las estaciones automáticas	Base de datos meteorológicos semanal estructurada, actualizada y corregida	85%
	Estructuración, actualización y corrección de la base de datos de las estaciones convencionales	Base de datos meteorológicos semanal estructurada, actualizada y corregida	85%
Consolidar el proceso de control de calidad de la información meteorológica en las etapas de generación, almacenamiento y entrega de información	Elaboración de boletines semanales y mensuales	Boletín climático semanal	85%
		Boletín climático semanal ejecutivo	85%
		Boletín de balance hídrico	85%
	Elaboración de informes según solicitud	Porcentaje de atención a solicitudes de información	100%
Diagnóstico de mejoras en el Sistema de Información Meteorológica	Revisión de la operación del SIM por parte de usuarios del ICC y CENGICAÑA	Informe de diagnóstico	0%

Fuente: Elaboración propia, con datos POA 2011.

OBJETIVO 2: Objetivo: Generar análisis científico sobre variables climáticas e hidrometeorológicas pertinentes al cambio climático.

Según el cuadro no. 2 se plantearon 4 actividades o resultados a esperar los cuales a su vez se subdividieron cada uno en actividades específicas para garantizar el cumplimiento de las mismas.

Diagnóstico de la situación actual de estaciones hidrológicas y meteorológicas de la costa sur e identificación de vacíos de información: Según la tabla 2 para garantizar el cumplimiento de estas actividades se subdividieron en 4 actividades: Recopilación de información de estaciones que generan información hidrológica y meteorológica en la costa sur de Guatemala, Ubicación geográfica de las estaciones, Identificación de vacíos de información, Elaboración del documento del diagnóstico e inventario.

La realización de esta actividad fue imposible culminarlas, existiendo dentro de estas varios factores: factor tiempo uno de ellos, según el POA de este año se disponía de un tiempo muy limitado para poder ejecutar estas actividades.

Según El técnico del programa de clima e hidrología Carlos Ramírez, un factor muy importante a considerar para este año fue que no existía una persona especialista que abordara la temática del tema hidrológico.

En las siguientes actividades o resultados esperados por parte del programa para este objetivo también se subdividieron en actividades más específicas las cuales como puede observarse en la tabla no. 2 ninguna de ellas pudo ser cumplida, nuevamente por factores como el tiempo que fue muy limitado o escaso para la ejecución de las mismas y un factor que sobre sale también es que para este año no se contaba con el apoyo de un especialista en el tema de hidrología.

Los resultados que no pudieron ser alcanzados y/o desarrollados son: ***Actualización del balance hídrico agronómico de la zona cañera, Innovación y nuevas tecnologías para***

la mitigación y adaptación al cambio climático, Análisis hidrogeológico de cuencas prioritarias.

Cuadro 2 Evaluación de actividades del POA 2011, según objetivo número 2.

Resultado o producto esperado	Actividades específicas	Indicadores	% de ejecución
Diagnóstico de la situación actual de estaciones hidrológicas y meteorológicas de la costa sur e identificación de vacíos de información	Recopilación de información de estaciones que generan información hidrológica y meteorológica en la costa sur de Guatemala	Informe de inventario de estaciones	0%
	Ubicación geográfica de las estaciones	Base de datos geoespacial	0%
	Identificación de vacíos de información	Informe	0%
	Elaboración del documento del diagnóstico e inventario	Informe	0%
Actualización del balance hídrico agronómico de la zona cañera	Recopilación de información para datos de entrada del modelo	Base de datos	0%
	Análisis de la información, elaboración de modelos y mapas	Modelos mensuales	0%
	Elaboración de documento	Artículo	0%
Innovación y nuevas tecnologías para la mitigación y adaptación al cambio climático	Revisión de literatura sobre tecnologías innovadoras para la adaptación y mitigación del cambio climático	Artículo	0%

Análisis hidrogeológico de cuencas prioritarias	Establecer contactos para la elaboración de estudios hidrogeológicos de cuencas	Informe con propuestas de estudios hidrogeológicos	de de	0%
--	---	--	-------	----

Fuente: Elaboración propia, con datos POA 2011.

OBJETIVO 3. Analizar los posibles impactos del cambio climático sobre los sistemas hidroclimáticos de la región.

Para lograr el cumplimiento de este objetivo se estableció un resultado esperado y de este mismo 3 sub actividades específicas a desarrollarse para lograr el cumplimiento del objetivo establecido.

El grado de cumplimiento de este objetivo para este año fue nulo, debido al factor tiempo que se consideró un factor muy limitante para la elaboración de los documentos (ensayos y artículos), destinados para analizar los posibles impactos del cambio climático sobre los sistemas hidroclimáticos de la región.

Para el efecto del análisis en el cuadro 3 puede observarse las actividades específicas planteadas y así mismo el porcentaje de ejecución de las mismas.

Cuadro 3 Evaluación de actividades del POA 2011, según objetivo número 3.

Resultado o producto esperado	Actividades específicas	Indicadores	% de ejecución
Descripción del sistema hidroclimático de la costa sur de Guatemala	Revisión de literatura: Características generales de la vertiente del Pacífico y su relación con los sistemas climáticos predominantes	Ensayo	0%

	Revisión de literatura: Sistemas regionales que influyen sobre las condiciones climáticas de la vertiente del Pacífico	Ensayo	0%
	Elaboración de documento	Artículo	0%

Fuente: Elaboración propia, con datos POA 2011.

El porcentaje de ejecución del POA para este año fue de un 32% ya que como se describió con anterioridad, diversos factores fueron los que influyeron para que el cumplimiento del POA fuera llevado a cabo con éxito, uno de los más influyentes fue el tiempo limitado con que se contaba y que el personal del equipo del programa era limitado también.

Plan operativo anual (2012)

Objetivo 1. Aportar a la disminución del impacto de eventos climáticos sobre comunidades, sistemas de producción e infraestructura.

Como parte de uno de los objetivos estratégicos del programa de clima e hidrología se tiene establecido que se debe generar información y análisis sobre el clima y los recursos hídricos que contribuyan a afrontar los retos presentes y futuros.

Derivado de esto, para el año 2012 el equipo del programa de clima e hidrología como parte de uno del cumplimiento del objetivo 1 establecido para este año, desarrollo las siguientes actividades:

Generación de información hidroclimática: para lograr alcanzar este resultado se desarrollaron varias actividades específicas, se continuó con la captura de información

meteorológica que es de vital importancia para el programa, se continuó con la actualización de la base de datos meteorológicos semanal.

Así mismo como parte del seguimiento de estas actividades se realizó la estructuración, actualización y corrección de la base de datos de las estaciones automáticas.

Para el año 2011 se estableció la compra de equipo nuevo de estaciones, para este año uno de los logros más importantes para el programa fue la implementación de un sistema mixto que permite la transmisión de información tanto en radio frecuencia UHF como GSM/GPRS.

En cuanto a la transferencia de información, para el año 2012 se elaboraron 53 boletines semanales y ejecutivos, los cuales fueron enviados a usuarios de la Agroindustria Azucarera de Guatemala.

En cuanto a la instalación de estaciones meteorológicas nuevas se instalaron: Xoluta (Retalhuleu) y San Nicolás (Suchitepéquez).

Análisis de información climática: una de las tareas fundamentales del programa es realizar un análisis de la información climática para la generación de artículos o informes que den a conocer los resultados de esos análisis. Durante el año 2012 se realizaron varios estudios, uno de ellos fue: Análisis climático-sinóptico del viento y elaboración de una tabla de recomendaciones para el manejo de las quemas.

El estudio iniciado en el año 2011 tenía por objetivo la caracterización del comportamiento de los vientos en la costa sur, mediante el análisis sinóptico a partir de información de las estaciones meteorológicas automáticas de la red administrada por el ICC. A partir del análisis climático-sinóptico, se elaboraron tablas de recomendaciones de horarios más adecuados para realizar quemas en caña de azúcar durante la zafra.

Análisis hidrogeológico: para este resultado, se plantearon 2 actividades específicas las cuales no pudieron ser ejecutadas debido a diversos factores:

La primera actividad consistía en la promoción de estudio geológico (base para estudio de aguas subterráneas), esta actividad no fue realizada debido a que la Junta Directiva de la institución recomendó no llevar a cabo este estudio.

La segunda actividad a desarrollar consistía en desarrollar un análisis de perfiles de pozos de la cuenca del río Acomé, sin embargo la actividad no pudo ser desarrollada debido a que los ingenios no brindaron la información correspondiente para llevar a cabo el análisis.

Estudio base para el análisis de inundaciones: como parte del desarrollo de esta actividad se elaboraron estudios hidrológicos de las cuencas de los ríos Achiguate, María Linda y Los Esclavos para dicho año.

Los estudios se basaron en la modelación de caudales a partir de diferentes eventos de precipitación. Estos estudios tienen como objetivo sentar las bases para la modelación hidráulica de los cauces con el fin de determinar zonas de inundación y contribuir a la mejora de los sistemas de alerta temprana.

Determinación de necesidades de investigación en clima e hidrología: en el año 2012 se contaba con el apoyo de la estudiante de Agronomía Marie Andrée Liere, que durante la ejecución de su Ejercicio Profesional Supervisado realizó un estudio basado en la identificación de vacíos en investigación hidroclimática en las cuencas de los ríos Coyolate, Acomé y Achiguate, en base a los modelos de balance hidrológico (entradas y salidas) y con un enfoque de cambio climático. En la parte climática, los resultados evidenciaron la necesidad de contar con información sobre el comportamiento de la lluvia durante eventos extremos, que es de suma importancia para poder definir estrategias de reducción de la vulnerabilidad y el desarrollo de medidas de adaptación. En cuanto al componente hidrológico, se comprobó la necesidad de analizar el comportamiento hidráulico de los ríos, principalmente durante eventos extremos, así como la necesidad del monitoreo de caudales. El componente hidrogeológico mostró la necesidad de caracterizar los acuíferos superficiales y profundos, así como la elaboración de un mapeo hidrogeológico que permita comprender la dinámica del agua subterránea.

Cuadro 4 Evaluación de actividades del POA 2012, en función del objetivo 1.

Resultado o producto esperado	Actividades específicas	Indicadores	% de ejecución
Generación de información hidroclimática	Captura de información meteorológica	Base de datos meteorológicos semanal completa	100%
	Estructuración, actualización y corrección de la base de datos, estaciones automáticas	Base de datos meteorológicos semanal estructurada, actualizada y corregida	100%
	Estructuración, actualización y corrección de la base de datos, estaciones convencionales	Base de datos meteorológicos semanal estructurada, actualizada y corregida	70%
	Servicio a estaciones automáticas	Registro de mantenimiento mensual por estación	100%
	Instalación de estaciones de reemplazo (año 2011)	Estaciones reemplazadas	100%
	Reemplazo de estaciones (plan 2012)	Estaciones reemplazadas	100%
	Instalación de estaciones en ubicaciones nuevas (plan 2011)	Estaciones instaladas	70%
	Adquisición e instalación de nuevas estaciones (plan 2012)	Estaciones instaladas	100%

	Elaboración de boletines climáticos semanales	Boletines climáticos semanales enviados	100%
	Elaboración de boletines de balance hídrico (cada 10 días)	Boletines de balance hídrico	100%
	Elaboración de boletines según solicitudes	Porcentaje de solicitudes atendidas	100%
	Diagnóstico de la situación actual de la generación de información hidroclimática	Informe final	95%
	Propuesta de generación de información hidrológica	Proyecto para instalación de estaciones hidrométricas	100%
Análisis de Información climática	Índices locales de variabilidad climática y su relación con sistemas regionales	Artículo	75%
	Índices de cambio climático	Artículo	25%
	Validación de análisis de vientos	Artículo	100%
	Atención a solicitudes de miembros del ICC	Informes	100%
Análisis Hidrogeológico	Promoción de estudio geológico (base para estudio de aguas subterráneas)	Informe de avances	0%
	Análisis de perfiles de pozos de la cuenca del río Acomé	Informe final	0%

Estudios bases para análisis de inundaciones	Estudio de períodos de retorno de crecidas en María Linda y Achiguate	Informe por cuenca	100%
	Estudio hidráulico de la cuenca del río María Linda	Informe	25%
	Análisis histórico de zonas inundadas	Artículo	75%
Determinación de necesidades de investigación en clima e hidrología	Elaboración de tesis por parte de estudiante de licenciatura	Informe final	100%
	Análisis de necesidades de investigación	Informe	90%
Estudio de las inundaciones en la vertiente del Pacífico	Mapeo de áreas susceptibles a inundaciones	Mapa	50%

Fuente: Elaboración propia, con datos POA 2012.

OBJETIVO 2: Facilitar la adaptación de las comunidades, sistemas de producción e infraestructura al clima futuro.

Para lograr alcanzar este objetivo se plantearon los siguientes productos o resultados esperando ser cumplidos:

Elaboración de modelos de clima futuro: utilizando la metodología downscaling se elaboraron modelos del clima. Esta actividad fue ejecutada en un 75% (Cuadro 5)

Evaluación del niño/niña: la actividad específica que se desarrolló en este apartado fue la evaluación de los efectos de ENOS (El Niño- Oscilación del Sur), y su influencia sobre el crecimiento y desarrollo en la caña de azúcar en Guatemala. Este estudio ayuda

acomprender cómo las fluctuaciones, en el comportamiento de fenómenos a nivel global, inciden sobre los sistemas productivos locales (como en el caso de la caña de azúcar).

Por otro lado, este estudio ayudó a definir una nueva línea de investigación para analizar las relaciones existentes entre los sistemas climáticos globales y locales. Esto implica correlacionar la respuesta de las variables meteorológicas a nivel local ante los cambios en sistemas climáticos globales.

Gestión integrada de los recursos hídricos: en este apartado la actividad específica principal consistió en la revisión bibliográfica sobre el almacenamiento y cosecha de agua, así mismo como el diseño de un proyecto piloto. Milton Chán, elaboró la revisión de literatura sobre tecnologías de almacenamiento de agua y cosecha de agua de lluvia. La información generada en esta revisión sirvió como base para la evaluación de tecnologías con un alto potencial de adaptación para el área de trabajo del ICC.

Cuadro 5 Evaluación de actividades del POA 2012, en función del objetivo 2.

Resultado o producto esperado	Actividades específicas	Indicadores	% de ejecución
Elaboración de modelos de clima futuro	Metodología (downscaling)	Informe de avances	75%
Evaluación del niño/niña	Evaluación de los efectos de ENSO en la costa sur de Guatemala.	Artículo	100%
Gestión integrada de los recursos hídricos	Revisión bibliográfica sobre almacenamiento y cosecha de agua y diseño de un proyecto piloto	Documentos: revisión bibliográfica y proyecto diseñado	97%

Fuente: Elaboración propia, con datos POA 2012.

Teniendo ya los resultados tabulados y analizados, se puede concluir que el POA para este año fue cumplido en un 80%, mejorando así significativamente el porcentaje de cumplimiento respecto al año 2011 que únicamente fue del 32%.

Plan operativo anual (2013)

Objetivo 1. Aportar a la disminución del impacto de eventos climáticos sobre comunidades, sistemas de producción e infraestructura.

Uno de los objetivos primordiales del Instituto radica en generar información hidrometeorológica que contribuya a disminuir precisamente los impactos de eventos climáticos especialmente en aquellas zonas habitadas, zonas de cultivos y en el tema de infraestructura.

Para este objetivo se desarrollaron las siguientes actividades:

Generación de información hidroclimática: Dentro de la línea de estudio de las relaciones entre los sistemas climáticos regionales y el clima local, en el año 2013 se elaboró el estudio de tesis de grado titulado “Regionalización climática de la Vertiente del Pacífico” elaborada por P. For. Cindy Estrada, estudiante de la Facultad de Agronomía de la USAC. Esta tesis fue planteada con el objetivo de definir regiones con comportamiento climático similar a partir del análisis de las variaciones tanto en espacio como en tiempo de las variables de temperatura y precipitación en la vertiente del Pacífico.

Otra de las actividades importantes fue el cálculo de 27 índices de cambio climático, actividad llevada a cabo como parte de los servicios realizados por P. For. Cindy Estrada. Estos índices de cambio climático se calcularon con la finalidad de representar los aspectos más extremos del clima.

Así mismo se dio continuidad al análisis climático-sinóptico del viento con fines de manejo de quemas, proyecto iniciado en 2011 y validado en 2012. Este análisis busca reducir los impactos de las quemas en sistemas productivos, comunidades e infraestructura de la región cañera, al incorporar un sistema de información en tiempo real al proceso de la toma de decisiones sobre la realización de la quema.

Además de esto para este año se continuó con la elaboración de boletines climáticos semanales, boletines de balance hídrico, boletines de comportamiento del ENSO y la elaboración de boletines según solicitudes.

Para este año se instalaron las estaciones meteorológicas Trinidad Magdalena (zona cañera de Santa Rosa) y El Platanar (Sur de Acatenango, parte alta de cuencas).

Investigación y Gestión de riesgo a inundaciones

En el año 2012 se generaron estudios hidrológicos a partir de modelos numéricos, para las cuencas de los ríos Coyolate, Achiguate, María Linda y Los Esclavos. Estos modelos tratan de simplificar cada uno de los procesos del ciclo hidrológico para obtener valores del caudal de salida de cada una de las cuencas. Debido a la complejidad de los procesos incluidos en el modelo, se requirió calibrar y validar sus resultados comprando los datos de salida del modelo con datos registrados en eventos reales.

Se llevó a cabo también el estudio hidráulico de las cuencas de los ríos María Linda, Coyolate y Los Esclavos.

Análisis de información climática

Dentro de este apartado se llevó a cabo la determinación de zonas susceptibles a inundación en el Río Coyolate, como una herramienta primaria para la reducción de vulnerabilidad por inundaciones,

Cuadro 6 Evaluación de actividades del POA 2013, en función del objetivo 1.

Resultado o producto esperado	Actividades específicas	Indicadores	% de ejecución
Generación de información hidroclimática	Captura de información meteorológica	Base de datos meteorológicos semanal completa	100%
	Estructuración, actualización y corrección de la base de datos, estaciones automáticas	Base de datos meteorológicos semanal estructurada, actualizada y corregida	100%
	Estructuración, actualización y corrección de la base de datos, estaciones convencionales	Base de datos meteorológicos semanal estructurada, actualizada y corregida	100%
	Servicio a estaciones automáticas	Registro de mantenimiento mensual por estación	100%
	Instalación de estaciones nuevas (ICC - Parte alta y media de cuencas)	Estaciones instaladas en parte alta y media de cuencas.	25%
	Reemplazo de estaciones zona cañera	Estaciones reemplazadas	100%
	Instalación de pluviómetros manuales en 4 estaciones (una por estrato)	Pluviómetros instalados	50%
	Reemplazo en obras de protección (pararrayos)	Pararrayos reemplazados	100%

	Elaboración de boletines climáticos semanales	Boletines climáticos semanales enviados	100%
	Elaboración de boletines de balance hídrico (cada 10 días)	Boletines de balance hídrico	100%
	Elaboración de boletines mensuales del comportamiento del ENSO.	Boletines del comportamiento del ENSO	89%
	Elaboración de boletines especiales según solicitudes	Porcentaje de solicitudes atendidas	100%
	Hidrometría de cuencas prioritarias	Instalación de estaciones de INSIVUMEH en cuencas prioritarias	0%
	Apoyo en la medición de secciones de sitios de medición hidrológica al INSIVUMEH	Perfiles de secciones de sitios definidos por INSIVUMEH e ICC	100%
	Índices locales de variabilidad climática y su relación con sistemas regionales	Artículo	100%
	Índices de cambio climático	Artículo	100%
	Análisis de vientos con fines de manejo de quemas (categorización de velocidades y comportamiento de la humedad relativa)	Artículo	63%

	Modelación clima y cultivos (caña y/o maíz)	Informe	68%
	Elaboración de propuesta de manejo de quemas de la caña de azúcar	Propuesta	75%
	Análisis de perfiles de pozos	Informe final	67%
	Atención a solicitudes de miembros del ICC	Informes	100%
Investigación y gestión de riesgo a inundaciones	Levantamiento topográfico a escala de gran detalle por medio del uso de imágenes LIDAR.	Propuesta	100%
	Validación de estudios hidrológicos cuencas Coyolate, Achiguate, María Linda y Los Esclavos	Documento	25%
	Estudio hidráulico de la cuenca del río María Linda, Achiguate, Los Esclavos	Informe	100%
Análisis de Información climática	Análisis histórico de zonas inundadas	Artículo	75%

Fuente: Elaboración propia, con datos POA 2013.

1.6 CONCLUSIONES

1. El programa de Investigación en clima e hidrología cuenta con 3 principales líneas de investigación: climatología, hidrología e hidrología subterránea. La línea de investigación en climatología incluye análisis profundos del comportamiento de los sistemas climáticos globales y regionales como el ENSO (El Niño-Oscilación del Sur) y su influencia en los sistemas locales, además de esto incluye la administración de las 20 estaciones meteorológicas distribuidas a nivel de la Vertiente del Pacífico, generación de boletines climáticos por semana, boletines de balance hídrico (cada 10 días) etc. Mientras que en la línea de investigación en Hidrología las actividades van enfocadas al análisis de eventos extremos en las cuencas prioritarias para el ICC, estas actividades específicas pueden ser las inundaciones o desbordes que puedan tener los ríos. Otra actividad sumamente importante dentro de esta línea de trabajo es la generación de modelos hidrológicos e hidráulicos de los cauces principales de las cuencas prioritarias como un insumo importante para la elaboración de obras civiles enfocadas en la mitigación. La última línea de investigación del programa va enfocada a la hidrología subterránea que dentro de las actividades específicas se encuentran el estudio de los mantos acuíferos de la costa sur, por lo que generar información de este tipo es sumamente valioso para el ICC.
2. Según resultados obtenidos de la evaluación de las actividades plasmadas en los POA's correspondientes a los años 2011-2013, la línea de investigación en climatología es una de las más fortalecidas ya que se cuenta con el personal adecuado y suficiente para llevar a cabo cada una de las tareas que se lleven a cabo dentro de esta línea de trabajo.

1.7 RECOMENDACIONES

1. Se deben fortalecer algunas áreas de trabajo como en el caso de hidrología subterránea, que es el área en que menos se han desarrollado actividades o estudios.
2. Continuar dando seguimiento a los estudios que son de suma importancia para el gremio azucarero especialmente a aquellos que tienen un impacto directo en el bienestar de la población.
3. Fortalecer las relaciones con instituciones y actores principales que tengan propuestas de estudios a realizar dentro de las áreas de trabajo del programa.
4. Continuar con el apoyo en investigaciones a otros programas del instituto como por ejemplo en estudios de inundaciones en conjunto con el programa de Gestión de Riesgo de Desastres.
5. Se debe continuar con la instalación de nuevas estaciones meteorológicas en la vertiente del pacífico, con la finalidad de cubrir la mayor parte del área de la misma y obtener datos mucho más precisos.
6. Se debe contar con una base de datos meteorológicos organizados y actualizados lo más posible para tener un control correcto de los mismos.
7. Se debe realizar investigaciones en tema de escenarios de clima futuro con la intención de que estos se conviertan en una herramienta muy útil para temas de investigación científica enfocados en cambio climático.
8. Realizar investigaciones para profundizar cuál será el desplazamiento de la caña de azúcar según los escenarios de cambio climático.

1.8 BIBLIOGRAFIA

1. ICC (Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático, GT). 2011a. Plan estratégico 2011-2020. Guatemala. 12 p.
2. _____. 2008. Cambio climático 2007: informe de síntesis. Switzerland. 104 p.
3. _____. 2012. Informe de labores 2011. Guatemala. 44 p.
4. _____. 2013. Informe de labores 2012. Guatemala. 65 p.
5. _____. 2014. Informe de labores 2013. Guatemala. 59 p.
6. _____. 2014b. Programas (en línea). Guatemala. Consultado 01 de marzo de 2014. Disponible en <http://www.icc.org.gt/?PAGE=2>
7. Liere Quevedo, MA. 2012. Trabajo de graduación: estado de arte en información hidrometeorológica de las cuencas Coyolate, Acomé y Achiguate, en la vertiente del Pacífico, Guatemala, C.A. Tesis Inga. Agra. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 51 p.

2 CAPÍTULO II. VALIDACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO CON BASE EN EL MODELO CMIP5 Y EL ESCENARIO DE EMISIONES RCP 8.5 PARA LA VERTIENTE DEL PACÍFICO DE GUATEMALA PARA LOS PERÍODOS 2001 AL 2013

VALIDATION OF CLIMATE CHANGE SCENARIOS BASED ON CMIP5 MODEL AND EMISSION SCENARIO RCP 8.5 FOR THE PACIFIC SLOPE OF GUATEMALA FOR THE PERIOD 2001-2013

2.1 PRESENTACIÓN

El cambio climático es cada vez más reconocido como un gran desafío y representa a mediano y largo plazo, una de las mayores amenazas para el desarrollo y bienestar humano. No es posible predecir exactamente lo que pasaría en las distintas localidades, pero las tendencias analizadas apuntan a cambios en los patrones de lluvias y temperaturas, un posible aumento del nivel del mar, reducción de la biodiversidad, derretimiento de glaciares y mayor frecuencia en la ocurrencia de eventos extremos tales como huracanes, sequías, y fuegos forestales (Banco Interamericano de Desarrollo, BID 2010)

Para poder simular el clima, es necesario calcular los efectos de los principales procesos que inciden en el sistema climático, mientras que para simular el cambio climático futuro, se deben representar los cambios posibles o previstos de los forzamientos climáticos, tanto naturales como antropogénicos (inducidos por el hombre).

Para tener en cuenta estos factores, hay que elaborar escenarios que detallen cómo variará la concentración de gases de efecto invernadero en el tiempo. Los modelos del sistema climático han demostrado ser una herramienta muy útil para lograr entender mejor los efectos anticipados del cambio climático sobre sistemas vulnerables y constituyen un valioso aporte al proceso de planificación y formulación de políticas. (BID, 2010).

Con el apoyo del BID, los países de América Latina y el Caribe vienen diseñando estrategias de adaptación que toman en cuenta información obtenida de distintos escenarios de cambio climático generados por estos modelos e introduciendo nuevas tecnologías para reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Guatemala es uno de los países privilegiados que cuentan con el apoyo del BID ya que se han venido desarrollando capacitaciones y talleres con el auspicio de especialistas de la Universidad de Nebraska-Lincoln (UNL), sobre el uso de estos modelos para generar los escenarios de cambio climático para el país.

En vista de los retos presentes y futuros que representa el clima, el sector azucarero guatemalteco fundó el Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático -ICC- en el año de 2010. Considerando que una de las líneas de trabajo principal del ICC se basa en la generación y el análisis de información meteorológica, y dada la importancia y relevancia

que tiene para el país el tema del cambio climático, la presente investigación se enfocó en la validación de los escenarios de cambio climático desarrollados para Guatemala. Para el efecto se tomó como área de estudio la Vertiente del Pacífico de Guatemala por ser una zona altamente productiva para el país y por ser la zona prioritaria de trabajo del ICC.

La investigación muestra resultados interesantes: para la variable de temperatura media los escenarios de cambio climático demuestran en base a sus proyecciones que tienen una mayor certeza para predecir el comportamiento de dicha variable, mientras que para la precipitación las proyecciones tienen menos certeza, debido al comportamiento variable de la precipitación y también por la escala espacial de los escenarios.

Para realizar la validación se utilizaron datos climáticos locales a nivel de vertiente, y/o incluso regiones.

2.2 MARCO CONCEPTUAL

A continuación se presentan algunos conceptos teóricos que son necesarios para la realización de la investigación.

2.2.1 Climatología

La climatología es la ciencia que estudia el clima y sus variaciones a lo largo del tiempo. Aunque utiliza los mismos parámetros que la meteorología, su objetivo es distinto, ya que no pretende hacer previsiones inmediatas, sino estudiar las características climáticas a largo plazo.

2.2.2 Meteorología

Es la ciencia que se ocupa de los fenómenos que ocurren a corto plazo en las capas bajas de la atmósfera, o sea, donde se desarrolla la vida de plantas y animales.

La meteorología estudia los cambios atmosféricos que se producen a cada momento, utilizando parámetros como la temperatura del aire, su humedad, la presión atmosférica, el viento o las precipitaciones. El objetivo de la meteorología es predecir el tiempo que va a hacer en 24 o 48 horas y, en menor medida, elaborar un pronóstico del tiempo a medio plazo.

2.2.3 El clima y sistema climático

El clima se suele definir en sentido restringido como el estado promedio del tiempo y, más rigurosamente, como una descripción estadística del tiempo atmosférico en términos de los valores medios y de la variabilidad de las magnitudes correspondientes durante períodos que pueden abarcar desde meses hasta millares o millones de años. El período de

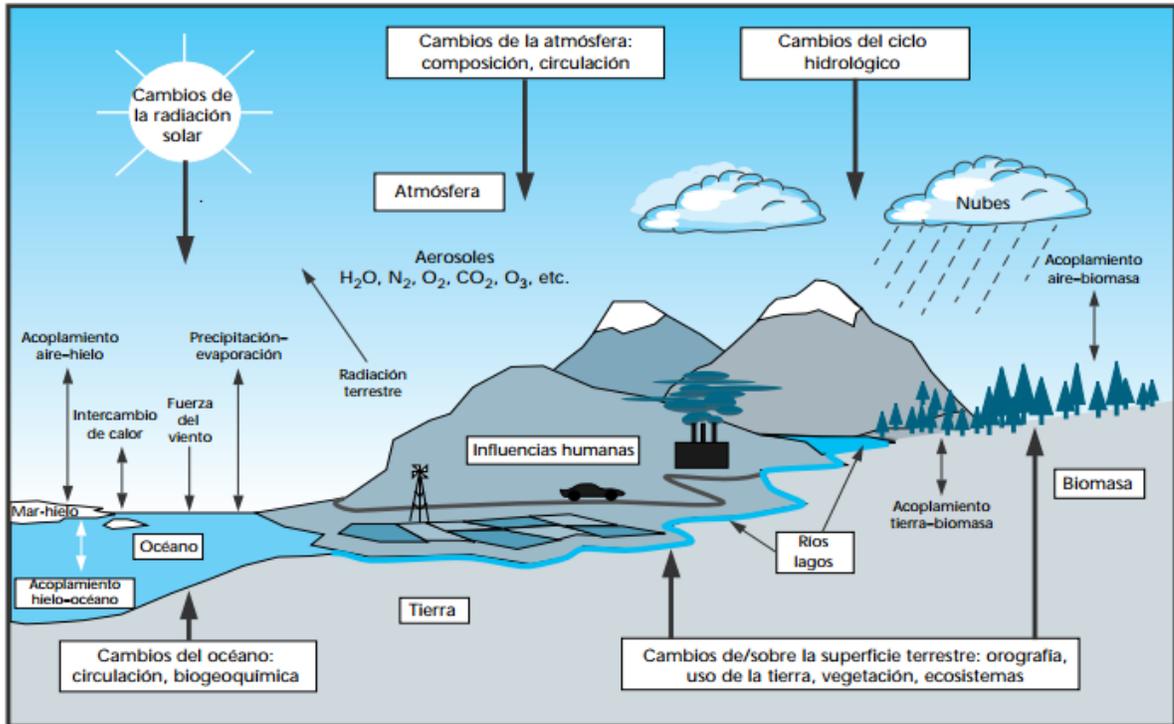
promediación habitual es de 30 años, según la definición de la Organización Meteorológica Mundial. Las magnitudes correspondientes son casi siempre variables de superficie (por ejemplo, temperatura, precipitación o viento).

En un sentido más amplio, el clima es el estado del sistema climático en términos tanto clásicos como estadísticos. En varios capítulos del presente informe se utilizan también diferentes períodos de promediación, por ejemplo de 20 años. (Panel Intergubernamental Sobre Cambio Climático, IPCC, 2008)

El sistema climático consta de los componentes principales siguientes: a) la atmósfera, b) los océanos, c) las biosferas terrestre y marina, d) la criósfera (hielo marino, cubierta de nieve estacional, glaciares de montaña y capas de hielo escala continental), y e) la superficie terrestre. Estos componentes actúan entre sí y, como resultado de esa interacción colectiva, determinan el clima de la superficie de la Tierra. (IPCC, 1997)

Los cambios en los componentes son consecuencia de cambios en los forzamientos, o factores externos, que pueden ser positivos (ocasionando calentamiento) o negativos (ocasionando enfriamiento). Los forzamientos del clima pueden clasificarse como naturales o antropogénicos (es decir, inducidos por el hombre).

Los ejemplos de forzamientos naturales incluyen la variabilidad solar y las erupciones volcánicas; los forzamientos antropogénicos incluyen la emisión de GEI, la producción de aerosoles y los cambios en el uso del suelo. Asimismo, a través de una serie de efectos de retroacción, el cambio inicial puede incrementarse (retroacción positiva) o reducirse (retroacción negativa). Siempre ha habido cambios en los forzamientos naturales - continúan hoy en día - y han provocado cambios climáticos y variabilidad climática a lo largo de la historia del planeta; pero solo recientemente la magnitud de los forzamientos antropogénicos ha sido suficiente como para afectar considerablemente al sistema climático. (IPCC, 1997)



Fuente: IPCC, 1997

Figura 3 Visión esquemática de los componentes del sistema climático mundial.

Los componentes del sistema climático inciden en el clima regional y mundial de varias maneras diferentes: a) influyen en la composición de la atmósfera de la Tierra, por lo que modulan la absorción y transmisión de la energía solar y la emisión de energía infrarroja que se devuelve al espacio; b) alteran las propiedades de la superficie y la cantidad y naturaleza de la nubosidad, lo que repercute sobre el clima a nivel regional y mundial; y c) distribuyen el calor horizontal y verticalmente, desde una región hacia otra mediante los movimientos atmosféricos y las corrientes oceánicas.

2.2.4 Elementos del clima

Los elementos del clima son el conjunto de fenómenos que lo forman. Entre ellos podemos mencionar los siguientes:

- Temperatura
- Presión atmosférica
- Humedad atmosférica
- Viento
- Precipitación

Temperatura ambiente: es el grado de calor que posee el aire en un momento y lugar determinados; se consigue en la atmósfera y en cualquier otro cuerpo de la Tierra. La temperatura se mide en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) o grados Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) con el termómetro (aparato que contiene mercurio o alcohol y una escala graduada en $^{\circ}\text{C}$ o $^{\circ}\text{F}$) y el termógrafo (aparato que registra la temperatura gráficamente). (Zavala, 2014)

La temperatura puede registrarse de la siguiente forma:

Temperatura máxima: es la temperatura más alta registrada durante un período determinado.

Temperatura mínima: de forma análoga a la temperatura máxima, la temperatura mínima es la temperatura más baja registrada durante un período determinado.

Temperatura media: es la temperatura promedio de un período dado.

Presión atmosférica: se define como el peso que ejerce el aire sobre un determinado punto de la superficie terrestre. La presión no es uniforme en toda la corteza, por ejemplo disminuye en las zonas elevadas. Por lo tanto, es más baja en las montañas que en las costas. (Zavala, 2014)

Humedad atmosférica: es la cantidad de vapor de agua contenida en el aire en un lugar y momento determinado. (Zavala, 2014)

Viento: es el movimiento horizontal del aire atmosférico. Al aire que se mueve verticalmente se le llama corriente aérea. Los vientos tienen gran importancia geográfica porque transportan: masas de aire frío desde las zonas frías a las cálidas y viceversa, originando variaciones en la temperatura; y humedad desde los océanos y mares a los continentes, provocando zonas de abundante pluviosidad. (Zavala, 2014)

Precipitación: Consiste en la caída del agua líquida o sólida. Se produce cuando el vapor de agua se condensa en la atmósfera originando las nubes. Cuando la condensación se produce a una temperatura superior a 0°C la precipitación es líquida (lluvia); y cuando ocurre a una temperatura inferior a 0°C la precipitación es sólida (nieve o granizo). (Zavala, 2014)

2.2.5 Cambio Climático

El cambio climático se refiere a cualquier cambio en el clima a través del tiempo, ya sea debido a la variabilidad natural o como resultado de la actividad humana (IPCC, 2001).

El clima no es estático sino que varía en el tiempo, muchas veces debido a eventos naturales tales como tormentas solares o actividad volcánica. A estas causas naturales se han sumado las originadas por la actividad humana.

Esta influencia antropogénica (causada por el hombre) en el clima no es un fenómeno reciente, sino que se inició en el siglo XVII con la Revolución industrial, y es producto del aumento en la concentración de ciertos gases en la atmósfera, entre ellos, los denominados Gases de Efecto Invernadero² (GEI).

Estos gases son fundamentalmente el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso, producidos por actividades humanas vinculadas al uso de combustibles fósiles (para la generación de energía, transporte, industria), la agricultura intensiva y el cambio en el uso del suelo (Giz, Bmz, 2012).

2.2.6 Gases de Efecto Invernadero

La actividad humana resulta en la emisión de varios gases de efecto invernadero. Los principales son: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y halocarbonos (gases que contienen flúor, cloro y bromo). La cantidad de GEI emitida por

² La acumulación de GEI en la atmósfera potencia un efecto que existe naturalmente denominado "efecto invernadero". Gracias a este fenómeno el planeta conserva una temperatura que hace posible que exista la vida, impidiendo que los días sean excesivamente calurosos y las noches demasiado frías. Sin embargo, durante las últimas décadas la acumulación de dichos gases ha derivado en el incremento de la temperatura media superficial del planeta, hecho conocido como "Calentamiento Global". Además se alteran otras variables, como el viento y la precipitación, que originan lo que se conoce hoy como el fenómeno de "Cambio Climático"

actividades humanas aumentó en un 70% entre 1970 y 2004. El aumento en la concentración de estos gases en la atmósfera tiene como consecuencia un incremento en la temperatura. (Jara, 2010)

2.2.7 Política Nacional de Cambio Climático

Guatemala ante la preocupación de los serios efectos debido al cambio climático en base a la Constitución Política de la República de Guatemala y una serie de convenios, leyes, decretos y protocolos, bajo el Acuerdo Gubernativo 329-2009 se decidió aprobar la Política Nacional de Cambio Climático, la cual fue formulada por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales –MARN-.

La política como tal cuenta con varios objetivos planteados y también presenta diferentes áreas de incidencia dentro de los cuales los escenarios de cambio climático juegan un papel importante para que estos objetivos y actividades puedan ser cumplidos a cabalidad.

2.2.8 Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático.

El Panel Intergubernamental sobre cambio climático (IPCC) es el organismo internacional para evaluar la ciencia relacionada con el cambio climático. El IPCC se estableció en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el programa de medio ambiente de las Naciones Unidas (PNUMA) para proporcionar a las autoridades con evaluaciones periódicas de la base científica del cambio climático, sus impactos y riesgos futuros y opciones para adaptación y mitigación.

2.2.9 Modelación del cambio climático

¿Por qué necesitamos contar con modelos climáticos?

En los últimos años y gracias al advenimiento de la era de supercomputadoras, el uso y aplicación práctica de modelos numéricos, tales como los modelos del clima, han permitido el mejor entendimiento de procesos en la naturaleza para los cuales habría sido muy complejo llevar a cabo ciertos experimentos. Los modelos del sistema climático surgen como una respuesta a la necesidad de poder representar y estudiar con más detalle ciertas interacciones del sistema atmósfera-océano-superficie terrestre en respuesta a posibles forzamientos específicos. (BID, 2010)

2.2.10 ¿Qué es un modelo climático?

Para poder simular el clima, es necesario calcular los efectos de todos los principales procesos que inciden en el sistema climático.

Aunque nuestros conocimientos de estos procesos puedan representarse en términos matemáticos, la complejidad del sistema significa que, en la práctica, estos efectos solo pueden calcularse con computadoras. Por lo tanto, la formulación matemática se realiza mediante un programa informático que se denomina modelo climático. También es importante tener en cuenta que estos modelos climáticos son muy similares a los que se emplean para efectuar predicciones y pronósticos meteorológicos.

Por último, hay amplio reconocimiento de que los modelos climáticos actuales simulan en forma creíble el clima actual observado, lo que sugiere que se comprende en gran medida cómo funciona el sistema climático.

Los modelos climáticos y meteorológicos aplican a la atmósfera las ecuaciones del movimiento de fluidos, de la física y de la química. Dado que la atmósfera es sumamente variable en el tiempo y el espacio, para poder predecir su estado cambiante (es decir, el estado del tiempo), estos sistemas de ecuaciones deben resolverse para un gran número de puntos de la atmósfera (tanto horizontal como verticalmente). Si estas simulaciones se realizan durante un período prolongado, pueden estimarse tanto el estado promedio del sistema como su variabilidad intrínseca (es decir, el clima).

Puesto que deben resolverse numerosas ecuaciones en un gran número de puntos durante un período prolongado, estos modelos se elaboran como programas informáticos que se ejecutan en computadoras de alto rendimiento. Estos modelos climáticos y meteorológicos se emplean para pronosticar el tiempo a corto plazo y para estudiar cómo reacciona el sistema climático a distintos tipos de cambios. (BID, 2010)

Para poder simular el cambio climático futuro, se debe de representar los cambios posibles o previstos de los forzamientos climáticos, tanto naturales como antropogénicos (inducidos por el hombre). Algunos forzamientos naturales como la variación de la energía emitida por el sol, funcionan a través de mecanismos físicos razonablemente bien comprendidos y pueden incluirse en las proyecciones del estado del clima futuro; otros, como la emisión de gases y partículas de origen volcánico a la atmósfera, son menos predecibles.

Los forzamientos de origen humano se sitúan entre estos dos extremos, es decir, no son ni muy predecibles ni esencialmente aleatorios. Estos forzamientos humanos, incluida la emisión de gases de efecto invernadero, obedecen a muchos factores subyacentes, como el crecimiento demográfico, el desarrollo económico y la tecnología. Para tener en cuenta estos factores, debemos elaborar escenarios que describan cómo variará la concentración de gases de efecto invernadero en el tiempo.

2.2.11 Modelo CMIP5

El Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5, (CMIP5, por sus siglas en inglés) fue realizado por centros internacionales (Figura 4) de modelación del clima mediante un conjunto de experimentos numéricos para estudiar la predecibilidad del clima, explorando los alcances y limitaciones de los modelos globales

Los resultados colectados con el CMIP5 serán el sustento para el siguiente reporte de evaluación del IPCC (IPCC-AR5, por sus siglas en inglés). Toda la información generada por el CMIP5 ha pasado por un robusto procedimiento de control de calidad de datos la cual es descrita por Stockhause, et al. (2012).

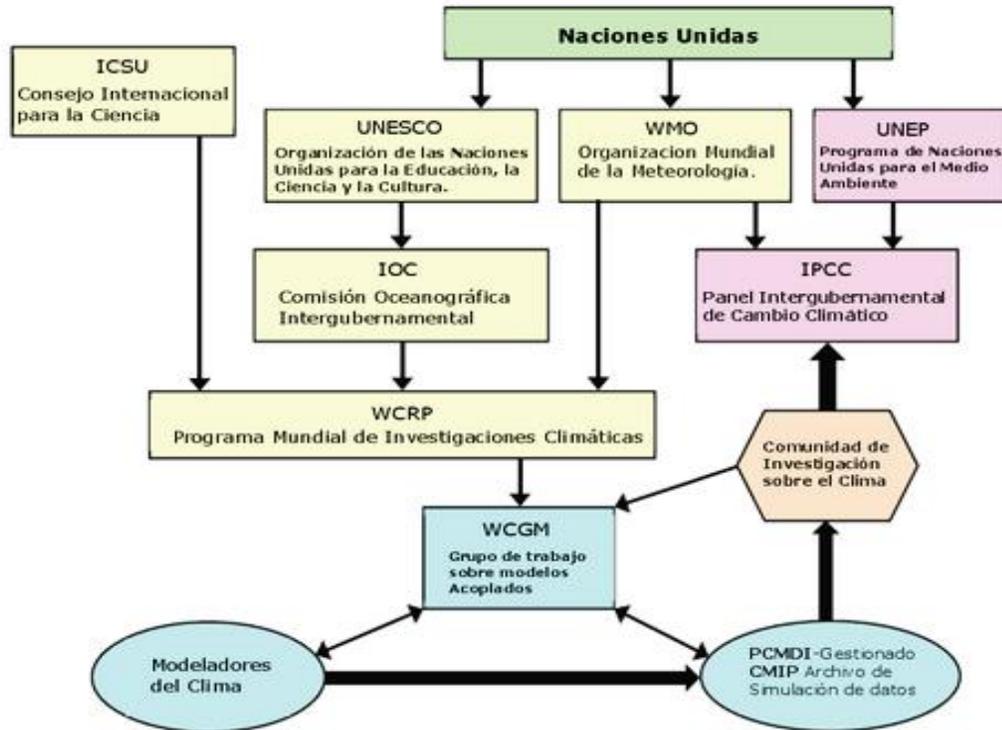


Figura 4 Relación del CMIP5 con otras organizaciones

Este modelo permite realizar simulaciones con condiciones iniciales observadas en la atmósfera (esto es lo que se hace en cualquier pronóstico del tiempo) y del océano. Se basan en la respuesta del sistema climático a las condiciones iniciales (anomalías de temperatura y salinidad en el océano superficial y sub superficial observadas) y a forzantes externos (antropogénicos y naturales).

Modelos anteriores: elaborados para generar los escenarios publicados por el IPCC. CMIP (1993), CMIP3 (años 2005 y 2006)

2.2.12 Escenarios de cambio climático

Un escenario climático es "una estimación internamente consistente de cambios en el clima futuro, el cual es construido a partir de métodos que se basan en sólidos principios científicos, y que pueden ser usados para proporcionar un entendimiento de la respuesta de los sistemas ambientales y sociales al cambio climático futuro (Viner y Hulme, 1996)".

Según el IPCC (2000) "Los escenarios son imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro, y constituyen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán las fuerzas determinantes en las emisiones futuras, y para evaluar el margen de incertidumbre de dicho análisis. Los escenarios son de utilidad para el análisis del cambio climático, y en particular para la creación de modelos del clima, para la evaluación de los impactos y para las iniciativas de adaptación y de mitigación."

2.2.12.1 Consideraciones generales de los escenarios de cambio climático:

El cambio climático posee una dimensión global a pesar de que muchos de sus impactos se presenten a escala regional, de esta forma, los escenarios climáticos deben desarrollarse considerando una serie de aspectos generales con el fin de que se puedan establecer comparaciones con otros estudios que se desarrollan en diferentes partes del mundo.

Algunas de las generalidades más comunes expresadas en la literatura sobre modelos climáticos y escenarios son las siguientes (Smith y Hulme, 1996; Viner y Hulme, 1996):

-Los escenarios deben ser desarrollados teniendo en cuenta la comunidad, sistema o recurso que pueda sufrir el impacto. Por lo tanto se deberán incluir aquellas variables que sean más convenientes.

-Los escenarios deberían tener una adecuada resolución espacial, considerando que esta debe ser suficiente para llevar a cabo estudios de impactos regionales, y de ser posible, locales. La posibilidad de que con esta resolución se puedan representar variaciones climáticas específicas para un sitio posee un gran valor para la estimación de impactos.

-Los cambios en las variables climatológicas deben ser internamente consistentes con el escenario. Por ejemplo: los cambios en la temperatura, lluvia, humedad, nubosidad y radiación, se encuentran relacionados.

-Los escenarios de cambio climático no deberán ser considerados como pronósticos o predicciones, únicamente son una posible representación de las condiciones climáticas futuras.

Para describir de manera coherente las relaciones entre las fuerzas determinantes de las emisiones y su evolución, y para añadir un contexto a la cuantificación de los escenarios, se desarrollaron cuatro líneas evolutivas diferentes. Cada una de ellas representa un cambio (o tendencia) demográfico, social, económico, tecnológico y medio ambiental, que algunos pueden valorar positivamente, y otros, negativamente.

Cuadro 7 Descripción de las familias de escenarios

ESCENARIO	DESCRIPCIÓN
A1	La línea evolutiva y familia de escenarios A1 describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Sus características distintivas más importantes son la convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales, acompañadas de una notable reducción de las diferencias regionales en cuanto a ingresos por habitante. La familia de escenarios A1 se desarrolla en tres grupos que describen direcciones alternativas del cambio tecnológico en el sistema de energía. Los tres grupos A1 se diferencian en su orientación tecnológica: utilización intensiva de combustibles de origen fósil (A1FI), utilización de fuentes de energía no de origen fósil (A1T), o utilización equilibrada de todo tipo de fuentes (A1B).
A2	La familia de líneas evolutivas y escenarios A2 describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las

	<p>identidades locales. Las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen muy lentamente, con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.</p>
B1	<p>La familia de líneas evolutivas y escenarios B1 describe un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza un máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, como en la línea evolutiva A1, pero con rápidos cambios de las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y de la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos. En ella se da preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y medioambiental, así como a una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.</p>
B2	<p>La familia de líneas evolutivas y escenarios B2 describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y medioambiental. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas B1 y A1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional.</p>

Fuente: Elaboración propia (2014) en base al informe especial de escenarios de emisiones del IPCC

2.2.13 Escenarios RCP 8.5

El escenario RCP8.5 representa una vía de emisiones y concertaciones relativamente altas. Sus principales supuestos incluyen alto crecimiento poblacional, relativamente bajo crecimiento de PIB, con tasas modestas de cambios tecnológicos y de eficiencia energética. Esto lleva a importantes demandas energéticas y consecuentes emisiones de gases de efecto invernadero. En este escenario no se implementan políticas de cambio climático. (Rojas, 2012)

Varios RCP diferentes se han desarrollado para el IPCC AR5 (Van Vuuren et.al. 2011), los cuales incluyen el RCP2.6, RCP4.5, RCP6 y RCP8.5 y llevan el nombre de un posible rango de valores de forzamiento radiativo en el año 2100 (2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 W/m^2 , respectivamente) (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, MARN, 2014)

Esto significa que el RCP2.6 tiene el menor incremento en forzamiento de gases de efecto invernadero (GEI), mientras que el RCP8.5 tiene el mayor incremento considerado. (MARN, 2014)

Para el caso de los escenarios de cambio climático creados por la Universidad Nebraska Lincoln se eligió el escenario RCP8.5 porque representa el mayor aumento plausible a forzamiento entre el momento actual y finales de siglo (MARN, 2014)

2.2.14 Modelos de Circulación General

Los Modelos de Circulación General (MCG) de la atmósfera usan ecuaciones matemáticas para representar los principales procesos físicos a gran escala, los que posteriormente se enlazan para simular el sistema climático completo (Solomon et al., 2007).

Experimentos numéricos con los MCGs permiten concluir que el aumento de las concentraciones atmosféricas de Gases de Efecto Invernadero (GEI), producirá cambios en el clima global y regional, particularmente incrementos en la temperatura y modificación en los patrones de precipitación. Estos cambios pueden simularse con los Escenarios de

Emisiones (EE), que se refieren a las diferentes concentraciones de GEI y aerosoles que se utilizan para perturbar el sistema climático y generar estimaciones cuantitativas creíbles, llamadas escenarios del cambio climático futuro.

Existen MCG atmosféricos y oceánicos (MCGA y MCGO, respectivamente). Los MCGA y los MCGO pueden combinarse para elaborar un modelo de circulación general (atmosférico y oceánico) integrado (MCGAO). Puesto que el cambio climático se relaciona con las interacciones entre la atmósfera y el océano, el uso del MCGAO ha pasado a ser de aceptación general. Una tendencia reciente es ampliar los MCG para crear modelos del sistema terrestre que incluyan, por ejemplo, sub-modelos de química atmosférica o un modelo del ciclo del carbono, o de vegetación interactiva (dinámicos), pero estos modelos están aún en una etapa de desarrollo muy incipiente (BID, 2010)

2.2.15 Modelo Climático Regional (MCR)

Los modelos climáticos regionales son esencialmente versiones de los modelos de circulación general calculados para una superficie limitada (o dominio), no para el conjunto del planeta. Estos modelos se emplean para hacer frente a las limitaciones de escala horizontal del modelo de circulación general; este último tiene una resolución horizontal de entre 100 km y 300 km, en tanto que un modelo climático regional puede ejecutarse con una resolución horizontal de entre 10 km y 50km. En esencia, pueden utilizarse para reducir físicamente la escala de los resultados del modelo mundial a una escala regional, e incluso local. (BID, 2010)

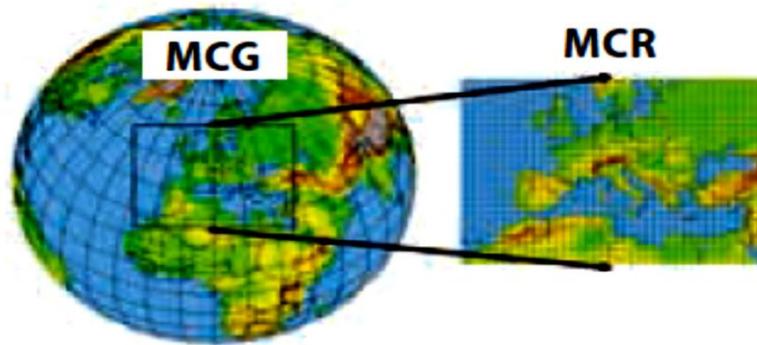


Figura 5 Representación del enfoque de anidamiento del Modelo Climático Regional

Fuente: Giorgi, 2008

2.2.16 Reducción de escala (Down-scaling)

La regionalización se refiere al proceso de reducción de escala – downscaling- para adaptar las proyecciones de gran escala generadas por los modelos climáticos globales a las características regionales o locales muy influidas por la orografía, contraste tierra-agua, uso de suelo, etc.

Estas proyecciones están basadas en distintos escenarios de emisión, modelos globales y técnicas de regionalización de forma que los usuarios las puedan utilizar como entrada a sus modelos de impactos.

2.3 Marco referencial

2.3.1 República de Guatemala

Guatemala deriva de “guauhtemallan, voz de náhuatl, que significa “*Tierra de árboles*”. El país se localiza en el istmo centroamericano entre las latitudes 13°44' y 18°30' norte y longitud 87°24' y 92°14' oeste. Colinda al norte y oeste con México, al Este con el Salvador, Honduras, Belice y Mar Caribe y al sur con el Océano Pacífico. (MARN, 2001)

Administrativamente está dividida en 22 departamentos, equivalentes a estados o provincias y tiene una extensión territorial de 108,889 km cuadrados (42,042 millas cuadradas).

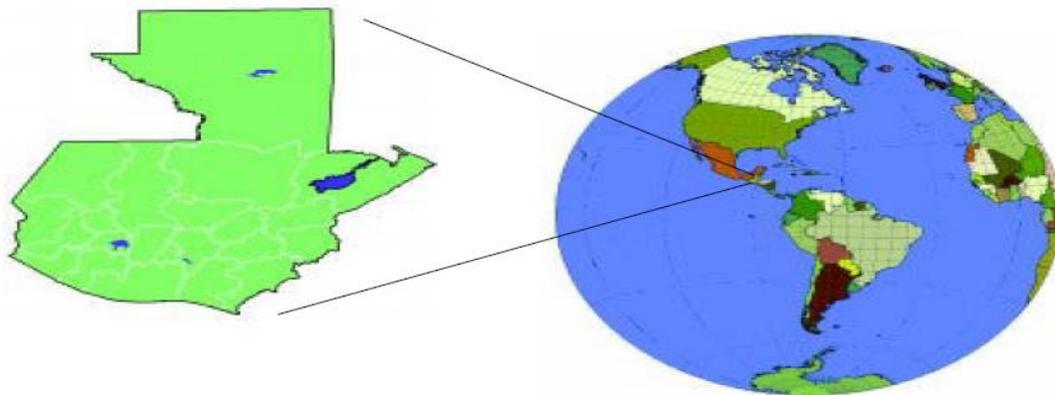


Figura 6 Localización geográfica de Guatemala

Fuente: MARN. 2001

2.3.2 Estudios sobre escenarios de cambio climático para Guatemala

A nivel de país se publicó la llamada Primera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático, estudio que se inició en 1998 y que incluyó un análisis de escenarios climáticos, socioeconómicos y ambientales a futuro que luego permitieron evaluar la vulnerabilidad de varios sectores importantes del país ante el cambio climático (Castellanos y Guerra, 2009).

Su elaboración fue un compromiso que el país adquirió por haber firmado la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés) al momento de su creación en 1992 y que se ratificó en 1995. Para el análisis climático histórico, el estudio tomó como base los registros de 1960 a 1990 de la red de estaciones del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH). (Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar, CENGICAÑA, 2014)

Para describir el comportamiento futuro del clima en Guatemala, se utilizaron tres escenarios de emisiones de GEI elaborados por el IPCC (IS92a, IS92c y IS92e). Los tres escenarios fueron seleccionados porque consideran las sensibilidades climáticas media, baja y alta, respectivamente, y un rango amplio de predicciones de calentamiento global basadas en el incremento de los GEI (MARN, 2001). Para evaluar los impactos que pueden surgir por los cambios en el clima, se identificaron cinco escenarios que abarcan la gama de situaciones futuras posibles: un escenario húmedo de poco cambio; un escenario húmedo de mucho cambio; un escenario seco de poco cambio; un escenario seco de mucho cambio y un escenario sin cambios (CENGICAÑA, 2014)

Los escenarios de emisiones seleccionados para estimar los cambios de temperatura media global fueron el IS92c, el IS92a y el IS92e que fueron elaborados por el IPCC. Los IS92 son escenarios de “no intervención” pues no consideran políticas de intervención orientadas a mitigar el cambio climático pero sí incluyen políticas encaminadas a reducir otros problemas ambientales relacionados, como la lluvia ácida o la contaminación atmosférica. (MARN, 2001)

Según el estudio, todos los escenarios son consistentes en indicar que la temperatura se elevará entre 0.5 y 4 grados para el año 2050. Se prevé que el aumento en temperatura se reflejará en todos los meses y no en unos más que otros. Para la precipitación, los escenarios indican que podría haber una disminución de la precipitación en el trimestre julio-septiembre, que implica una intensificación del veranillo o canícula (MARN, 2001).

En cuanto a la precipitación anual, la tendencia es a una leve disminución hasta la década 2060 y sólo disminuiría alrededor del 20 por ciento a finales de siglo.

2.3.3 Vertiente del Pacífico de Guatemala

Descripción:

Los ríos que corresponden a la Vertiente del Pacífico, tienen longitudes cortas (110 km. promedio) y se originan a una altura media de 3000 msnm.

Las pendientes son fuertes en las partes altas de las cuencas, entre el 10% y el 20% cambiando bruscamente a pendientes mínimas en la planicie costera del pacífico, creando grandes zonas susceptibles a inundación en esta área. Estas condiciones fisiográficas producen crecidas instantáneas de gran magnitud y corta duración así como tiempos de propagación muy cortos.

Por otro lado, todos los ríos de la Vertiente del Pacífico transportan grandes volúmenes de material, especialmente escorias y cenizas volcánicas, debido a que la cadena volcánica se encuentra entre los límites de la vertiente. Debido a este arrastre de material los ríos tienen cursos inestables causando daños e inundaciones en la planicie costera. La precipitación en la vertiente del Pacífico tiene períodos de gran intensidad, típica de las zonas costeras con una precipitación media anual de 2200 mm. (INSIVUMEH)

2.3.4 Guatemala y su clima

Por su localización geográfica y su topografía, Guatemala cuenta con una variedad grande de climas que van desde el cálido húmedo en las regiones costeras hasta el clima frío en el altiplano; incluso existen pequeñas áreas localizadas de clima seco que llegan a una condición semiárida.

- **Precipitación**

Las precipitaciones varían según la zona del país; en el altiplano la lluvia media anual fluctúa entre 1000 y 1200 mm y en las costas alcanza los 4000 mm; el promedio anual de lluvia del país alcanza los 2200 mm. En la zona central el período de lluvias es de mayo a octubre;

en la zona oriental que es la zona más seca, es de sólo dos meses al año, mientras que para la región noroccidental dura siete meses. (MARN, 2001)

- **Temperatura**

Las temperaturas medias anuales para el periodo 1980-1990 son de 26.7 °C para la zona del Pacífico, 18.7°C para la zona de centro y 25.5 °C para la zona Atlántica. (MARN, 2001)

En Guatemala actualmente están distribuidas en todo el país una red de estaciones meteorológicas bajo la administración del INSIVUMEH (Institución encargada de establecer y operar, las redes de estaciones necesarias al conocimiento de los fenómenos sismológico, vulcanológico, meteorológico e hidrológico en el territorio nacional.)

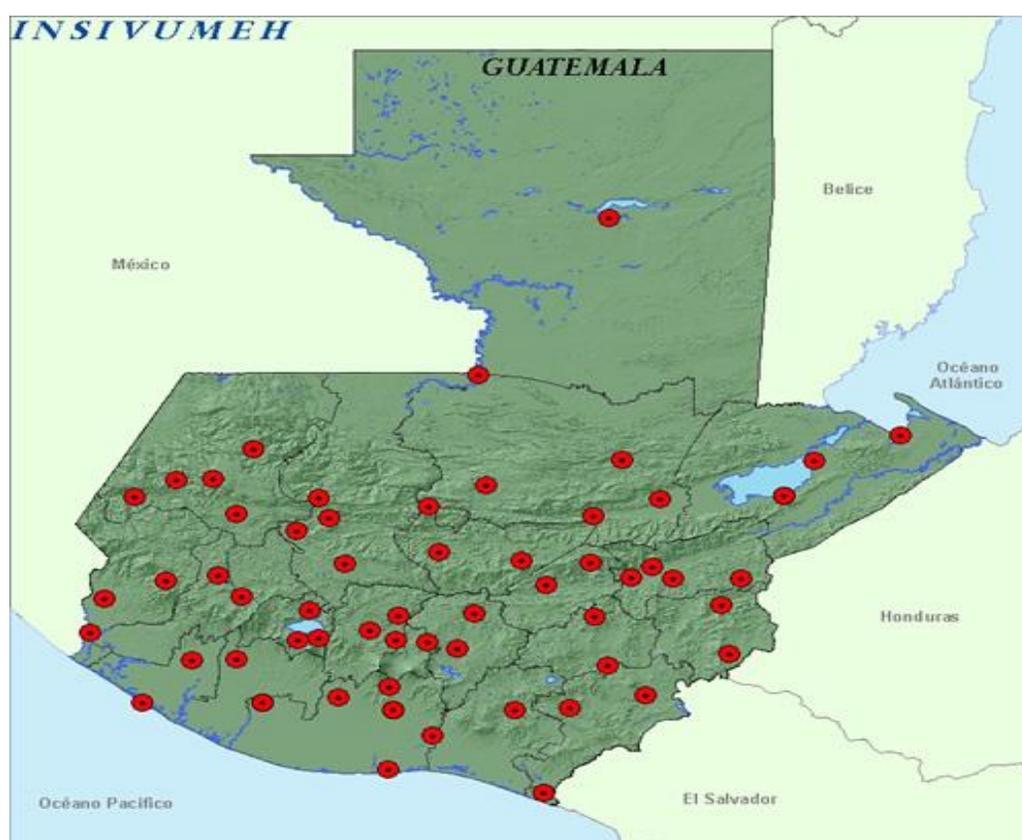


Figura 7 Red de estaciones meteorológicas administradas por INSIVUMEH.

Fuente: INSIVUMEH

El Instituto Privado de Investigación Sobre Cambio Climático –ICC- se encarga de administrar una red conformada por veinte estaciones meteorológicas localizadas en diferentes puntos estratégicos en la vertiente del pacífico del país.

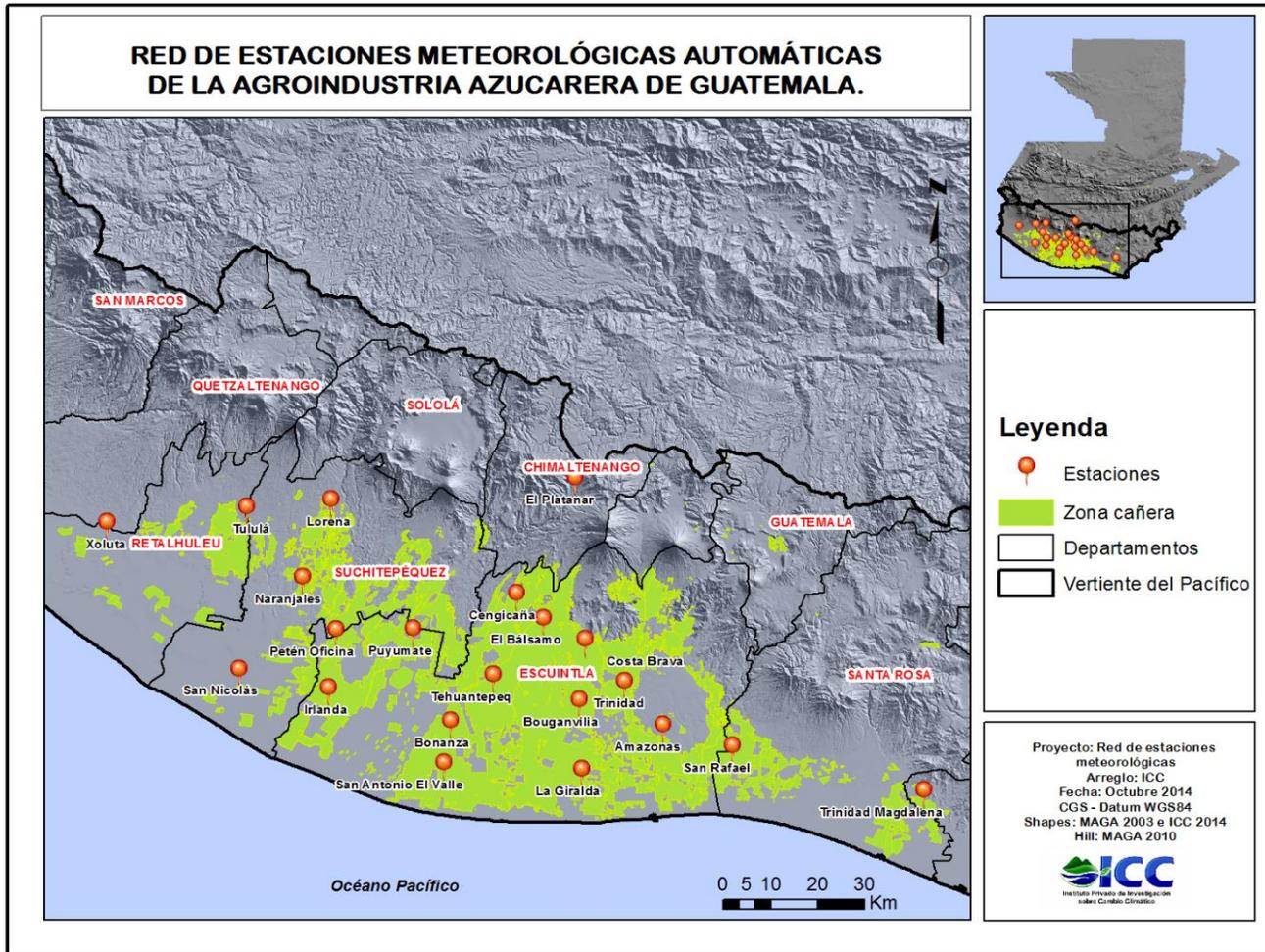


Figura 8 Red de estaciones meteorológicas administradas por el ICC.

Fuente: ICC, 2014

2.4 OBJETIVOS

2.4.1 General

- Validar los escenarios de Cambio Climático en base al modelo CMIP5 y el escenario de emisiones RCP8.5 planteados por la Universidad Nebraska Lincoln para la Vertiente del Pacífico de Guatemala para los períodos 2001 al 2013.

2.4.2 Específicos

- Validar las proyecciones de los escenarios de cambio climático de la Universidad Nebraska-Lincoln mediante el uso de la climatología local para la precipitación y temperatura media a nivel mensual
- Determinar el grado de incertidumbre que presentan los modelos planteados por la Universidad Nebraska-Lincoln.

2.5 METODOLOGÍA

A continuación se describe la metodología empleada para la realización de la presente investigación.

2.5.1 Validación de escenarios de cambio climático

2.5.1.1 Recolección de la información:

- a. Recolección de datos de salida procesados en las simulaciones realizadas por la Universidad de Nebraska.

Los datos de salida utilizados para el proceso de validación, corresponden al período de tiempo comprendido entre los años 2001 a 2013, los cuales fueron descargados de la página web: <http://weather.unl.edu/RCM/Guatemala/Phase2/data/index.php>), en formato NetCDF³, los cuales hacen referencia a las variables de precipitación mensual y temperatura mensual, los cuales fueron simulados en un dominio de 4 kilómetros el cual abarca todo el país.

- b. Recolección de datos climáticos generados a partir de los registro locales de las estaciones meteorológicas provenientes de varias fuentes, dentro de ellas se mencionan las siguientes:
 - Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH)
 - Instituto Nacional de Electrificación (INDE)
 - Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC)

³ El netCDF(Network Common Data Format) (formulario de datos comunes en red) es un formato de archivo destinado a almacenar datos científicos multidimensionales (variables) como la temperatura, la humedad, la presión, la velocidad del viento y la dirección. Cada una de estas variables se puede mostrar mediante una dimensión (por ejemplo, tiempo).

Las variables de interés que fueron obtenidas y utilizadas para la validación de los diferentes escenarios climáticos, fueron la precipitación y temperatura en forma mensual. Para el efecto se utilizaron datos correspondientes al período de tiempo comprendido entre los años 2001 al 2013, los cuales sirvieron para comparar con los datos de salida generados por la UNL.

2.5.1.2 Fase de ejecución

Extracción de datos a partir de archivos de salida generados por la Universidad Nebraska-Lincoln (UNL)

a. Generación de raster a partir de archivo netCDF.

- *Despliegue del archivo netCDF en ArcGis 4 10®.*

El uso del programa ArcGis 10® fue fundamental para la realización de esta actividad, a través de herramientas contenidas dentro de este software tales como: ArcToolBox, ArcCatalogo.

Como se mencionó con anterioridad los datos de salida generados por la UNL, se encuentran en formato NetCDF (Network Common Data Format). La característica de este formato es que contiene la suficiente información para poder saber qué clase de dato se encuentra en el archivo (tipo de variable, unidades, dimensiones, institución que la creo, etc) a diferencia de otros formatos que necesitan de un archivo adicional para su correcta interpretación. (Mosquera, 2006)

Dentro de la caja de herramientas (ArcToolbox) de ArcGis 10® se encuentra una herramienta secundaria llamada “Herramientas de multidimensión”, dentro de esta se encuentra la extensión llamada “Crear una capa raster NetCDF”, se procedió a cargar el

⁴ ArcGIS es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. Como la plataforma líder mundial para crear y utilizar sistemas de información geográfica (SIG). En ICC se cuenta con licencia respectiva para utilizar ArcGis 10 por lo que se utilizó el software original.

archivo de salida en el programa ArcGis 10®, lo que permitió la visualización del archivo en un formato raster lo que permite su mejor manipulación dentro del programa. (Ver Figura 9)

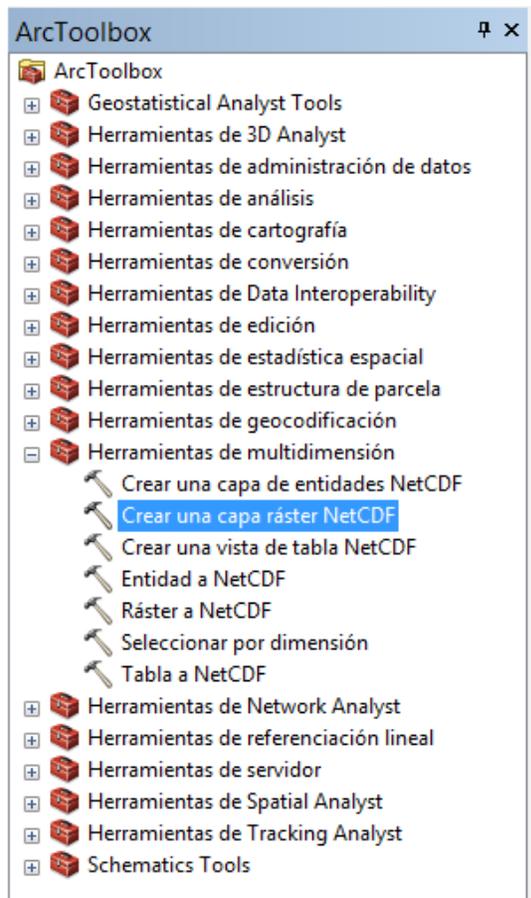


Figura 9 Representación gráfica de la opción herramientas de multidimensión.

Una vez abierta esta herramienta se desplegó una ventana donde se puede describir lo siguiente:

En el primer recuadro se solicita el archivo de entrada netCDF, acá es donde se cargó el archivo de salida que contiene el escenario para un determinado año. En el siguiente recuadro (variable) se elige la variable con la que se desea cargar la capa raster, acá se puede seleccionar entre precipitación, temperatura máxima media y mínima.

En el recuadro de “Dimensión X” se elige la dimensión para definir las coordenadas de longitud de la capa de salida. En el recuadro de “Dimensión Y” se elige la dimensión para definir las coordenadas de latitud de la capa de salida. En el recuadro “Capa ráster de salida” se le asigna el nombre a la capa que el programa ha de desplegar en pantalla.

La opción “Dimensión de banda” es utilizada si se requiere una capa ráster multibanda. Los archivos de salida generados utilizan esta opción asignándole a cada uno de los 12 meses de los años correspondientes una banda; en otras palabras esta opción nos permite que una vez habiendo trabajado por ejemplo el mes de enero del año 2001, bastaba con ir a las propiedades de la capa y seleccionar el mes siguiente para evitar estar cargando capa por capa de cada mes correspondiente.

La opción “Valores de dimensión” no es indispensable usarla en estos casos para poder visualizar la capa que queremos generar. Por ultimo tenemos la opción “Método de valor de selección” acá es donde se elige el método de selección del valor de dimensión, acá se encuentran dos opciones:

By Value (por valor): El valor de entrada es el valor real de la dimensión.

By Index (por índice): el valor de entrada es la posición o índice de un valor de dimensión.

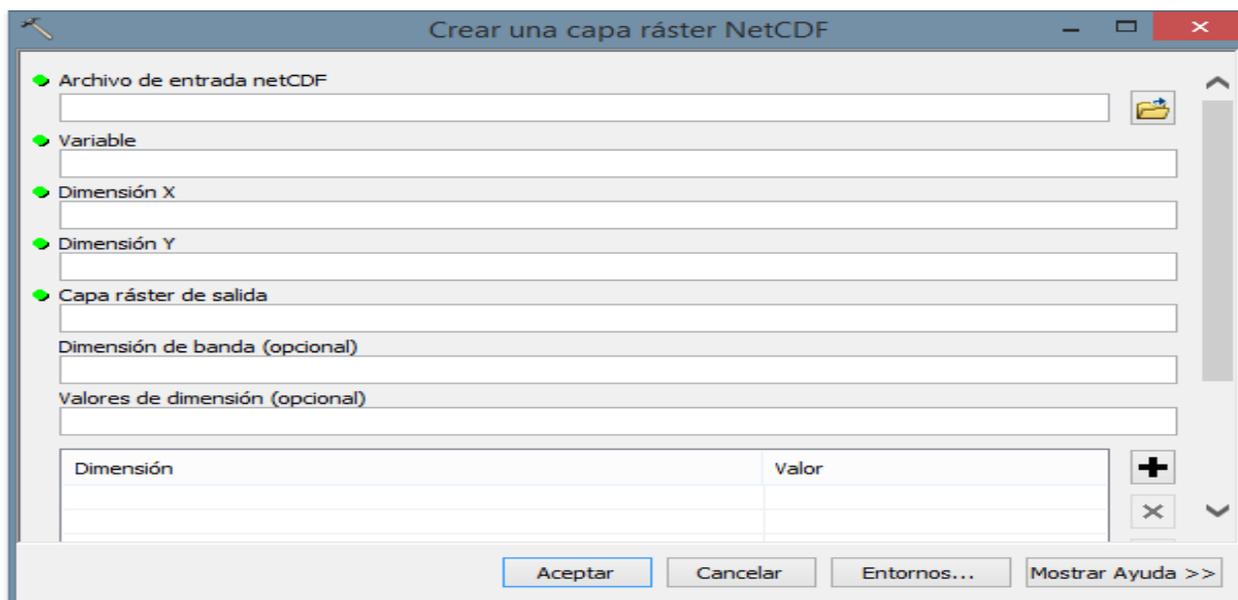


Figura 10 Creación de una capa raster NetCDF a partir de un archivo en formato NetCDF.

Como resultado final de esta operación se carga el archivo en formato ráster NetCDF en el programa, desplegándolo según la figura 11.

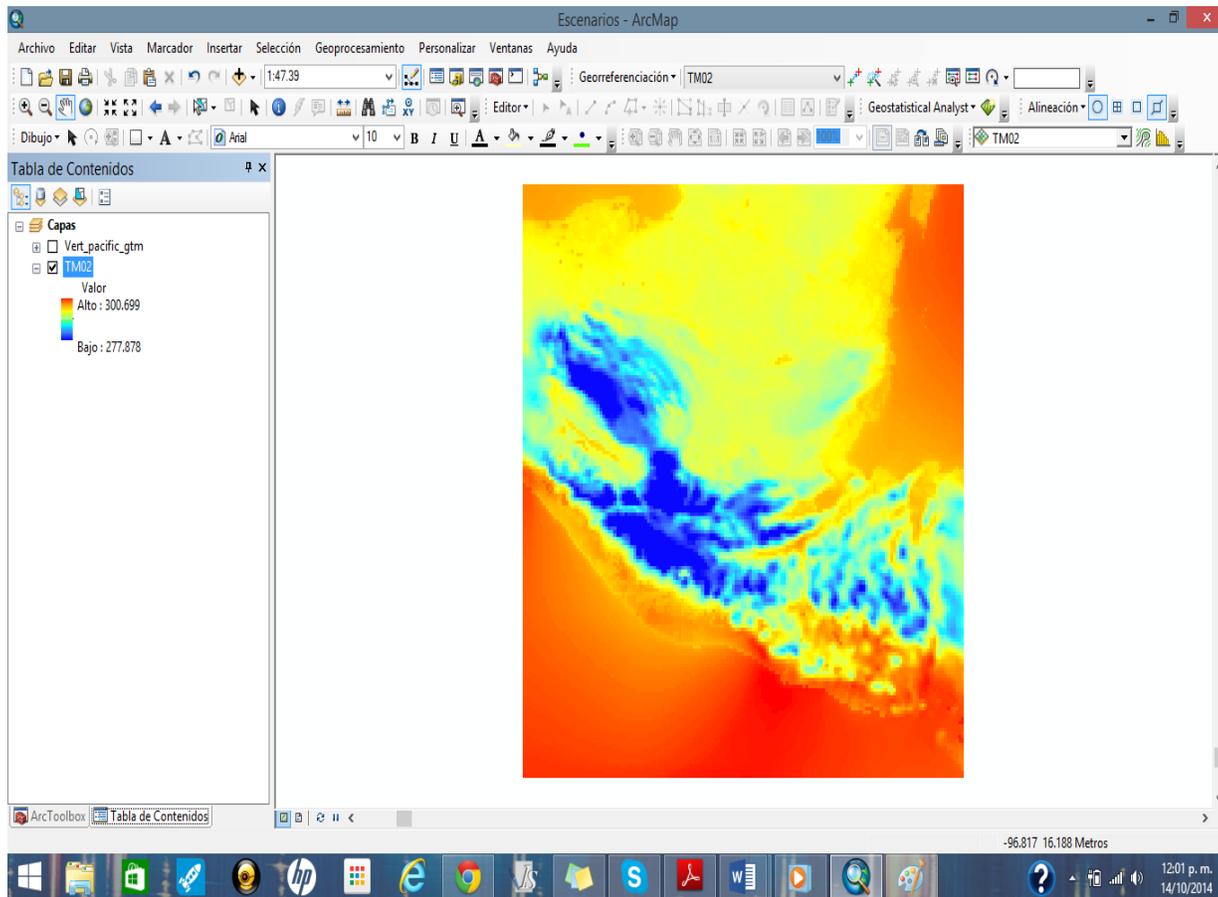


Figura 11 Archivo en formato raster generado a partir del formato NetCDF

b. Conversión del archivo raster netCDF a formato raster

Para poder darle una mejor manipulación al archivo, fue necesario realizar una conversión desde netCDF a formato raster, esto con la finalidad de poder realizar mejor la extracción de los valores de cada pixel y especialmente para poder geo referenciar la imagen esto para poder ubicar sobre el archivo resultante la vertiente del pacífico de Guatemala y las estaciones meteorológicas utilizadas para la validación.

Para llevar a cabo este proceso era necesario desplegar las propiedades de dicho archivo (clic derecho sobre el archivo), luego menú datos y exportar. (Ver Figura 12)

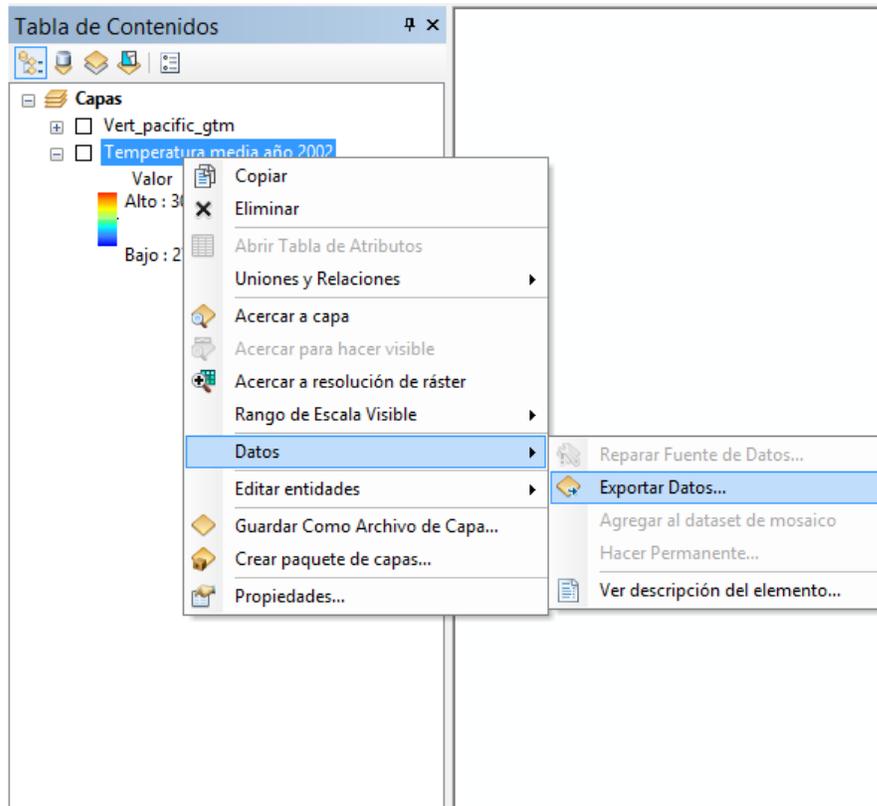


Figura 12 Opciones para convertir un archivo raster NetCDF a formato raster.

En el menú exportar únicamente se eligió la ubicación donde se deseaba guardar el raster, finalizando así esta operación. (Ver Figura 13)

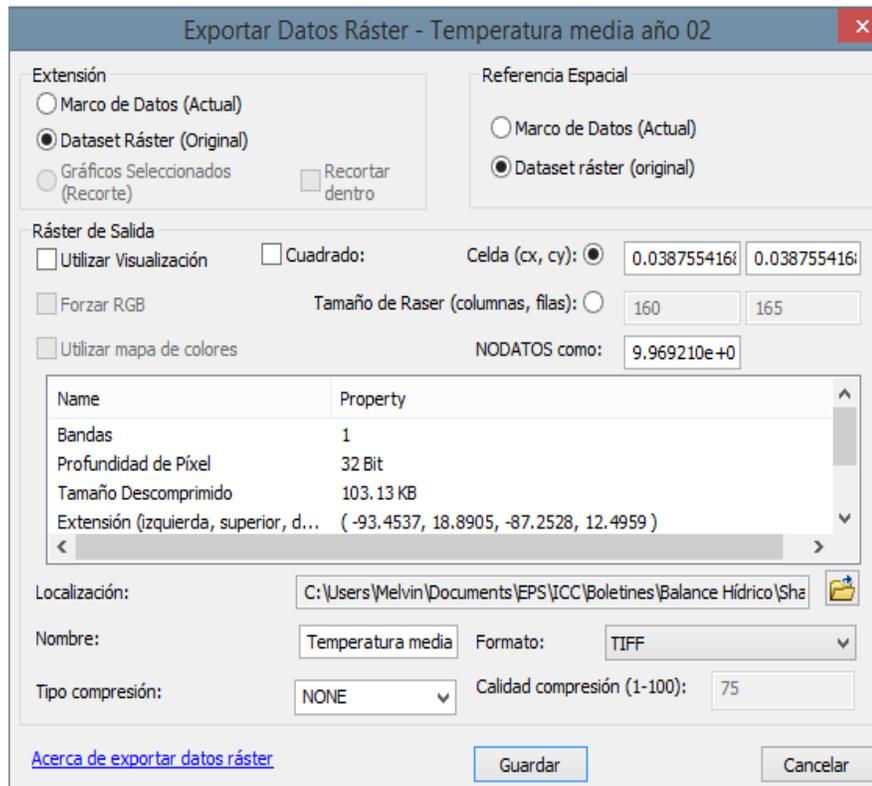


Figura 13 Representación de las opciones para convertir un archivo raster NetCDF a raster.

Después de esto automáticamente se cargó el archivo en formato ráster en el programa.

Vale la pena mencionar que este procedimiento se realizó para cada mes de los diferentes años utilizados para la validación. Por lo tanto de cada año, únicamente se seleccionó el mes correspondiente que se deseaba exportar, realizando el mismo proceso descrito con anterioridad.

Para seleccionar el mes correspondiente a trabajar únicamente fue necesario dar clic derecho sobre las propiedades de la capa, seleccionar la pestaña NetCDF y luego en valores de la banda seleccionar el valor de cada mes correspondiente según el número asignado a cada uno. (Ver Figura 14)

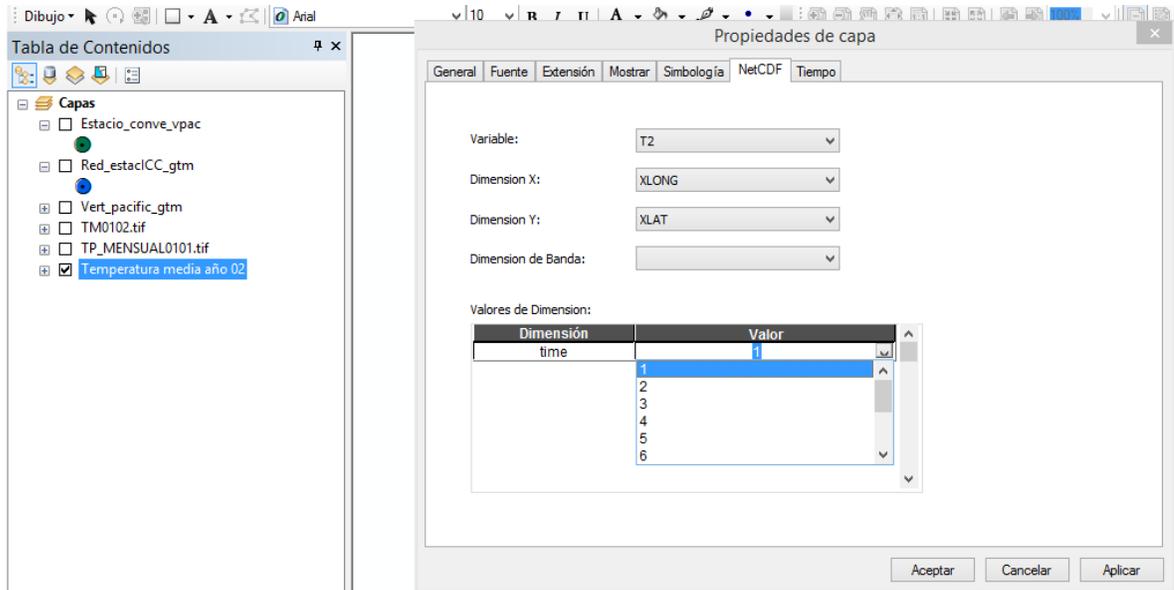


Figura 14 Representación de la forma en que se puede seleccionar el mes a trabajar.

c. Georreferenciación de archivo raster en función de la vertiente del pacífico.

Una vez cargado el archivo en formato ráster fue necesario definir el sistema de coordenadas a utilizar, para lo cual se utilizó la barra de herramientas Georreferenciación⁵.

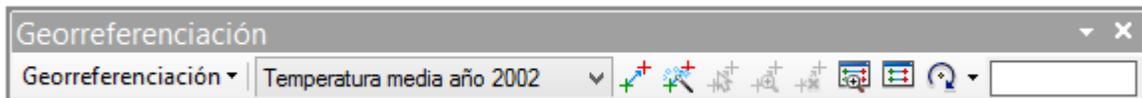


Figura 15 Opciones que se encuentran de la barra de georreferenciación

El proceso para realizar la georreferenciación fue el siguiente:

⁵ La georreferenciación es una técnica geográfica, que consiste en asignar mediante cualquier medio técnico apropiado, una serie de coordenadas geográficas procedentes de una imagen de referencia conocida, a una imagen digital de destino. Estas coordenadas geográficas reemplazaran a las coordenadas graficas propias de una imagen digital en cada píxel, sin alterar ningún otro atributo de la imagen original

- Se cargó el shape de la vertiente del pacífico de Guatemala, con el Datúm WGS 1984 y el sistema de coordenadas GTM (Guatemala Transversal de Mercator).
- Una vez cargado este shape, se procedió a georeferenciar el raster, utilizando la barra de georeferenciación. En la opción “Encajar Para Mostrar”, nos permite visualizar al mismo tiempo el raster que vamos a georeferenciar. (Figura 16)

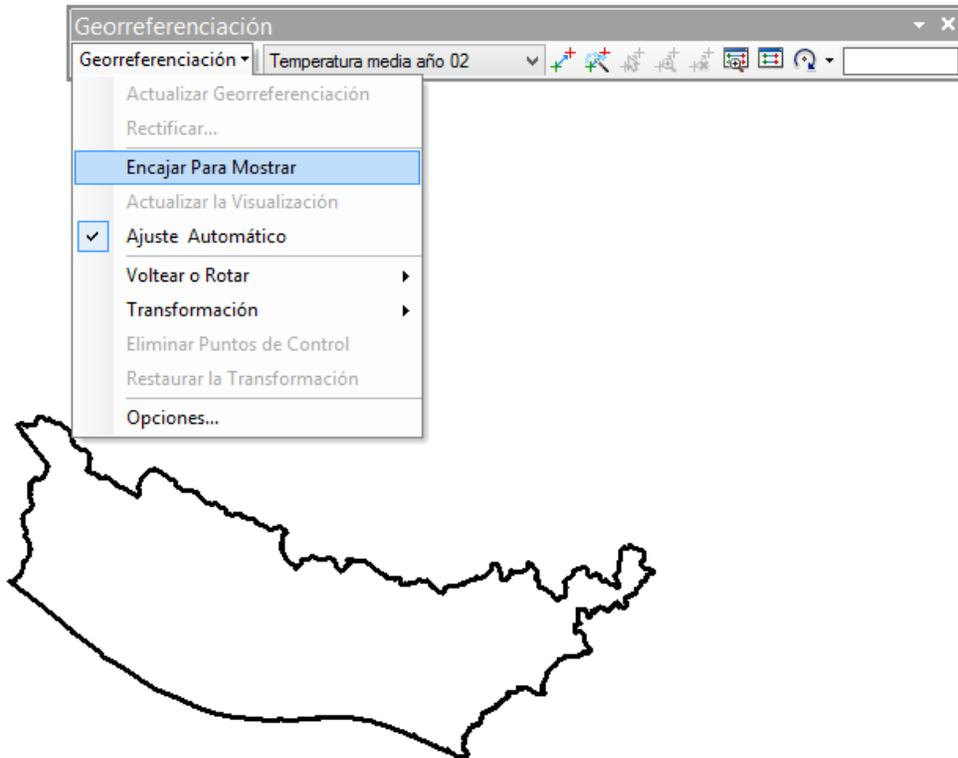


Figura 16 Herramienta utilizada para georeferenciar el raster en base al shape de referencia.

- Como resultado de esta operación se despliega en pantalla el raster que se va a georeferenciar en base a la vertiente del Pacífico de Guatemala. (Figura 17)

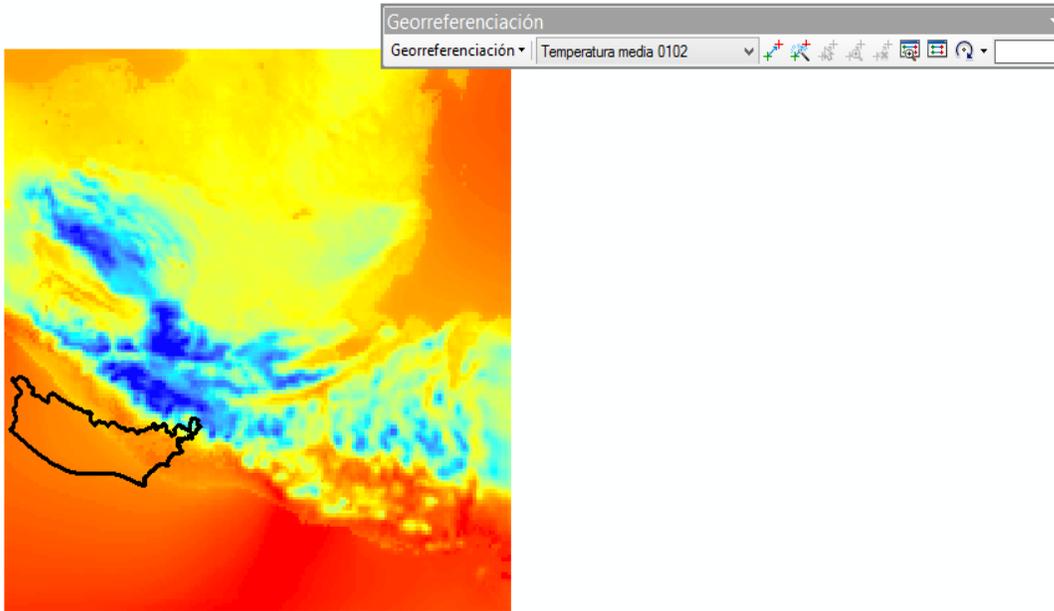


Figura 17 Archivo raster a ser georreferenciado en base a shape con coordenadas definidas.

- Para poder completar la georreferenciación y poder asignarle las coordenadas al raster se hizo uso de las herramientas que se encuentran en la barra de georreferenciación. Las opciones más utilizadas para este propósito son las siguientes:

Cambiar:

La primera nos permite mover el raster hasta llevarlo a “encajar” con el shape de la vertiente.

Escala:

Esta opción nos permite ir cambiando la escala del raster lo que facilitara que este se acople al shape de la vertiente.



Figura 18 Barra de herramientas para georreferenciar un ráster.

- La georreferenciación se lleva a cabo con éxito cuando el ráster encaja con el shape de la vertiente del Pacífico, por lo que al final cuando esto sucede dentro de la barra de georreferenciación la opción “actualizar georreferenciación” nos permite terminar el proceso.

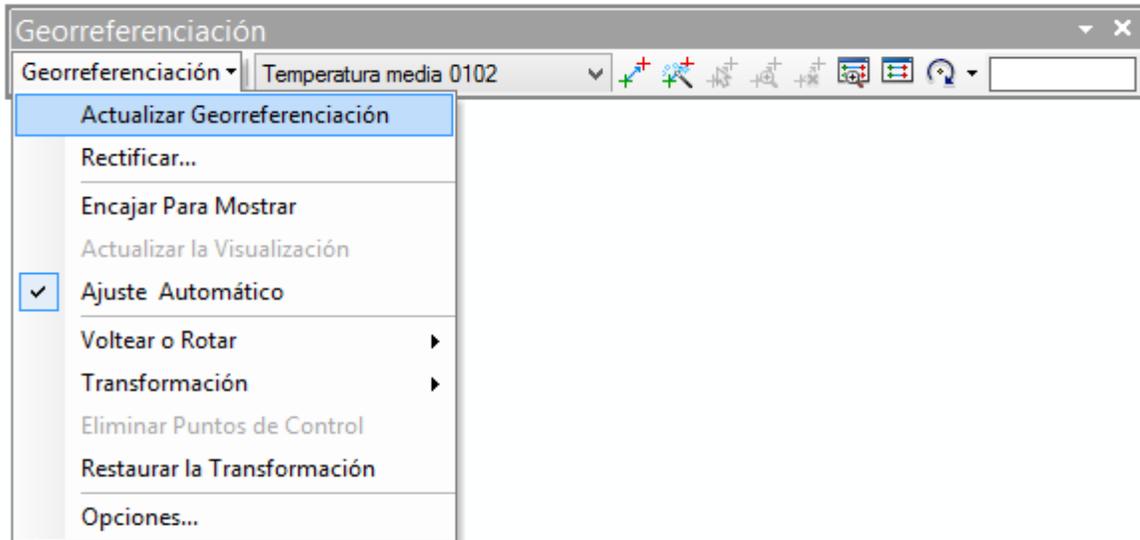


Figura 19 opciones disponibles dentro de la barra de georreferenciación.

- Como resultado final se obtiene el raster encajado con el shape de la vertiente del Pacífico, adoptando las coordenadas establecidas previamente por el shape.

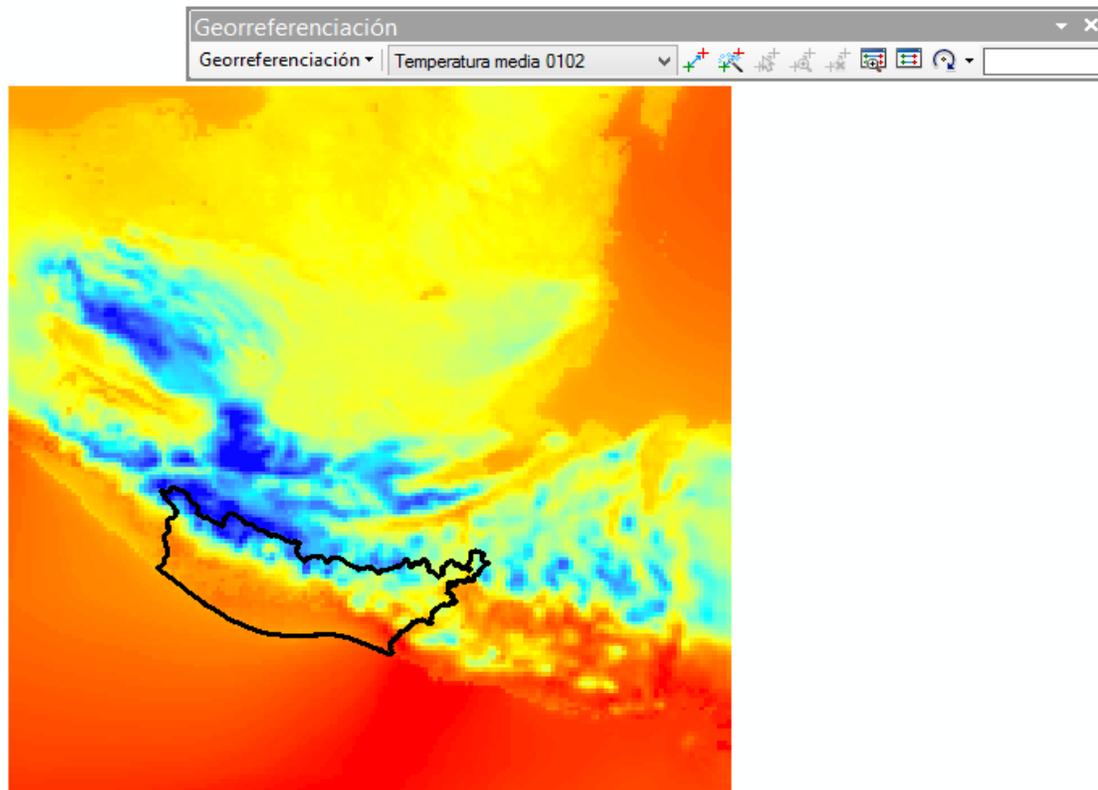


Figura 20 Resultado final del proceso de georreferenciación

d) Extracción de los valores a partir de las estaciones meteorológicas utilizadas para la validación.

Una vez teniendo el raster georreferenciado incluyendo la vertiente del Pacífico, fue necesario agregar el shape de cada grupo de estaciones meteorológicas utilizadas para tal fin. Las estaciones utilizadas corresponden a Instituciones tales como:

- Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC)
- Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH)
- Instituto Nacional de Electrificación (INDE)

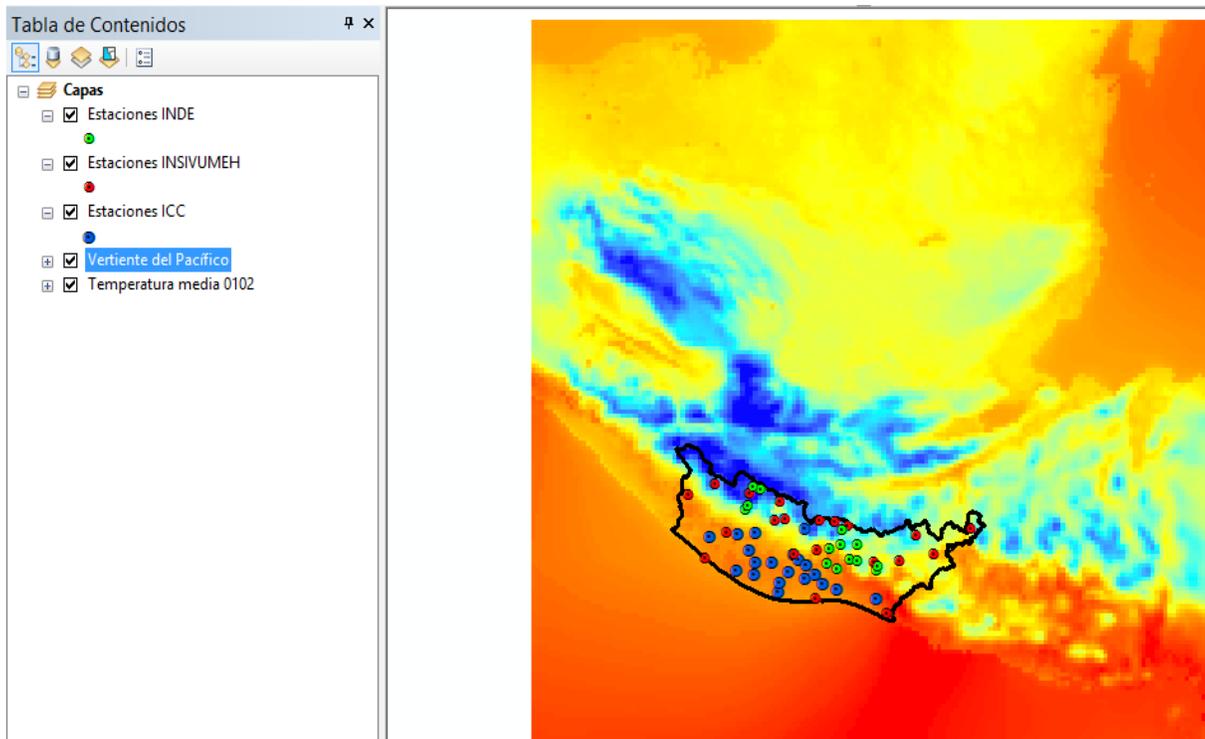


Figura 21 Estaciones meteorológicas utilizadas para el proceso de validación.

Para realizar la extracción de los valores de temperatura media y precipitación por cada estación, se realizó el siguiente proceso:

- Usando la herramienta de Spatial Analyst (contenida dentro de ArcToolbox), en la opción Extracción, se seleccionó la opción Extraer valores múltiples a puntos.

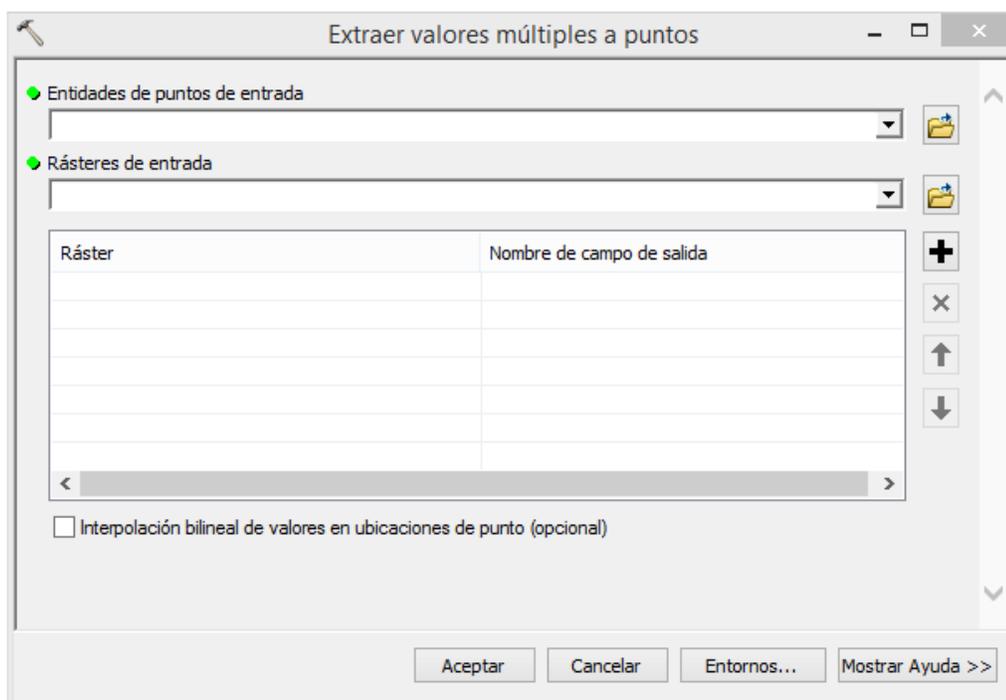


Figura 22 Herramienta utilizada para la extracción de los valores de las variables de interés

- En la primera opción se cargaron los puntos (la red de estaciones meteorológicas usadas para la validación). Acá es importante mencionar que solo se puede seleccionar un grupo de estaciones por lo que si se encuentran agrupadas según la Institución a la que pertenecen, la operación de extracción se debe repetir según los grupos de estaciones que se tengan. Para el presente caso, se repitió 3 veces (Estaciones agrupadas: ICC, INSIVUMEH e INDE).
- En la segunda opción se seleccionaron los raster que contienen la información de temperatura media y precipitación, es importante mencionar que el programa nos permite seleccionar los 12 raster correspondientes para poder agilizar el proceso de extracción de la información.
- Al finalizar únicamente se dio clic en “Aceptar” y el proceso da inicio, luego de unos breves segundos la extracción habrá finalizado.

- Para observar los datos extraídos únicamente fue necesario abrir la tabla de atributos del shape de estaciones con el que se trabajó.

Tabla

Estaciones ICC

FID	no	estacion	codigo	longitud	latitud	TMED0108	TMED0208	TMED0308	TMED0408	TMED0508	TMED0608	TMED0708	TMED0808
0	1	Cengicaña	CEN-CEN	-91.055468	14.330962	295.566	296.719	297.416	298.697	298.67	297.413	297.142	297.16
1	2	Tehuantepec	LUT-TEH	-91.103443	14.168625	297.722	299.018	300.344	301.743	301.6	299.698	299.169	299.06
2	3	El Bálsamo	PAN-BAL	-91.003744	14.281468	296.166	297.405	298.297	299.473	299.554	298.029	297.677	297.66
3	4	Puyumate	TBU-PUY	-91.25991	14.261557	297.356	298.868	300.14	301.531	301.311	299.168	298.765	298.73
4	5	San Antonio el Valle	MAG-SAV	-91.200961	13.995364	297.073	298.231	299.899	300.934	301.149	299.692	299.199	299.15
5	6	Amazonas	SAA-AMA	-90.769984	14.066614	297.436	298.522	300.283	301.259	301.583	299.716	299.181	299.12
6	7	Trinidad San Diego	SDT-TRI	-90.844006	14.153762	297.658	298.712	300.497	301.878	301.68	299.608	298.886	299.06
7	8	Irianda	TBU-IRL	-91.426867	14.145889	297.717	299.02	300.411	301.817	301.762	299.708	299.1	299.12
8	9	Bonanza	LUT-BON	-91.187235	14.078341	297.244	298.565	300.255	301.611	301.656	299.756	299.241	299.13
9	10	Bouganvilla	MAG-BOU	-90.933352	14.11769	297.497	298.828	300.523	301.94	301.714	299.48	298.961	298.92
10	11	Naranjales	PAG-NRJ	-91.476996	14.365688	296.727	298.002	299.175	300.102	299.996	298.517	298.269	298.24
11	12	Petén Oficina	MAT-PEO	-91.411898	14.260987	297.733	299.066	300.477	301.772	301.702	299.698	299.239	299.21
12	13	Costa Brava	SDT-CBR	-90.920738	14.237773	297.342	298.535	299.853	301.324	300.922	298.893	297.81	297.80
13	14	Tululá	TUL-TLA	-91.586101	14.506967	296.317	297.508	298.49	299.51	299.187	297.875	297.747	297.85
14	15	Lorena	PAG-LOR	-91.419603	14.520233	296.652	297.758	298.754	299.784	299.656	298.221	296.904	296.85
15	16	San Rafael	PAN-SRF	-90.634491	14.023491	297.313	298.461	300.202	301.24	301.688	299.814	299.312	299.25
16	17	Xolula	MAG-XOL	-91.861372	14.477242	296.969	298.162	299.381	300.549	300.335	298.826	298.551	298.65
17	18	San Nicolás	MAG-SNC	-91.603642	14.184544	297.95	298.984	300.267	301.634	301.651	299.988	299.355	299.44
18	19	Trinidad Magdalena	MAG-TMG	-90.25819	13.93207	298.662	299.369	301.067	301.925	301.651	300.044	299.613	299.47
19	20	El Platanar	ICC-PLT	-90.937833	14.559667	288.078	288.401	288.579	289.451	289.879	289.683	290.086	289.85

Figura 23 Tabla de atributos que muestra los valores obtenidos.

Es importante mencionar que el proceso fue el mismo para la extracción de datos de la variable de precipitación para cada uno de los meses de los diferentes años tomados en cuenta para la validación.

e) Generación de la base de datos utilizada para la validación

Una vez terminado con éxito el proceso de extracción de datos de las variables de temperatura media y precipitación, se procedió a generar a través del programa Microsoft Excel, una base de datos que permitiera de mejor manera conocer el dato observado (según los escenarios) y el dato real (según registros históricos de las estaciones meteorológicas).

Para lograr esto fue necesario lo siguiente:

- Una vez obtenida la tabla en el programa ArcGis, fue necesario exportarla al programa de Microsoft Excel, esto con la finalidad de que una vez teniendo estos datos en Excel, los datos pueden ser mejor manipulados y crear nuestra tabla final pudiera ser un proceso más rápido.
- Para exportar la tabla de ArcGis a Excel bastó con buscar el menú: Opciones de Tabla>Exportar y seleccionar la ubicación donde se quería guardar la tabla.

	latitud	TMED0108	TMED0208	TMED0308	TMED0408	TMED0508	TMED0608	TMED0708	TMED0804
3	14.330962	295.566	296.719	297.416	298.697	298.67	297.413	297.142	297.16
3	14.168625	297.722	299.018	300.344	301.743	301.6	299.698	299.169	299.06
4	14.281468	296.166	297.405	298.297	299.473	299.554	298.029	297.677	297.66
4	14.261557	297.356	298.868	300.14	301.531	301.311	299.168	298.765	298.75
1	13.995364	297.073	298.231	299.899	300.934	301.149	299.692	299.199	299.15
4	14.066614	297.436	298.522	300.283	301.259	301.583	299.716	299.181	299.12
5	14.153762	297.658	298.712	300.497	301.878	301.68	299.608	298.886	299.06
7	14.145889	297.717	299.02	300.411	301.817	301.762	299.708	299.1	299.12
5	14.078341	297.244	298.565	300.255	301.611	301.656	299.756	299.241	299.13
2	14.11769	297.497	298.828	300.523	301.94	301.714	299.48	298.961	298.92
5	14.365688	296.727	298.002	299.175	300.102	299.996	298.517	298.269	298.24
3	14.260987	297.733	299.066	300.477	301.772	301.702	299.698	299.239	299.21
3	14.237773	297.342	298.535	299.853	301.324	300.922	298.893	297.81	297.80
1	14.506967	296.317	297.508	298.49	299.51	299.187	297.875	297.747	297.85
3	14.520233	296.652	297.758	298.754	299.784	299.656	298.221	296.904	296.85
2	14.023491	297.313	298.461	300.202	301.24	301.688	299.814	299.312	299.26
2	14.477242	296.969	298.162	299.381	300.549	300.335	298.826	298.551	298.65
2	14.184544	297.95	298.984	300.267	301.634	301.651	299.988	299.355	299.44
9	13.93207	298.662	299.369	301.067	301.925	301.651	300.044	299.613	299.47
3	14.559667	288.078	288.401	288.579	289.451	289.879	289.683	290.086	289.85

Figura 24 Opción utilizada para exportar la tabla de atributos de ArcGis a Microsoft Excel.

- Al momento de exportar la tabla de datos fue necesario cambiar el formato de la tabla a formato dBase, siendo este el formato aceptado por Microsoft Excel.

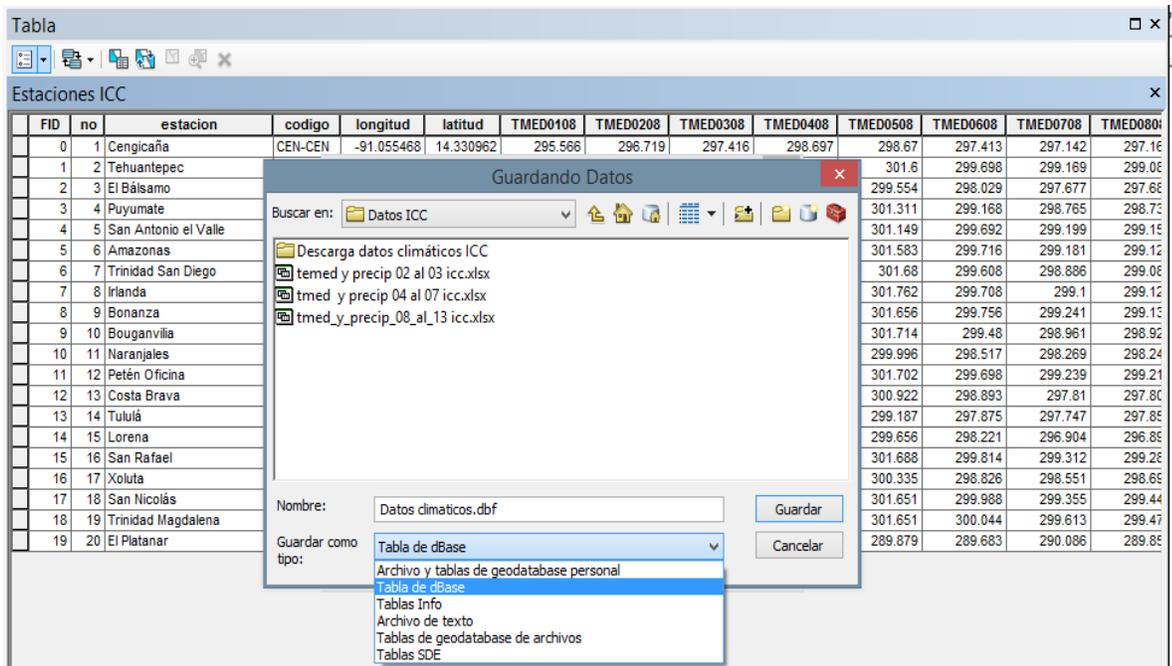


Figura 25 formato utilizado para exportar los datos desde ArcGis.

- Una vez finalizada la operación, nos permite abrir el archivo en formato dBase directamente en Microsoft Excel. De esta manera se obtienen los datos observados (según escenarios de cambio climático).
- Para obtener los datos reales (según las estaciones meteorológicas) se dispuso de los datos contenidos en los portales web de las instituciones que colaboraron. Para el presente caso, únicamente fue necesario descargar los registros históricos de ambas variables trabajadas (Temperatura media y precipitación) con los cuales se construyó la tabla final para la cual se realizó el análisis estadístico.

	A	B	C	D	E
1	ESTACION	MES	AÑO	TEMPERATURA ESTIMADA	TEMPERATURA REAL
2	Amazonas	Junio	2003	26.4	27.3
3	Amazonas	Julio	2003	26.5	27.9
4	Amazonas	Agosto	2003	26.7	27.9
5	Amazonas	Septiembre	2003	27.2	27.6
6	Amazonas	Octubre	2003	25.7	27.5

Figura 26 Tabla final para la realización de análisis estadísticos.

2.5.1.3 Métodos de análisis estadísticos para validación de modelos

Dentro de estos métodos se usaron los siguientes:

- a. Comparación visual de los datos

Dentro de esta etapa se generaron gráficos con base a las diferencias que presentan los datos observados (generados por la UNL en base al modelo) comparados con los datos reales que fueron obtenidos por medio de la validación.

- b. Prueba de t student

Esta prueba permitió comparar las medias de dos grupo de datos y determinar si entre estos parámetros las diferencias son estadísticamente significativas. Se utilizó para comparar las diferencias entre la media de los datos observados y los datos reales.

- c. Sesgo porcentual

Sesgo porcentual (Percent bias-PBIAS) es la tendencia promedio de los datos simulados de ser mayores o menores que los datos reales (Gupta et al., 1999) citado por Ocampo, 2012.

De esta forma se analizó cada uno de los datos de precipitación y temperatura a nivel mensual que fueron modelados contra datos de precipitación y temperatura mensual en datos reales, se pudo conocer que tan acertados fueron las modelaciones hechas para el período de tiempo 2001 a 2013.

2.5.2 Determinación del grado de incertidumbre de los modelos utilizados.

El grado de incertidumbre se basó en el cálculo del coeficiente de determinación mejor conocido como R^2 .

El coeficiente de determinación es la interpretación del coeficiente de correlación en términos de proporción de variabilidad compartida o explicada, donde se ofrece una idea más cabal de la magnitud de la relación. El coeficiente de determinación se define como el cuadrado del coeficiente de correlación.

Es importante recordar que el coeficiente de correlación refleja el grado de relación entre variables. Existen dos formas en que se puede interpretar el coeficiente de correlación.

La primera es el método “a simple vista”, en el que correlaciones con ciertos valores se asocian a cierto grado nominal de relación, de modo que

Las correlaciones entre se consideran

0.8 y 1	Muy fuertes
0.6 y 0.8	Fuertes
0.4 y 0.6	Moderadas
0.2 y 0.4	Débiles
0 y 0.2	Muy débiles

Un método más sólido para interpretar el coeficiente de correlación es elevar al cuadrado su valor y calcular el coeficiente de determinación. Este valor es la cantidad de varianza de una variable que se explica por la otra. En otras palabras este coeficiente nos permite estimar la cantidad de varianza que se pudo explicar en una variable examinando la cantidad de varianza de otra variable. (Neil, 1999)

2.6 RESULTADOS

2.6.1 Validación de escenarios de cambio climático

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la investigación.

a. Validación de las proyecciones de los escenarios de cambio climático planteados para Guatemala, mediante el uso de climatología local para precipitación y temperatura media a nivel mensual.

El proceso de validación de los escenarios fue centrado en el área de influencia de la Vertiente del Pacífico de Guatemala, los resultados de este proceso de validación son los siguientes:

2.6.1.1 Temperatura media:

Las proyecciones de los escenarios de cambio climático planteados por la Universidad Nebraska Lincoln demuestran los siguientes resultados.

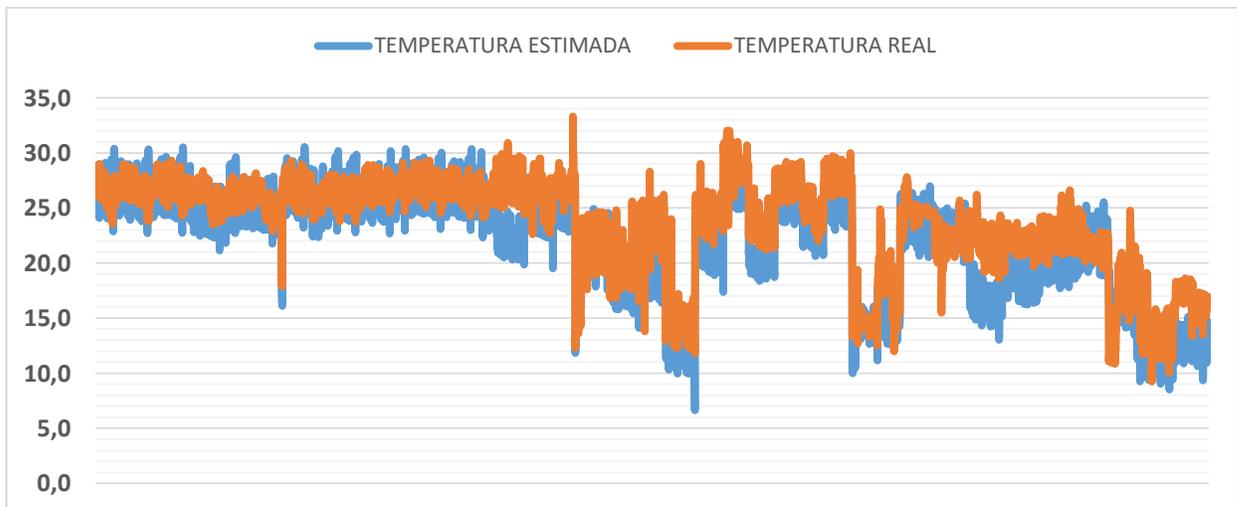


Figura 27 Comparación de resultados obtenidos temperatura media.

En la figura 28 se puede observar el comportamiento de la temperatura media estimada contra la temperatura media real, en este caso a lo largo de la serie de datos (eje x) el comportamiento de la temperatura estimada es muy similar al comportamiento de la temperatura real, en algunos casos la temperatura estimada tiende a sobre estimar los valores de temperatura real sin embargo la mayor parte de los datos de temperatura real son subestimados según el valor de temperatura estimada.

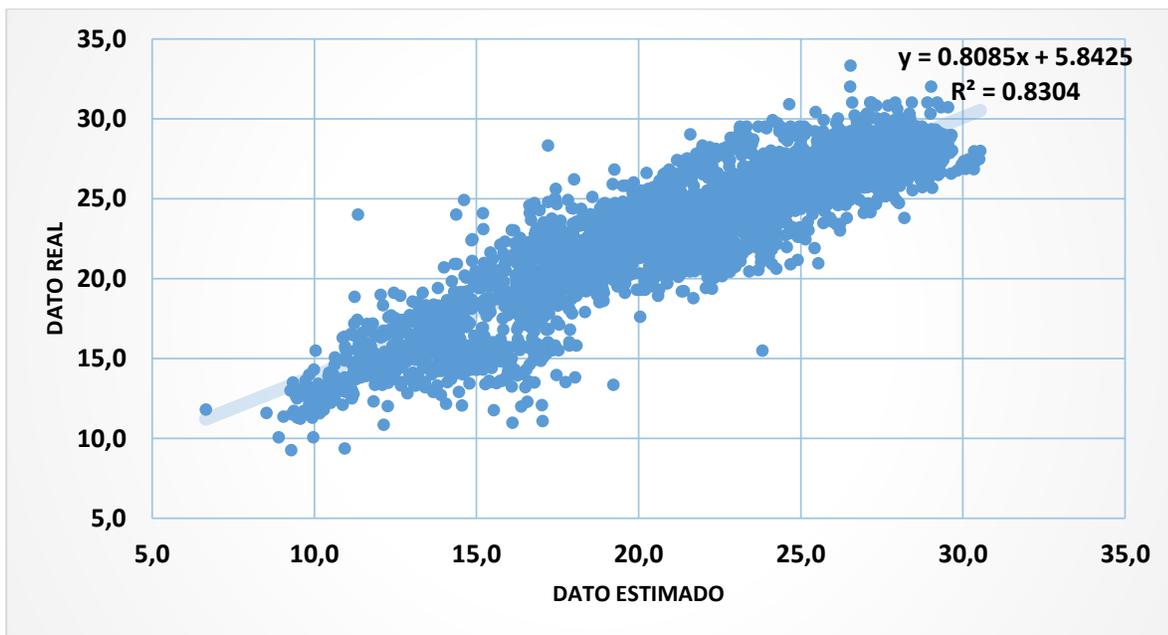


Figura 28 Resultados de correlación obtenidos para la variable de temperatura media.

La figura 28, muestra los resultados del análisis de correlación existente entre la variable de temperatura media estimada y temperatura media real, donde claramente se observa teniendo un coeficiente de determinación de 0.83 medimos el grado de la bondad de ajuste de los datos estimados contra los datos reales, en otras palabras tenemos que en un 83% la variación de la temperatura estimada puede ser explicada o relacionada con la variación de la temperatura real.

Sin embargo a pesar de tener un alto coeficiente de determinación se observa claramente en la figura 28 que la tendencia del modelo utilizado es de subestimar los datos reales, debido a que existe un sesgo mucho mayor hacia el eje x (dato estimado)

Esta información puede verse respaldada según el análisis estadístico de la prueba de t realizado.

Cuadro 8 Prueba t para la variable de temperatura media

	<i>TEMPERATURA ESTIMADA</i>	<i>TEMPERATURA REAL</i>
Media	22.03	23.65
Varianza	23.11	18.194
Coeficiente de Variación (%)	21.81	18.02
Coeficiente de correlación de Pearson	0.911	
Grados de libertad	4551	
Estadístico t	-55.15	
Valor crítico de t	1.96	

Elaboración propia

Según los resultados presentados en el cuadro 8 los datos de temperatura estimada presentan una mayor varianza en sus observaciones respecto al valor de la varianza de los datos de temperatura real.

El coeficiente de correlación obtenido para la temperatura media estimada corresponde a un valor de 21.81% mientras que para la temperatura real tiene un valor de 18.02% lo que nos indica que existe una mayor variabilidad en los datos de la temperatura estimada que está dada por los valores obtenidos a partir de los escenarios de cambio climático.

La correlación de Pearson es uno de los coeficientes de relación estadística más usados en todas las disciplinas científicas. Este coeficiente indica el grado de relación existente entre dos variables. Una correlación perfecta positiva tomará un valor de 1 e indicará que a

medida que los valores de una variable aumentan, también aumentan los de la otra en la misma proporción.

En este caso el coeficiente de correlación de Pearson para el análisis de la variable de temperatura media presenta un valor de 0.911 que si es comparado con el valor crítico en una tabla de “r” de Pearson (0.165), nos confirma que existe una alta correlación entre los datos estimados y los datos reales.

En el caso de los resultados obtenidos según la prueba de t, un estadístico t con un valor de -55.15, siendo este menor que el valor crítico de t 1.96 indica que aunque la diferencia entre las medias del dato estimado y el dato real sea mínima (-1.28) estadísticamente la prueba de t confirma que el valor de la media del dato estimado tiende a ser subestimado respecto al valor que se tiene del dato real, por lo que estadísticamente las medias presentan diferencias significativas.

2.6.1.2 Sesgo porcentual obtenido:

Un indicador muy importante de que tan bueno puede ser un modelo es el Sesgo porcentual.

El sesgo porcentual (Percent bias-PBIAS) es la tendencia promedio de los datos simulados de ser mayores o menores que los datos observados (Gupta et al., 1999)

A través del uso de la presente formula se determinó el sesgo porcentual de los datos de temperatura media a nivel de vertiente.

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (D_i^{observado} - D_i^{simulado})}{\sum_{i=1}^n (D_i^{observado})} \right] * 100$$

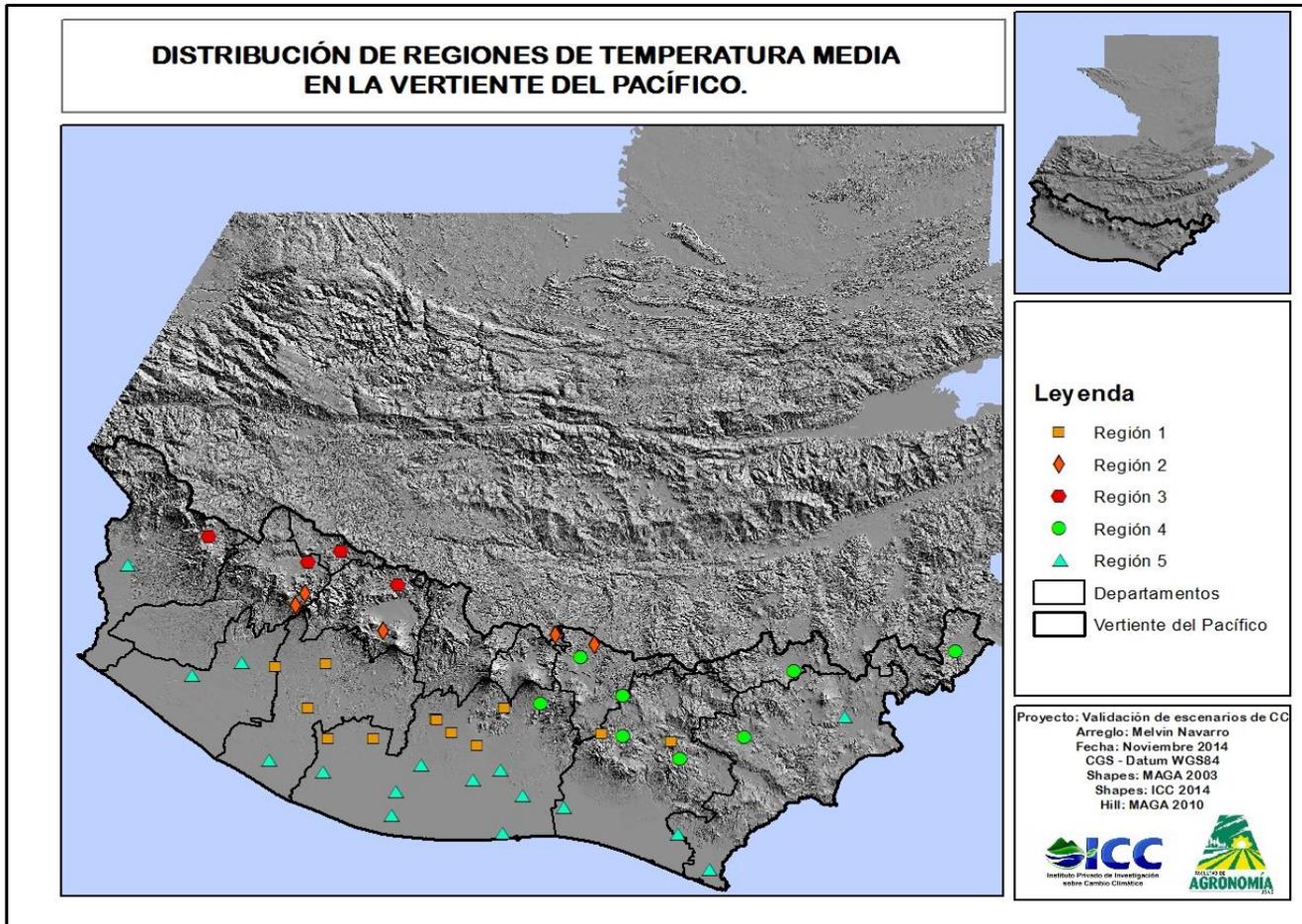
El resultado del sesgo porcentual de los datos analizados fue de 6.853, según los criterios de Moriasi et.al. (2007), un sesgo porcentual menor de 10 indica que el modelo utilizado para crear los escenarios de cambio climático tienen una certeza muy buena especialmente para la variable de temperatura media a nivel de vertiente del pacífico.

2.6.1.3 Validación de la temperatura media según regionalización climática.

En el año 2013, se llevó a cabo el estudio “Regionalización climática de la Vertiente del Pacífico, Guatemala, CA”, estudio que consistió en evaluar registros históricos del comportamiento de las variables climáticas a nivel de vertiente, esto con la finalidad de poder crear regiones que tengan un comportamiento homogéneo.

Es importante hacer énfasis que la regionalización es un proceso muy importante en temas de escenarios de cambio climático debido a que a partir del proceso de regionalización climática los escenarios de cambio climático pueden ser trasladados de una escala de modelación global a una escala regional, lo cual permitirá conocer de mejor forma los resultados que se esperan según los escenarios.

La regionalización para temperatura media fue calculada a través del programa Infostat, para posteriormente conocer las estaciones que fueron agrupadas según la forma en las que estas se relacionan, para el caso de temperatura media se trabajó con 5 regiones.



Fuente: Elaboración propia, con datos ICC 2013.

Figura 29 Distribución de regiones para temperatura media utilizadas para la validación

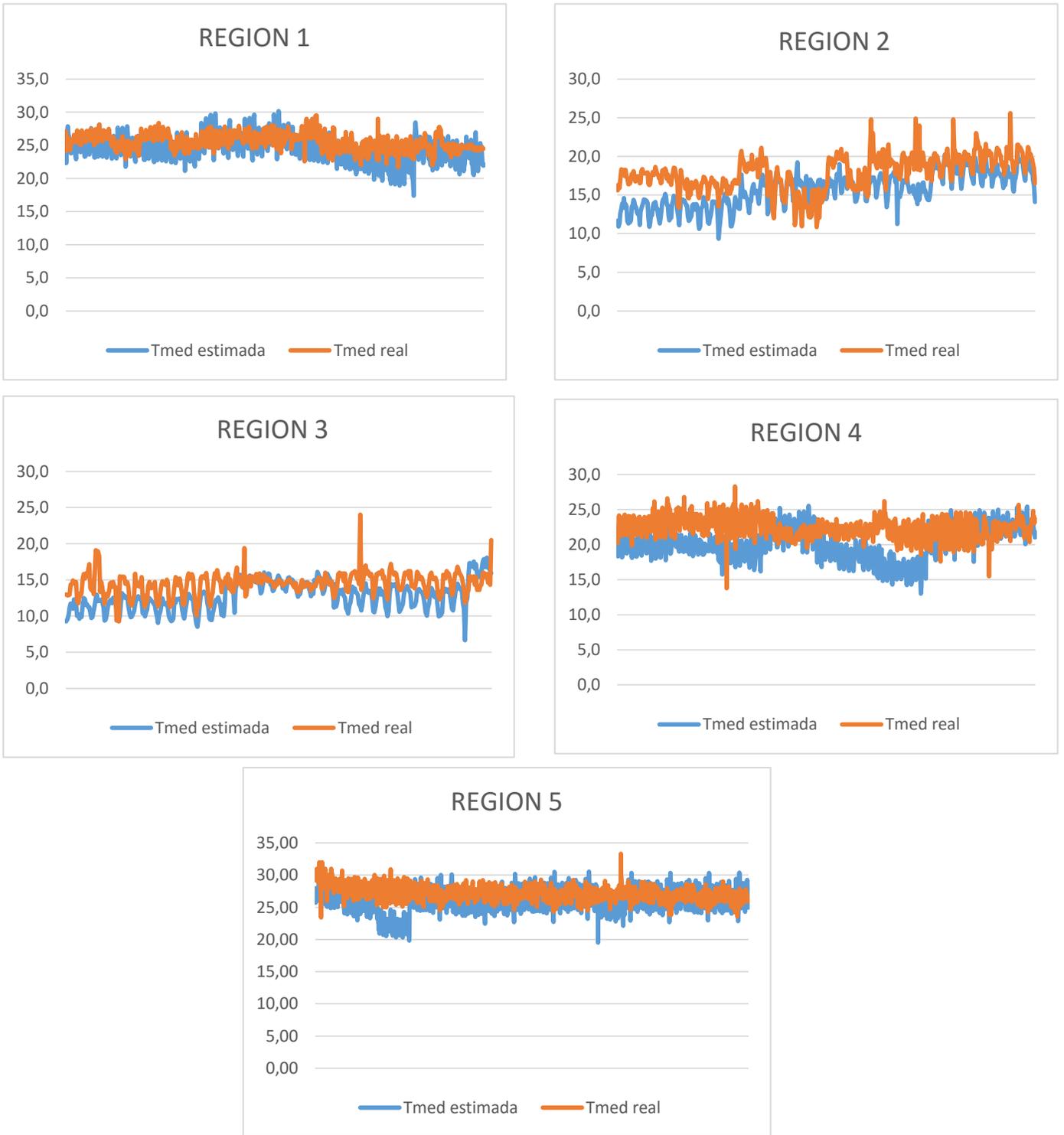


Figura 30 Comparación de temperatura estimada con la temperatura real por cada región.

Como se observa en los gráficos de líneas presentados anteriormente si el análisis se realiza a nivel de regiones, los datos parecen no ser tan acertados como cuando se analizan a nivel de gran vertiente. Aunque existen regiones donde aparentemente pareciera que los datos estimados no varían mucho respecto a los datos reales.

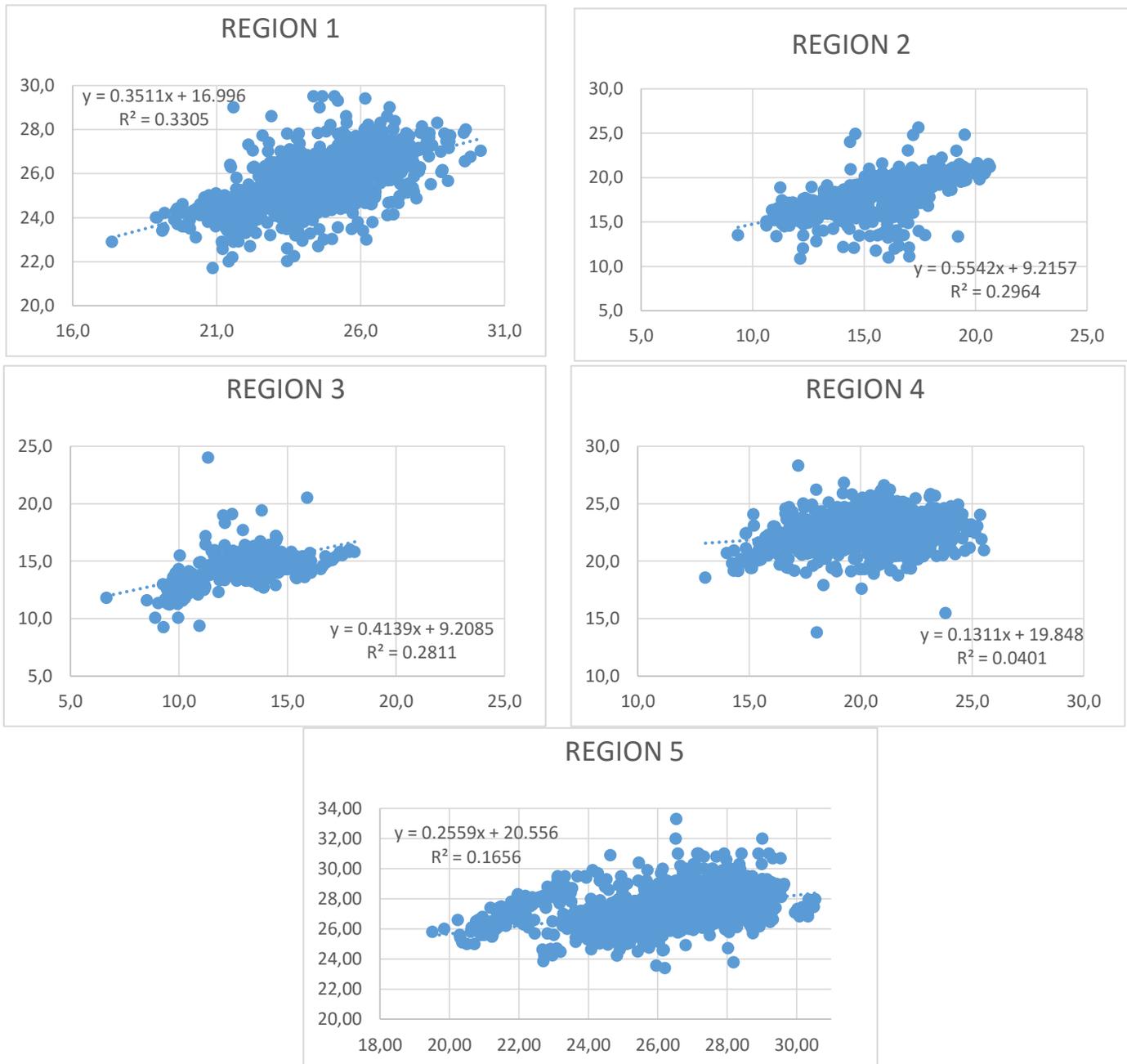


Figura 31 Correlación de resultados obtenidos a nivel de regiones para temperatura media.

Según el análisis de correlación realizado en los datos a nivel de región se muestra claramente en los gráficos de dispersión que la variabilidad aumenta al momento que el análisis se centra a nivel de regiones, esto debido a que existen una gran cantidad de micro climas que juegan un papel importante dentro de la Vertiente del Pacífico, por lo que a una escala de menor tamaño los escenarios de cambio climático van perdiendo certeza.

Cuadro 9 Resumen de pruebas de t para las regiones de temperatura media.

	Región 1		Región 2		Región 3		Región 4		Región 5	
	<i>Estimada</i>	<i>Real</i>								
Media	24.40	25.56	15.63	17.88	12.79	14.50	20.14	22.49	25.96	27.20
Varianza	3.78	1.41	4.93	5.11	3.75	2.29	4.89	2.09	3.43	1.35
Coefficiente de Variación (%)	7.97	4.64	14.21	12.64	15.15	10.43	10.98	6.44	7.13	4.28
Coefficiente de correlación de Pearson	0.575		0.544		0.530		0.200		0.407	
Grados de libertad	1076		476		389		1042		1560	
Estadístico t	-24.03		-22.97		-19.77		-31.76		-28.08	
Valor crítico de t	1.96		1.96		1.97		1.96		1.96	

Según el cuadro 9 los valores de varianza son mayores en los datos de temperatura estimada, partiendo de esto al obtener el valor de la desviación estándar dividiéndolo dentro del valor de la media obtenemos el coeficiente de variación para cada una de las regiones de temperatura media.

Según los valores obtenidos los datos de temperatura media estimada presentan una mayor variabilidad que los datos obtenidos a partir de las estaciones meteorológicas (dato real).

En base el valor crítico del coeficiente de correlación (0.165), todos los valores del coeficiente de correlación obtenidos tienden a ser mucho mayor al valor crítico (según tabla de “r” de Pearson). En la región 4 y 5 podrían considerarse las regiones en las que los escenarios de cambio climático tienen menos certeza, esto debido a que probablemente la relación entre las estaciones de estas regiones no está claramente definida y se vean influenciadas por otros factores climáticos que agregan más variabilidad a los datos estimados.

La prueba de t respectiva para cada región refleja que a nivel de regiones el modelo tiende a subestimar el valor de la temperatura media real, debido a que los valores del estadístico t son menores que el valor crítico, por lo que el sesgo negativo indica que si existe diferencia significativa entre las medias.

Es importante hacer notar para esto que, en la medida en que la escala espacial (de los escenarios) se reduce, la variabilidad climática aumenta, haciendo que la identificación de las señales antropogénicas desde la variabilidad natural subyacente sea cada vez más complicada. Además, el clima de una región determinada puede verse afectado por procesos que tienen lugar a grandes distancias, a través de los patrones de teleconexión. Como resultado de todos estos factores, las proyecciones de los cambios climáticos regionales y locales son extremadamente complicadas, y suelen caracterizarse por un alto grado de incertidumbre. (Giorgi, 2008)

2.6.1.4 Precipitación:

Para la variable de precipitación fue analizada de la misma manera que la variable de temperatura media, los resultados se presentan a continuación.

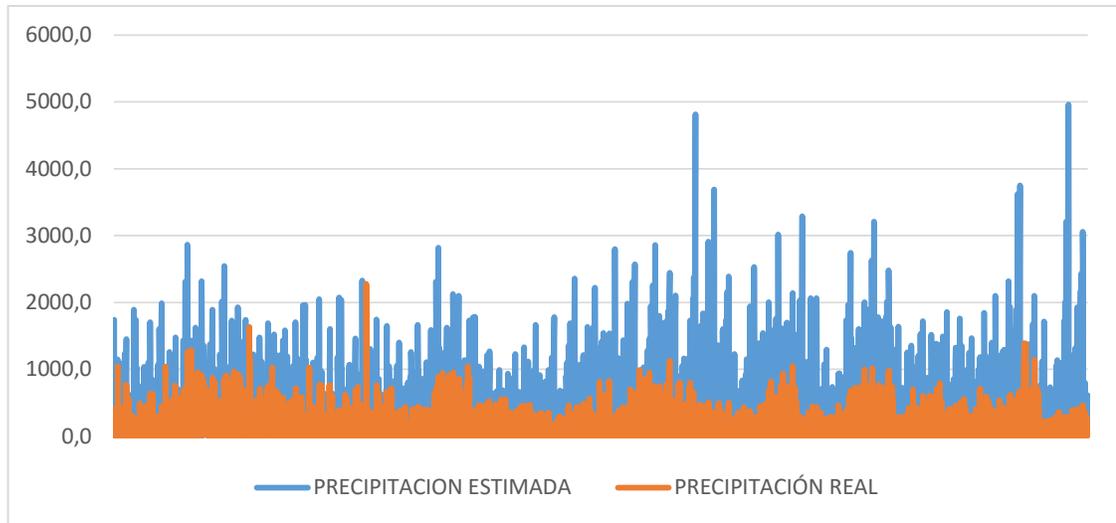


Figura 32 Comparación visual de resultados obtenidos para la variable de precipitación.

En el gráfico se puede contemplar claramente que en este caso la precipitación estimada en base a los escenarios de cambio climático sobreestiman el valor respecto a los valores reales que brindan las estaciones meteorológicas.

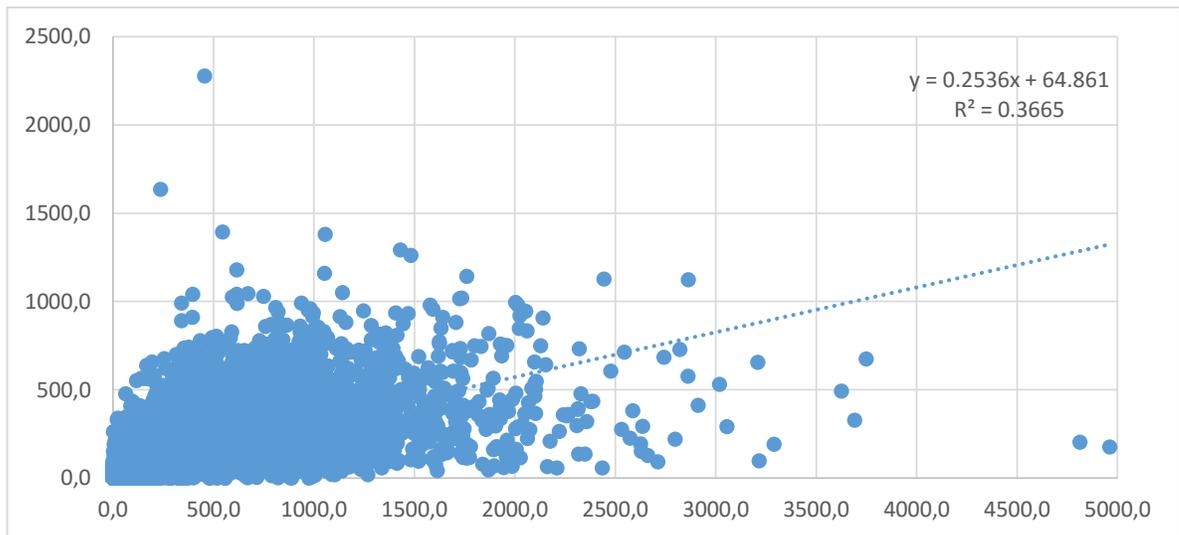


Figura 33 Resultados de correlación obtenidos para la variable de precipitación.

Cuadro 10 Prueba t para la variable de precipitación

	<i>PRECIPITACIÓN ESTIMADA</i>	<i>PRECIPITACIÓN REAL</i>
Media	398.2879637	165.8807369
Varianza	233835.2618	41045.87092
Coeficiente de variación (%)	121.41	122.13
Coeficiente de correlación de Pearson	0.605	
Grados de libertad	5726	
Estadístico t	44.49	
Valor crítico de t	1.96	

Los datos obtenidos para la variable de precipitación demuestran que existe una mayor variabilidad en la precipitación real (obtenida a partir de las estaciones meteorológicas), donde el valor difiere en un 0.72% respecto al valor de la precipitación estimada, aun así estos valores presentan una amplia variabilidad en los resultados.

Según el grafico de dispersión y la prueba de t para las muestras, ambas se correlacionan en un 60% según el coeficiente de correlación de Pearson (0.605), un valor que tiende a alejarse un poco de un valor 1 que indicaría una correlación perfecta.

El coeficiente de correlación de Pearson es mucho mayor respecto al valor obtenido a través de la tabla de valores críticos de r (0.165) lo que indica que existe una muy buena correlación entre los valores estimados y los valores reales.

Para la variable de precipitación la prueba de t, indica a través del valor obtenido de t calculada (44.49) siendo este un valor mucho mayor que t tabulada (1.96) que en este caso confirma que si existe diferencia significativa entre las medias de los datos de precipitación estimada y precipitación real.

Acá es importante mencionar que debido a que la precipitación es una variable muy específica y local los escenarios de cambio climático fueron construídos tomando en cuenta los eventos extremos que se han sucedido en los últimos años en el país, asumiendo esto

la Universidad de Nebraska Lincoln construyó estos escenarios asumiendo que dichos eventos extremos seguirían presentándose muy a menudo en el país, por eso es que como se observa en las gráficas, la precipitación estimada tiende a ser sobreestimada en algunos casos muy por encima de lo que los datos reales reportarón.

Para esto es interesante analizar el comportamiento histórico de la precipitación en el período 1961-2001 y ver como los eventos extremos en precipitación parecieran ser mas frecuentes en los últimos años (ver figura No 34).

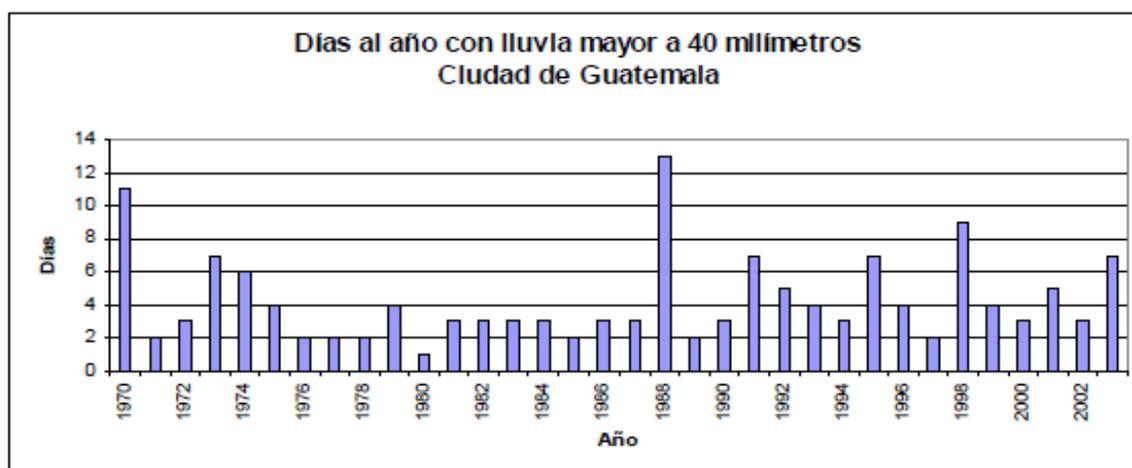


Figura 34 Días del año con lluvia mayor a 40 mm, ciudad Guatemala período 1970-2003

Fuente(MARN, 2007)

Es importante recordar que el clima de la región centroamericana es moldeado por una serie de manifestaciones atmosféricas principales como son; las ondas provenientes del este, los frentes fríos y la intrusión de masas de aire frío, las oscilaciones de la zona de convergencia intertropical, el tránsito de ciclones tropicales en el Océano atlántico y el mar Caribe y los sistemas ciclónicos que viajan paralelos al istmo y México a lo largo del Océano Pacífico. Cuando estas condiciones se acoplan con otras condiciones atmosféricas de otra escala de tiempo y espacio surgen los eventos climáticos extremos que tiene lugar en la región como las fuertes lluvias, inundaciones, deslizamientos de tierra y las sequías. Por lo que los eventos climáticos extremos en Centroamérica no son una excepción, sino que son

bastantes recurrentes, lo suficiente para convertirse en una situación normal para el istmo por lo que su impacto tiene importantes consecuencias sobre las condiciones sociales, económicas y ambientales de los habitantes de la región.

2.6.1.5 Sesgo porcentual para la variable de precipitación

Para los análisis a nivel de gran vertiente para la variable de precipitación se obtuvo un sesgo porcentual con un valor de: 140.10

Según los criterios nuevamente de Moriasi et. al. (2007) un sesgo porcentual con un valor de +/-25 nos brinda una interpretación no satisfactoria del modelo, en este caso el modelo climático regional utilizado tiene ciertas discrepancias en lo que es el dato estimado y los datos reales obtenidos, donde se confirma que para la variable de precipitación el modelo presenta una mayor incertidumbre que para temperatura media

2.6.1.6 Validación de la variable de precipitación según regionalización climática.

Al igual que el proceso de validación de la variable de temperatura media, para la variable de precipitación se procedió a calcular las agrupaciones o regiones que se tienen en la vertiente del pacífico en base a la distribución de las estaciones meteorológicas distribuidas en la vertiente.

En el siguiente mapa podrán observarse la distribución de las estaciones que fueron agrupadas según el análisis realizado en el programa Infostat.

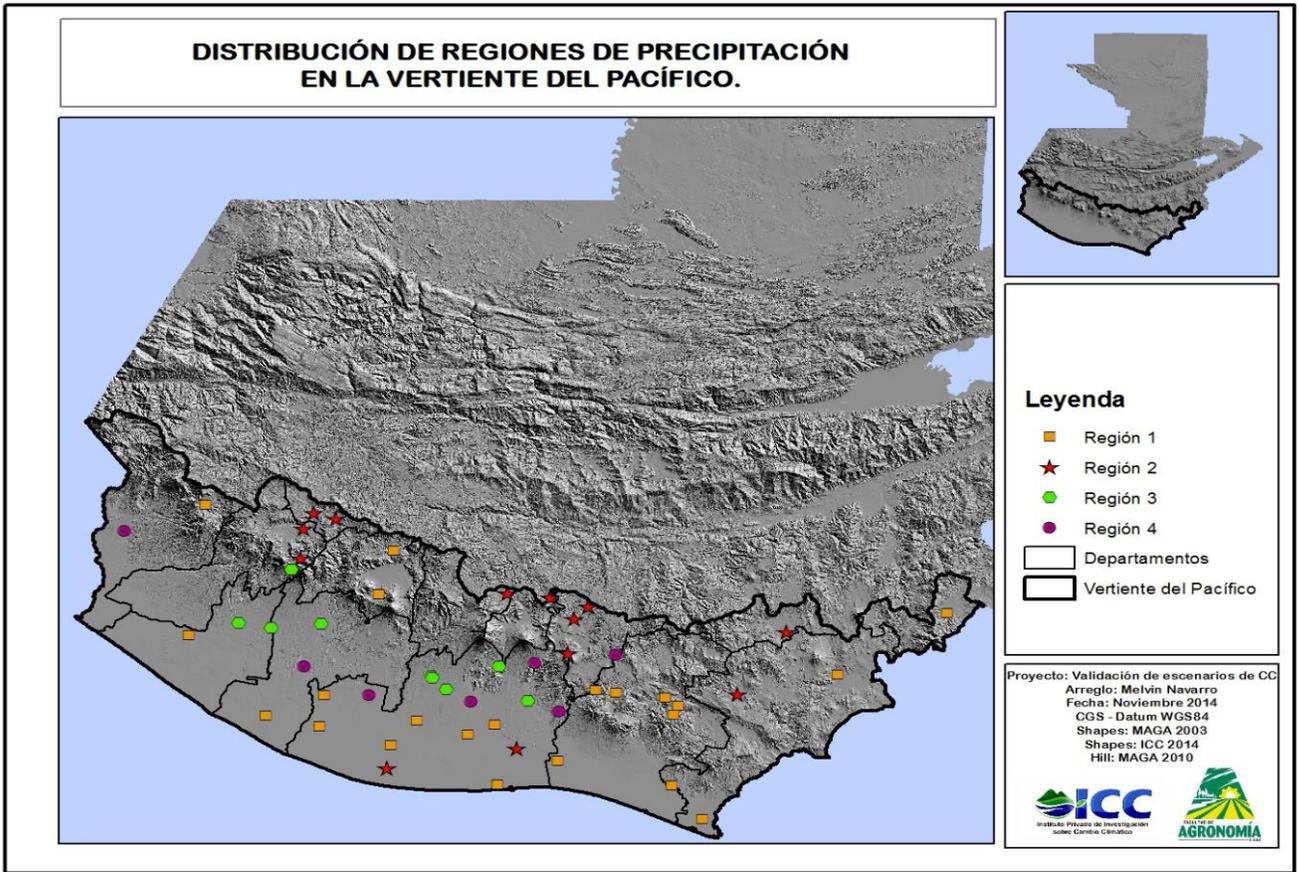


Figura 35 Distribución de regiones para precipitación utilizadas para la validación

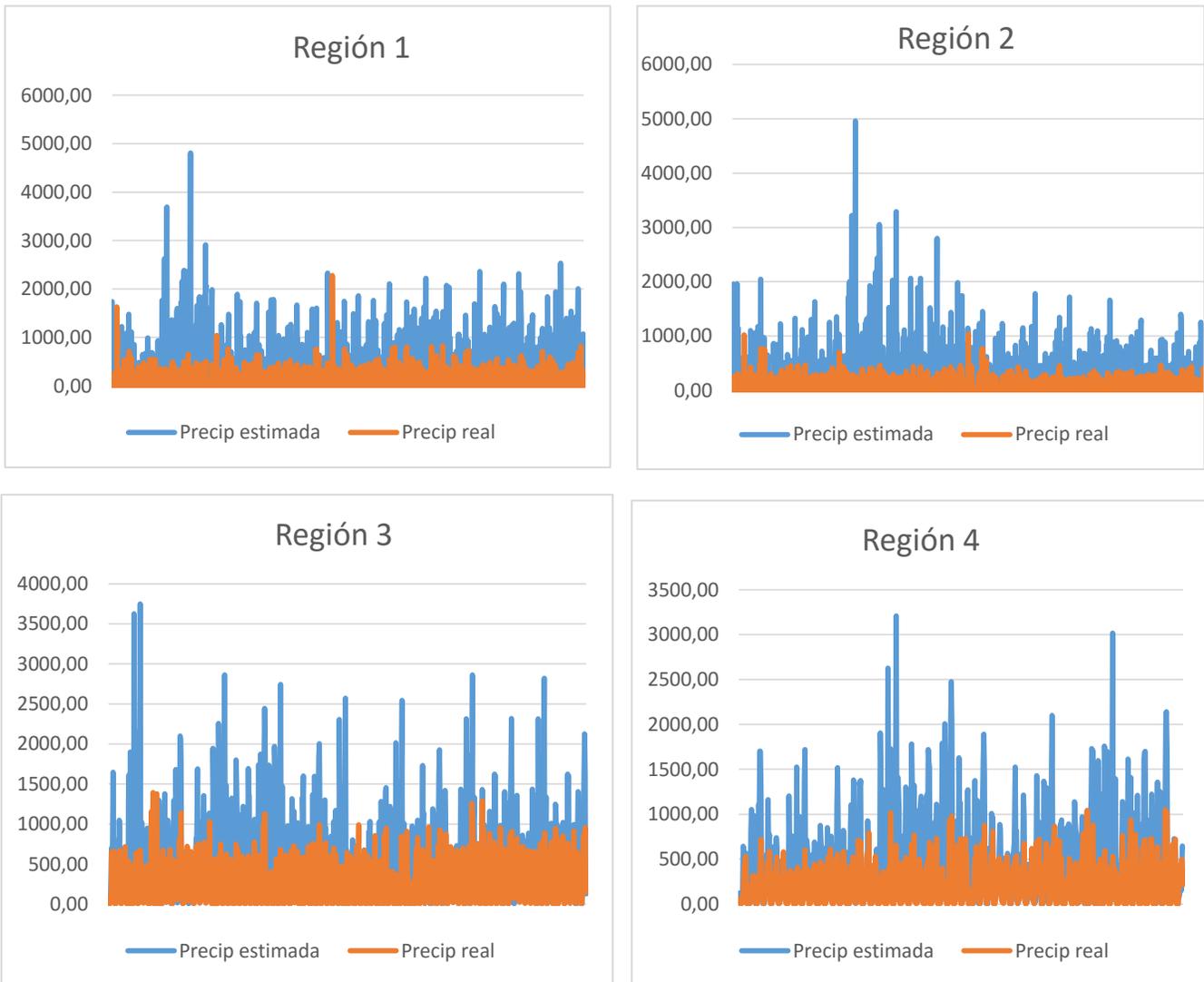


Figura 36 Comparación de precipitación estimada con precipitación real por región.

El comportamiento de la precipitación (ver figura 36) indica nuevamente al igual que en la variable de temperatura, que al hacer el análisis a una escala completamente diferente a la que los escenarios están adaptados, aumentamos el grado de variabilidad y por lo tanto la diferencia entre el dato estimado y el dato real, se ve reflejado en este tipo de gráficos, sin embargo es preciso recordar que el comportamiento de la precipitación se ve influenciado por muchos otros factores que ya han sido mencionados con anterioridad.

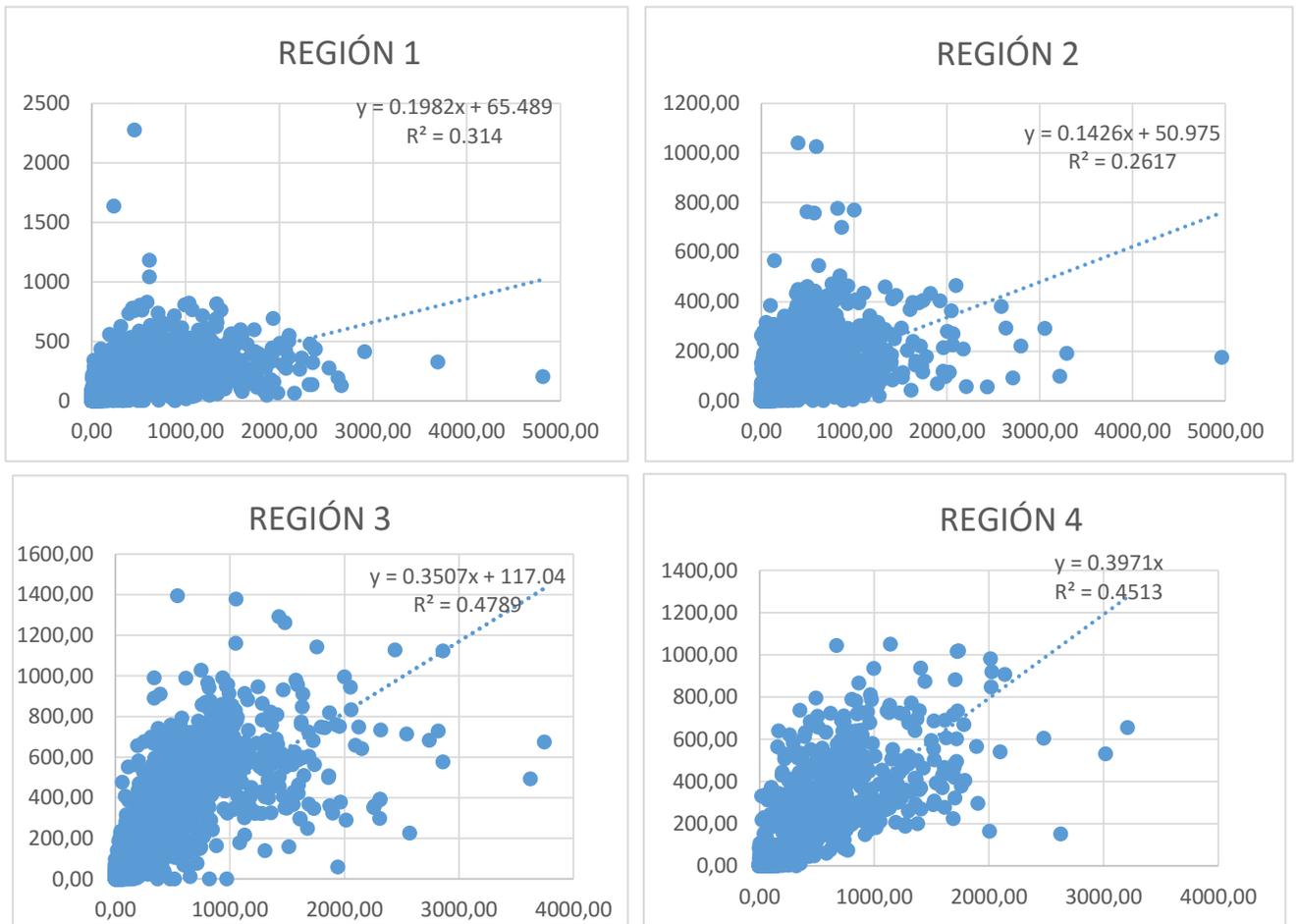


Figura 37 Correlación de resultados obtenidos a nivel de regiones para precipitación.

Al observar las gráficas de dispersión por cada región, se observa claramente que la relación entre la variable estimada y la variable real depende mucho sobre todo de la región en que se encuentra.

Las regiones 1 y 2 presentan un R^2 bajo, debido a que por la distribución de las estaciones meteorológicas y los patrones de lluvia que suelen presentarse en estas regiones suele ser determinada por varios factores climáticos que agregan más variación a lo que los escenarios de cambio climático pueden predecir.

Por otro lado las regiones 4 y 5 son las de un mayor R^2 lo que indica que en estas regiones los escenarios tienen un poco más de certeza que en las regiones 1 y 2.

Cuadro 11 Resumen de pruebas de t para las regiones de precipitación.

	Región 1		Región 2		Región 3		Región 4	
	<i>Estimada</i>	<i>Real</i>	<i>Estimada</i>	<i>Real</i>	<i>Estimada</i>	<i>Real</i>	<i>Estimada</i>	<i>Real</i>
Media	373.68	139.56	338.99	99.33	500.58	292.58	474.00	228.42
Varianza	215202.9	26930.7	188897.4	14685.0	306320.3	78651.6	268348.9	56647.0
Coeficiente de Variación (%)	3	6	7	4	9	2	5	7
Coeficiente de correlación de Pearson	124.14	117.58	128.21	122.00	110.56	95.85	109.29	104.20
Grados de libertad	0.56		0.51		0.69		0.71	
Estadístico t	2354		1654		1016		695	
Valor crítico de t	28.69		25.20		16.08		16.73	
	1.96		1.96		1.96		1.96	

Como se observa en el cuadro 11 de análisis de medias realizadas para cada una de las regiones el valor de precipitación estimada tiende a estar muy por encima del valor real, por lo que acá se confirma que los escenarios toman muy en cuenta los eventos extremos que pueden sucederse por lo que para las estimaciones del período 2001 a 2013 se esperaban eventos extremos que propiciaran los valores esperados.

Si se observa detenidamente los resultados de la varianza, que en cada una de las regiones para la precipitación estimada, los valores difieren en valores altos respecto a su media, esto en comparación a los resultados obtenidos para la precipitación real.

El coeficiente de variación para cada una de las regiones de precipitación confirman que existe una mayor heterogeneidad en los datos de precipitación estimada, por lo que puede proporcionar una idea de que los escenarios de cambio climático no tienen muy buena certeza para la predicción de los valores de precipitación.

A nivel de las 4 regiones los coeficientes de correlación sobrepasan el valor crítico establecido en (0.165) con un nivel de confianza del 95%, por lo que se confirma que existe

una buena correlación entre los datos estimados y reales de precipitación. En las regiones 3 y 4 es donde existen mayor correlación debido a que presentan los valores mas altos de correlación.

Por otra parte las regiones 3 y 4 presentan una correlación positiva alta, lo que podría tomarse en consideración al momento de realizar un análisis en cuanto a la precipitación en estas regiones basadas en los escenarios de cambio climático

En cada una de las regiones la prueba de t se confirma la existencia de una diferencia significativa existente en las medias de cada región, esto como resultado de las pruebas de t, donde en cada región se observa que la t calculada es mucho mayor que la t tabulada.

2.6.2 Determinación del grado de incertidumbre de los escenarios de Cambio Climático.

Tomando como base el resultado del coeficiente de determinación (R^2) se tienen los siguientes resultados.

2.6.2.1 Incertidumbre en temperatura media

Cuadro 12 Incertidumbre de los escenarios de cambio climático para temperatura media

	<i>TEMPERATURA ESTIMADA</i>	<i>TEMPERATURA REAL</i>
Media	22.03830602	23.65982494
Varianza	23.11424218	18.19468143
Coeficiente de correlación de Pearson	0.911	
R^2	0.83	

Obteniendo un coeficiente de determinación de 0.83 tenemos que los escenarios de cambio climático explican en un 83% el comportamiento de la variable de temperatura media, por lo que existe un 17% de incertidumbre que no se puede explicar debido a diferentes factores ya sea por la resolución espacial de los escenarios, o a el modelo matemático utilizado para crear los escenarios.

En cuanto a la variable de temperatura media como se ha visto en los resultados anteriores, los escenarios de cambio climático presentan un mejor resultado en cuanto a la variable de temperatura media, vale la pena recordar que el comportamiento de la temperatura es menos variable respecto a la precipitación.

Es importante notar también que con un grado de incertidumbre relativamente bajo, los escenarios de cambio climático construidos por la UNL pueden tomarse muy en cuenta para conocer el comportamiento de la temperatura en el futuro, hay que recordar que los escenarios de cambio climático están construidos en base al escenario RCP8.5 que es el que posee mayor incrementos de forzamiento de gases de efecto invernadero, por lo que es el escenario esperado a finales de siglo según algunos indicadores como el aumento en la demografía, aumento de emisiones de gases de efecto invernadero etc.

2.6.2.2 Incertidumbre en Precipitación

Cuadro 13 Incertidumbre de los escenarios de cambio climático para precipitación.

	<i>PRECIPITACION ESTIMADA</i>	<i>PRECIPITACIÓN REAL</i>
Media	398.2879637	165.8807369
Varianza	233835.2618	41045.87092
Coeficiente de correlación de Pearson	0.605	
R ²	0.37	

Según los resultados con un coeficiente de determinación de 0.37 tenemos que los escenarios de cambio climático a nivel de Vertiente del Pacífico explican un 37% del

comportamiento de la precipitación, teniendo una incertidumbre de 63%, en pocas palabras para la variable de precipitación la incertidumbre es mayor.

Es importante recordar que el Modelo Climático Regional (WRF) utilizado para la creación de los escenarios, se ve influenciada por las heterogeneidades espaciales de la superficie, sobre todo de la tierra, que pueden ser muy grandes y se producen en pequeñas escalas espaciales. Ejemplos de estas heterogeneidades incluyen regiones de topografía compleja o con diferentes patrones de uso del suelo. Este es un factor muy importante para definir el patrón del comportamiento de la lluvia.

2.7 CONCLUSIONES

1. En resoluciones globales (gran vertiente) el Modelo Climático Regional utilizado (Weather and Research Forecasting, WRF) puede simular adecuadamente características básicas de gran escala del clima. Según el IPCC (2013) los resultados en esta escala global son útiles para indicar el carácter general y patrones a gran escala del cambio climático, pero no es muy bueno para las importantes escalas locales o regionales debido a que los mismos modelos presentan errores propios de las variaciones locales de temperatura y precipitación.
2. Se pueden identificar dos tipos de incertidumbres. La primera se refiere a la señal a largo plazo del cambio climático en comparación con el “ruido” a corto plazo debido a una variabilidad a escala interanual o decenal. Cuando se utiliza un Modelo Climático Regional para la reducción dinámica de escala a un Modelo Climático Global, este tipo de incertidumbre surge de una manera poco conocida. Esta incertidumbre quizás se puede entender mejor en términos de un error estándar, es decir una representación estadística de la variabilidad imparcial.
La segunda incertidumbre conocida tiene que ver con sesgos en el modelo. Un objetivo principal de la reducción de escala es el de reducir los sesgos que se producen a gran escala espacial (100 km o superior) con respecto a les escala local o regional (10 a 15 km o menos) (IPCC, 2007)

2.8 RECOMENDACIONES

- Es necesario utilizar un modelo climático regional que tome más en cuenta los efectos de la topografía, microclimas, usos del suelo y otros factores que tienen algún efecto en los cambios en patrones de temperatura y especialmente en la precipitación ya que el modelo WRF (Parte del CMIP5) no tiene la capacidad suficiente de responder a estos factores.
- Se deben generar planes que contengan medidas de mitigación y adaptación al cambio climático especialmente en aquellas zonas altamente vulnerables que representen un grave riesgo para la vida de las personas, para generar estos planes los escenarios de cambio climático aportan mucho ya que brindan la información necesaria de como el clima puede comportarse en el futuro.
- Es importante hacer un uso correcto de los escenarios de cambio climático planteados por la UNL para Guatemala, especialmente porque constituyen una herramienta que ayuda a conocer el probable comportamiento del clima en el futuro.
- Es recomendable hacer uso de las herramientas generadas por la Universidad Nebraska Lincoln como lo es “Map Maker”, una plataforma web que genera mapas de clima futuro en base a las variables que el usuario desee, aunque las variables de mayor interés lo son: temperatura y precipitación.

2.9 BIBLIOGRAFÍA

1. BID, GT. 2010. La ciencia del cambio climático: manual práctico para tomadores de decisiones en Mesoamérica. Guatemala. 34 p.
2. Giz, BMZ. 2012. Introducción en la adaptación a la variabilidad climática mediante estrategias de gestión del riesgo agrícola en la región andina. Perú, GTZ / Ministerio de Federal de Cooperación Económica y Desarrollo. 44 p.
3. IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático, SW). 1997. Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el segundo informe de evaluación del IPCC. Switzerland. 47 p. (Documento Técnico 2).
4. _____. 2000. Escenario de emisiones. Switzerland. 20 p. (Informe Especial del IPCC).
5. _____. 2001. Cambio climático 2001, informe de síntesis. Switzerland. 161 p.
6. _____. 2008. Cambio climático 2007: informe de síntesis. Switzerland. 104 p.
7. Gupta. HV; Sorooshian, S; Yapo, PO. 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration. United States, American Society of Civil Engineers. p. 135-143.
8. INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, GT). 2014. Hidrología (en línea). Guatemala. Consultado 13 mayo 2014. Disponible en http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/rios_de_guatemala.htm
9. Jara, M. 2010. El ABC del cambio climático. Costa Rica, CATIE. 83 p.

10. MARN (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, GT). 2001. Primera comunicación social sobre cambio climático. Guatemala. 110 p.
11. _____. 2014. Impactos climáticos para Guatemala: resultados preliminares de los modelos climáticos regionales y globales IPCC AR5. Guatemala. 36 p.
12. Moriasi, DN; Arnold, JG; Van Liew, MW; Bingner, RL; Harmel, RD; Veith, TL. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers 50(3):885–900.
13. Mosquera, K. 2006. El formato NetCDF (en línea). Perú. Consultado 10 jun 2014. Disponible en <http://www.met.igp.gob.pe/users/kobi/NETCDF/>
14. Neil, S. 1999. Métodos de investigación. México, Prentice Hall. 380 p.
15. Ocampo, O. 2012. Análisis de vulnerabilidad de la cuenca del río Chinchiná para condiciones estacionarias y de cambio climático. Tesis MSc. Colombia, Universidad Nacional de Colombia. 248 p.
16. Rauscher, S; Giorgi, F; Diffenbaugh, N; Seth, A. 2008. Extension and intensification of the Meso-American mid-summer drought in the twenty-first century. Climatic Dynamics (31):551-571.
17. Rojas, M. 2012. Consultoría para la elaboración de un estudio sobre estado del arte de modelos para la investigación del calentamiento global. Chile, Universidad de Chile. 45 p.
18. Smith, JB; Hulme, M. 1996. Climate change scenarios: handbook on methods for climate change impact assessment and adaptation strategies. United Nations Environment Program, Global Environment Facility.

19. Solomon, S *et al.* 2007. The physical science basis: contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, UK, Cambridge University Press. 996 p.
20. Stockhause, M; Höck, H; Toussaint, F; Lautenschlager, M. 2012. Quality assessment concept of the world data center for climate and its application to CMIP5 data. *Geoscientific Model Development* vol (1):1023-1032.
21. Taylor, K; Stouffer, R; Meehl, G. 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design. *B. American Meteorological Society* vol (1):485-498.
22. Viner, D; Hulme, M. 1997. The climate impacts LINK project. England, Hadley Centre for Climate Prediction and Research. 17 p.
23. Zavala, M. 2014. El clima y sus elementos (en línea). Venezuela. Consultado 11 mayo 2014. Disponible en <http://elementosclimaticos.galeon.com/autor.htm>

3 CAPITULO III. INFORME DE SERVICIOS PRESTADOS AL PROGRAMA DE CLIMA E HIDROLOGÍA DEL INSTITUTO PRIVADO DE INVESTIGACIÓN SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO, SANTA LUCÍA COTZUMALGUAPA, ESCUINTLA, GUATEMALA C.A.

3.1 SERVICIO 1. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA CAÑA DE AZÚCAR.

3.1.1 Presentación

A nivel mundial, una de las incógnitas de mayor preocupación la constituye la forma en que el cambio climático se va a manifestar. Por una parte se encuentra el calentamiento global, que atañe al cambio en la temperatura media de todo el planeta, el cual se sabe que no acontece de igual forma en todas partes (IPCC, 2007)

El calentamiento global de nuestro planeta se produce por las emisiones de gases de efecto invernadero, este fenómeno natural siempre se ha producido, sin embargo, en los últimos 50 años se ha dado de una forma acelerada debido al incremento de los gases de efecto invernadero, lo cual ha provocado el cambio climático global, aumentando la temperatura y cambiando los regímenes de las precipitaciones. (Cengicaña, 2014)

La Agroindustria Azucarera Guatemalteca ocupa un importante lugar en la economía de Guatemala, por lo tanto es necesario analizar los impactos del cambio climático en la caña de azúcar y qué actividades de adaptación se deben desarrollar.

Guatemala por ser un país altamente vulnerable a los efectos del cambio climático ha manifestado seriamente su preocupación ante las decisiones que son trascendentales para tomar, ante esta situación el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales –MARN- ha trabajado en conjunto con la Universidad de Nebraska Lincoln en la elaboración de escenarios de cambio climático en escala reducida y adaptada al país en donde basados en un modelo climático regional se realizan simulaciones para conocer cuál será el comportamiento futuro del clima especialmente de la precipitación y la temperatura que son las principales variables que afectan a los sistemas productivos.

En el presente servicio se desarrolló una metodología en la cual se pudo conocer el comportamiento del clima futuro a los años 2040 y 2070 generando así mapas de las variables de precipitación y temperatura representando los posibles escenarios (áreas potenciales) sobre la cual se puede desarrollar la caña de azúcar.

3.1.2 Objetivos:

A. General

- Conocer los escenarios de clima futuro del cultivo de la Caña de Azúcar en la vertiente del Pacífico de Guatemala.

B. Específicos

- Describir las características climáticas sobre las que se desarrolla la caña de azúcar.
- Generar mapas que representen el escenario futuro para la caña de azúcar en base a las variables de temperatura y precipitación.

3.1.3 Metodología

3.1.3.1 Descripción de las características climáticas de la caña de azúcar.

Para respaldar esta fase, se utilizó principalmente el libro de “El Cultivo de la caña de azúcar en Guatemala” elaborado en el año 2012 por el Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar –CENGICAÑA- de donde se consultó toda la información concerniente a la caña de Azúcar.

Además de este libro se consultaron otro tipo de documentos que pudieran proveer información importante sobre la caña de azúcar.

3.1.3.2 Generar mapas que representen el escenario futuro para la caña de azúcar en base a las variables de temperatura y precipitación

En esta fase se tuvo como herramienta principal:

- El software ArcGis® 10
- Capas de los escenarios de clima futuro (año, 2010, 2040 y 2070) generados por la Universidad Nebraska Lincoln.

a. Generación de los mapas.

Para la generación de los mapas de las condiciones climáticas para los años 2040 y 2070 de la caña de azúcar se realizó el siguiente procedimiento:

- De la dirección web <http://weather.unl.edu/RCM/Guatemala/Phase2/data/index.php> se obtuvieron las capas de los años 2040 y 2070 respectivamente.
- Las capas fueron cargadas, desplegadas y georreferenciadas a través del uso de las herramientas de ArcGis10.

- Una vez teniendo georreferenciadas las capas, se procedió a cargar la capa de la vertiente del Pacífico de Guatemala que es la zona donde se encuentra la mayor parte de caña de azúcar del país.

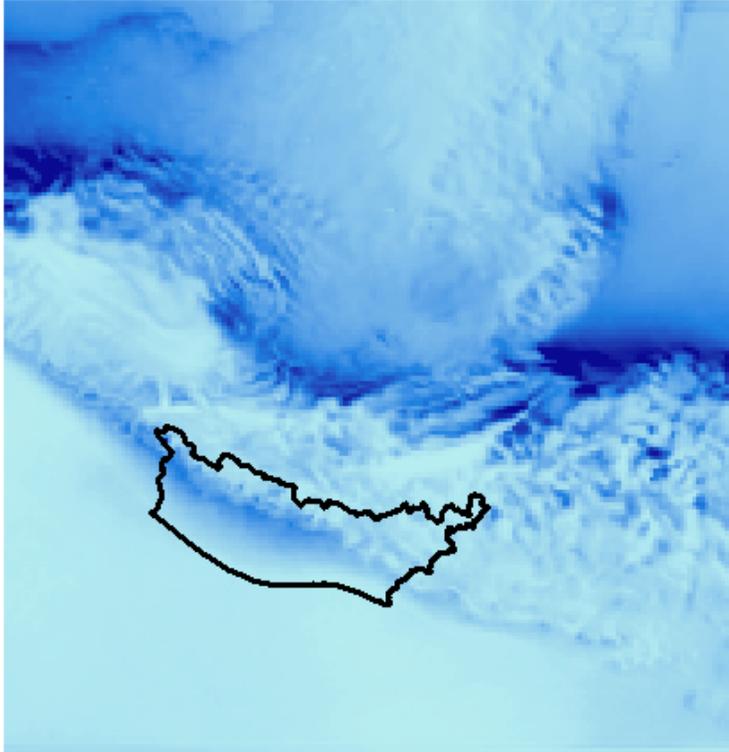


Figura 38 Ubicación de la Vertiente del Pacífico en la capa georreferenciada

- Una vez teniendo la capa de los escenarios junto con la capa de la Vertiente del Pacífico de Guatemala, se procedió a realizar la extracción únicamente de los valores de precipitación del área que cubre la vertiente, excluyendo el resto de área del país. Para esto se utilizó la herramienta llamada “Extraer por máscara” contenida dentro de las opciones de Spatial Analyst del ArcToolbox.

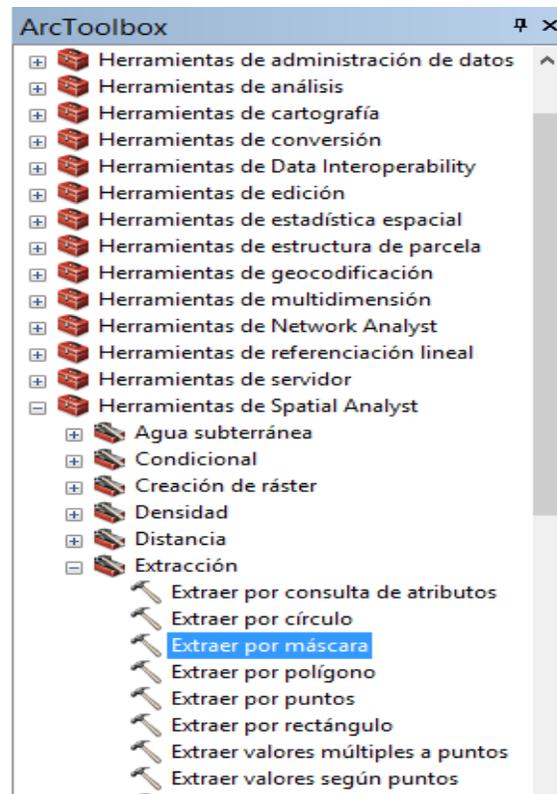


Figura 39 Herramienta utilizada para la extracción de valores de precipitación

- Como resultado final se obtiene la capa de la vertiente del Pacífico conteniendo los valores de precipitación y temperatura media únicamente de esta región.

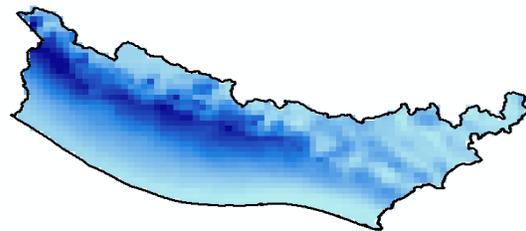


Figura 40 Resultado de la extracción de valores de precipitación en la Vertiente del Pacífico

- Luego de este proceso se “reclasifican” los valores de la capa obtenidos, en otras palabras únicamente se dejan los valores que contienen por ejemplo los rangos de temperatura de 27°C a 22 °C o precipitaciones mayores a 1200mm, según

CENGICAÑA 2012 son los rangos de temperatura y precipitaciones adecuados para el desarrollo de la caña de azúcar. La herramienta utilizada para este proceso se encuentra dentro del ArcToolbox>Herramientas de Spatial Analyst>Reclasificar.

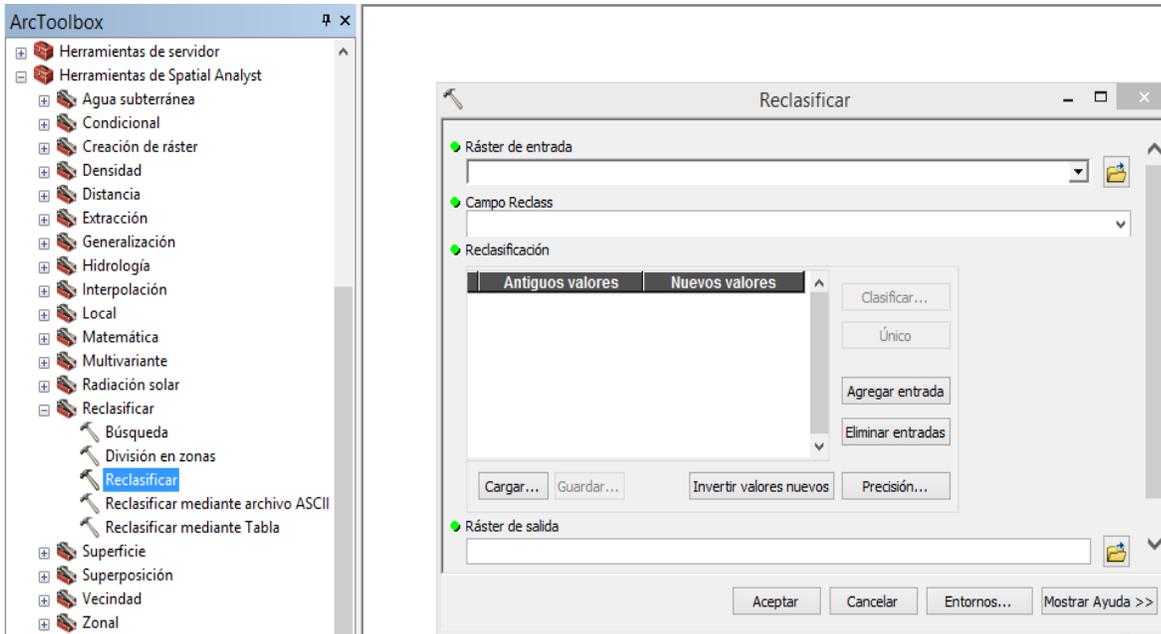


Figura 41 Herramienta utilizada para la reclasificación.

- Una vez llevado a cabo este proceso se tiene el producto siguiente

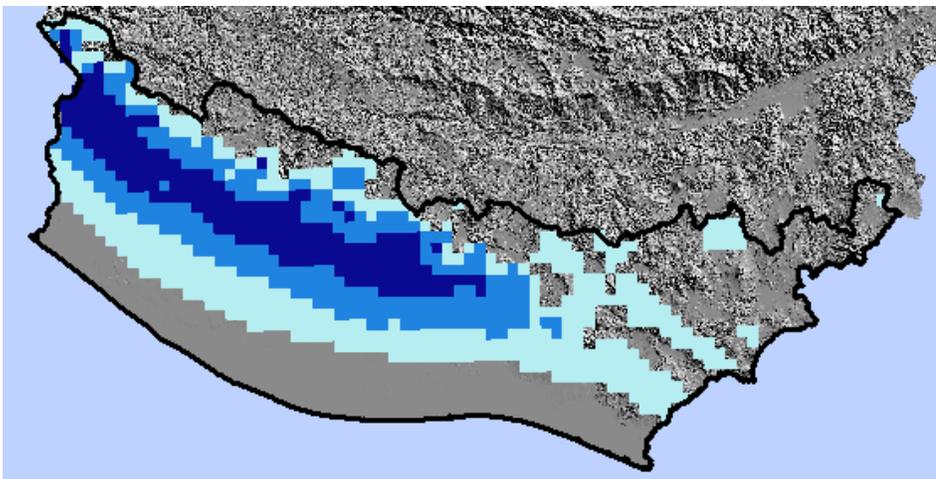


Figura 42 Resultado obtenido del proceso de reclasificación

- Este proceso fue el mismo para los años 2040 y 2070 para ambas variables: temperatura y precipitación.

3.1.4 Resultados

3.1.4.1 Descripción de las características climáticas de la caña de azúcar.

a. Temperatura

El clima del cultivo de la caña, al igual que todo cultivo, se desarrolla bajo determinadas condiciones climáticas y sólo en algunas su crecimiento resulta ser óptimo. (CENGICAÑA, 2012)

Se conoce que la temperatura óptima para su desarrollo se encuentra en el rango de los 27°C a 33°C. Subiros (2000) menciona que a valores de 20°C, el crecimiento disminuye notoriamente y, si está descendiendo más, el crecimiento prácticamente se paraliza. Según Gawander (2007), las noches frías y madrugadas en las que la temperatura no supere los 14°C en la época seca, o los 20°C en la época lluviosa, afectan en gran medida el proceso de fotosíntesis al día siguiente, cuando la temperatura es mayor a 35°C, aumenta la respiración y, como consecuencia, disminuye la tasa fotosintética, lo anterior conlleva a una reducción del crecimiento y de acumulación de materia seca. Mientras que los signos de marchitez se evidencian cuando la temperatura aumenta por arriba de los 36°C (Subirós, 2000, Citado por Cengicaña, 2012).

Si la temperatura es más alta, la tasa de crecimiento aumenta más que la fotosíntesis, lo cual perjudica la acumulación de sacarosa (Gawander, 2007).

En la actualidad a nivel de la zona cañera se cuenta con una red de 20 estaciones meteorológicas ubicadas en los cuatro estratos (alto, medio, bajo y litoral) del cultivo de la caña en la que se registran mediciones de la temperatura ambiente. La red permite contar con el rango de las temperaturas mínimas y máximas diarias y determinar así si estas se encuentran en los valores óptimos para el desarrollo del cultivo.

b. Precipitación

La literatura muestra que, en promedio, se requieren de 1,200 a 1,500 mm de precipitación pluvial, distribuidos durante todo el periodo vegetativo (Subirós, 2000). La demanda de agua aumenta con el crecimiento de la planta, puesto que la transpiración se incrementa. De igual forma si la temperatura es elevada, la demanda de agua es mayor.

3.1.4.2 Generar mapas que representen el escenario futuro para la caña de azúcar en base a las variables de temperatura y precipitación.

A nivel mundial una de las incógnitas de mayor preocupación la constituye la forma en la que el cambio climático se va a manifestar. Por una parte se encuentra el calentamiento global, que atañe al cambio en la temperatura media de todo el planeta, el cual se sabe que no acontece de igual forma en todas partes (IPCC, 2007, citado por CENGICAÑA, 2012)

En esta parte tomando como base los escenarios de cambio climático generados para Guatemala por parte de la Universidad de Nebraska Lincoln, nos centramos en conocer cuáles serán los posibles escenarios de clima futuro para la caña de azúcar, basándonos para esto en años puntuales: al año 2040 y al año 2070 para las variables de temperatura y precipitación, tomando como base la literatura sobre los rangos adecuados sobre los que la caña de azúcar se puede desarrollar.

Para el análisis de las variables de temperatura media y precipitación partiremos del siguiente cuadro:

Cuadro 14 Características climáticas en la zona cañera.

Estrato	Altitud (msnm)	PP (mm/año)	T °C		
			Min	Media	Max
Alto	>300	4100	20.2	26.2	32.2
Medio	100-300	3700	20.5	26.7	32.2
Bajo	40-100	1900	21.2	27.3	33.8
Litoral	<40	1500	21	27.5	33.4

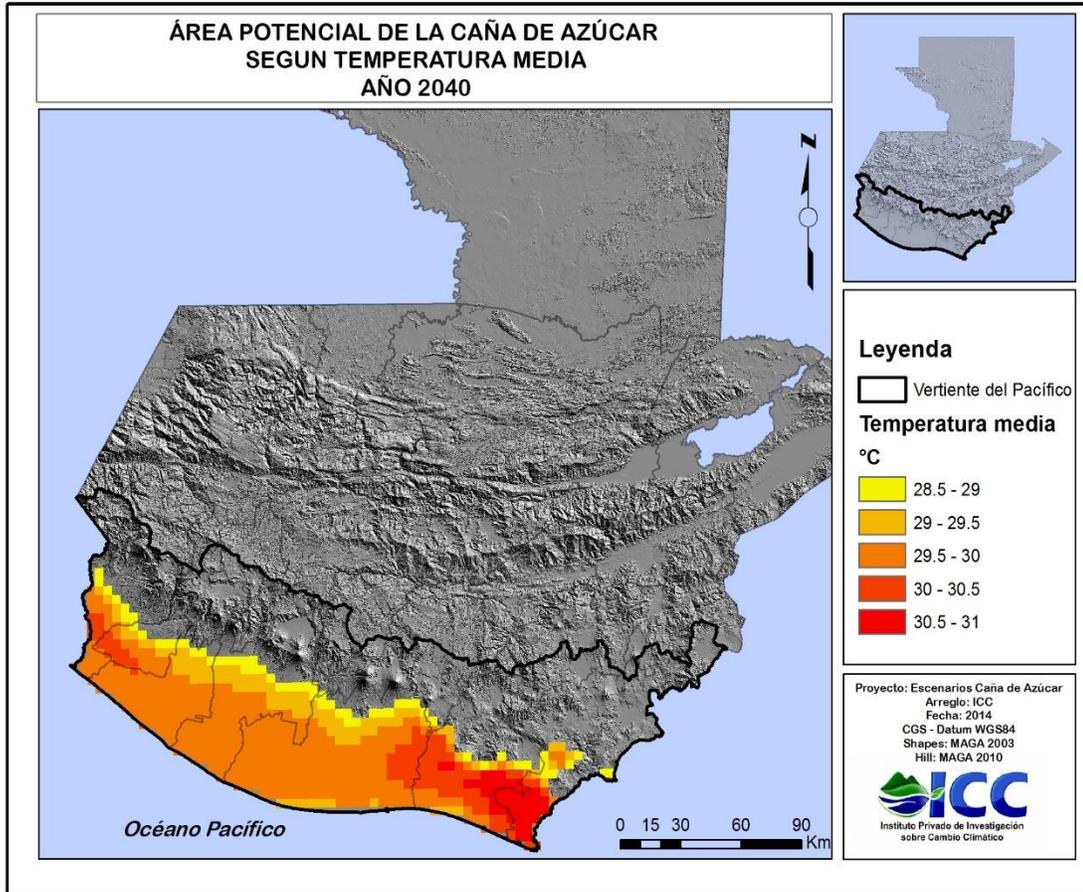


Figura 43 Escenario futuro para la variable de temperatura media año 2040.

Según la figura 43, para el año 2040 la parte del estrato alto de la zona cañera se verá considerablemente reducida en su área potencial en cuanto al área potencial que podría

verse ocupada por caña de azúcar, las temperaturas esperadas para este estrato oscilarán probablemente entre 28.5°C y 29°C en la mayor parte de la Vertiente del Pacífico.

Para el estrato medio las temperaturas variarían entre un valor de 29°C a 29.5°C en la mayor parte de la Vertiente, aunque en algunas zonas del estrato medio probablemente la temperatura alcance valores hasta de 30°C especialmente en la parte comprendida éntrelos departamentos de Escuintla y Santa Rosa.

Por otra parte en el estrato bajo y litoral las temperaturas oscilaran desde los 29.5°C hasta alcanzar una temperatura máxima esperada en las zonas de los departamentos de Santa Rosa y Jutiapa, de 31°C.

Como se observa en la imagen presentada con anterioridad, el aumento en la temperatura para el año 2040 en la zona cañera del país es notorio, aunque vale la pena recordar que los escenarios son una herramienta nada más a tomar en cuenta, no brindan una certeza exacta ni son pronósticos exactos de que esto suceda para este año en cuanto a la variable de temperatura media.

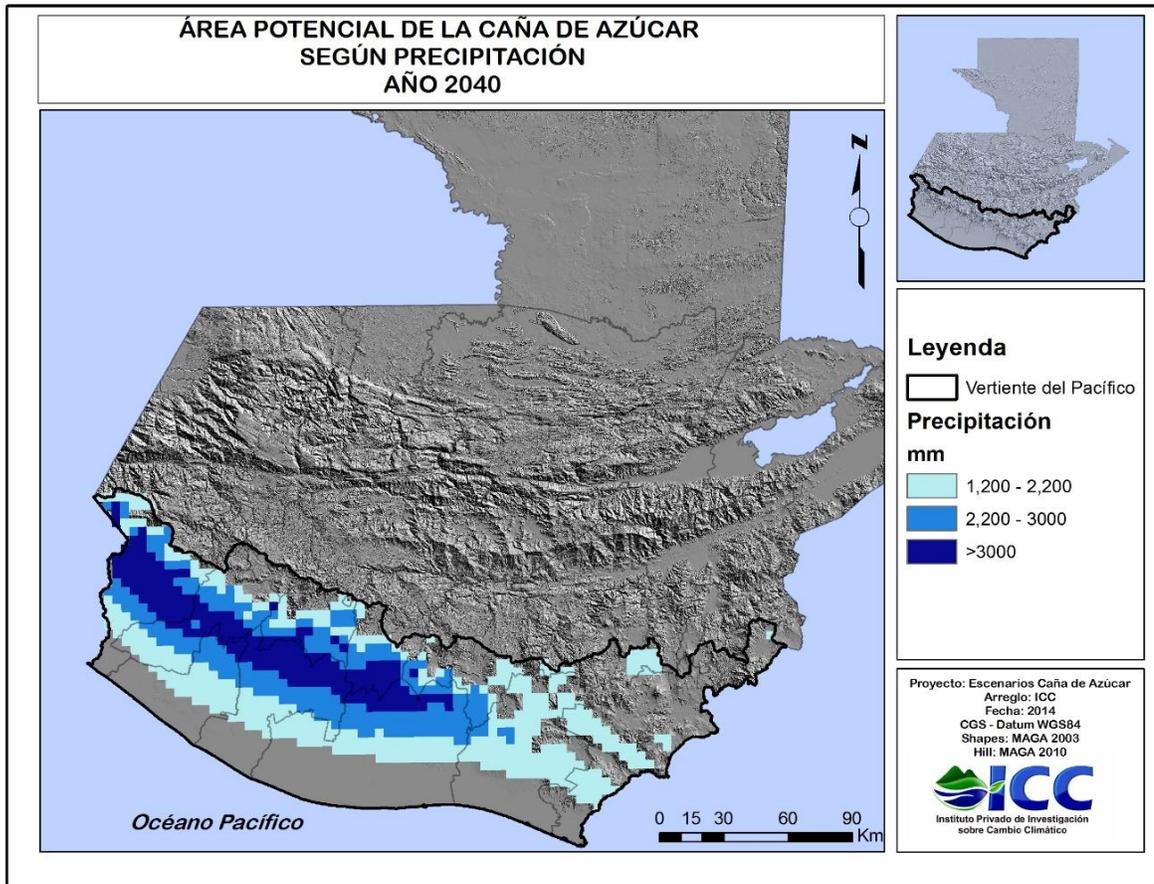


Figura 44 Escenario futuro para la variable de precipitación año 2040.

Según la figura 44, para el año 2040 las condiciones climáticas para la precipitación nos muestran una clara reducción de lluvias en el estrato litoral y bajo. Mientras que en el otro extremo, las lluvias en regiones de San Marcos, Quetzaltenango, Suchitepequez, parte Sur de Chimaltenango y Norte de Escuintla presentarán lluvias superiores a los 3000mm.

Ahora bien, para la región de la boca costa desde San Marcos a Escuintla, presentará un régimen de lluvia comprendidos entre los 2,200 a 2,000 mm, este será el mismo régimen de lluvia en algunas zonas del estrato alto de la zona cañera.

Directamente para el estrato alto se esperarían lluvias comprendidos entre los 1,200 a 2,200 mm, por lo que es importante tomar en cuenta esta situación debido que para el estrato alto la temperatura aumentaría y oscilaría entre 28.5°C y 29°C por lo que es importante recordad que con un aumento de temperatura, la caña demandaría más consumo de agua.

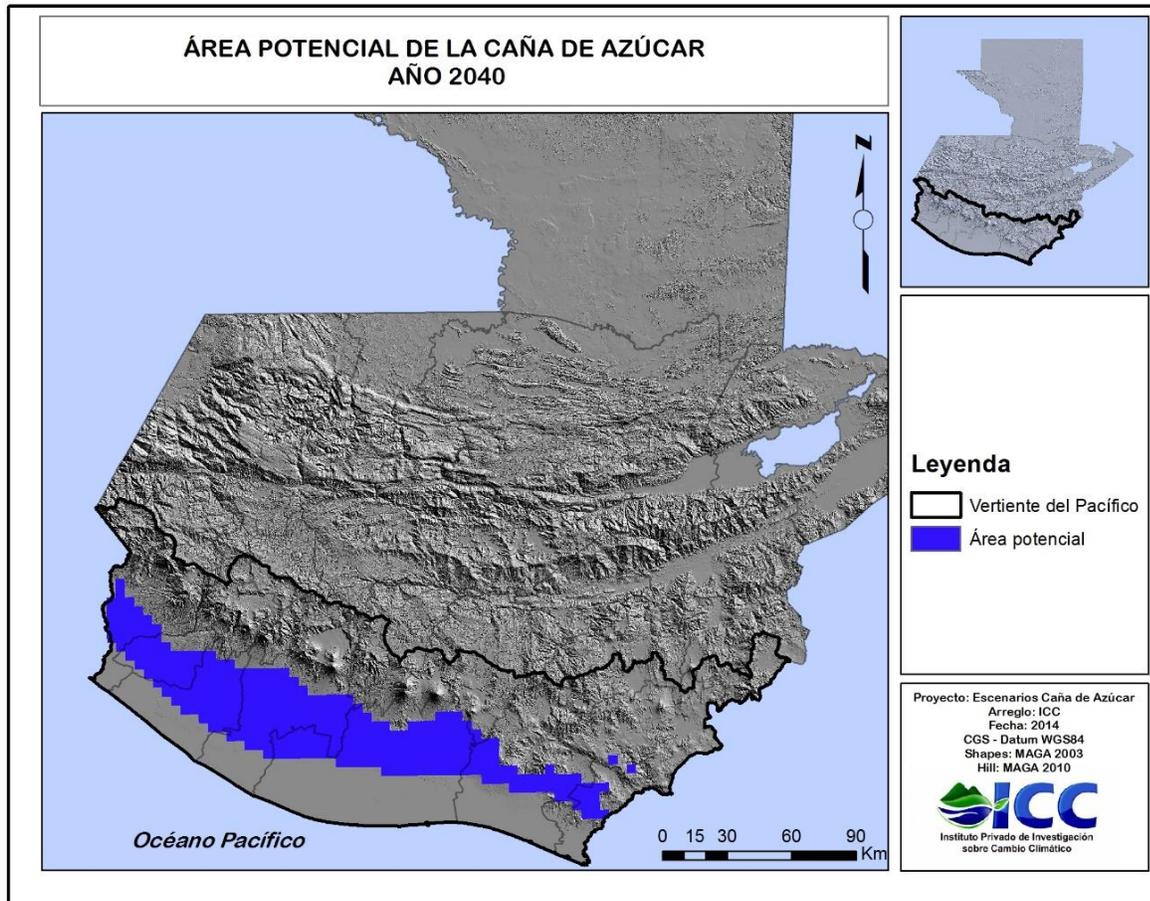


Figura 45 Área potencial de la caña de azúcar para el año 2040.

Tomando en consideración el comportamiento esperado de las variables de precipitación y temperatura media, se creó un mapa en el cual se puede observar el área potencial de la caña de azúcar esperada para este año. Este mapa fue elaborado de acuerdo a las condiciones climáticas de temperatura y precipitación que demanda la caña de azúcar.

Al observar el mapa nos damos cuenta que en el estrato litoral y estrato bajo, la caña de azúcar probablemente no se adapte debido principalmente a los patrones de lluvia de este año, los cuales se concentran especialmente en la parte norte de la Vertiente del Pacífico. Se espera entonces que para este año la caña de azúcar se adapte únicamente en el estrato alto y medio de la zona cañera, inclusive se esperaría un desplazamiento más cercano a la boca costa.

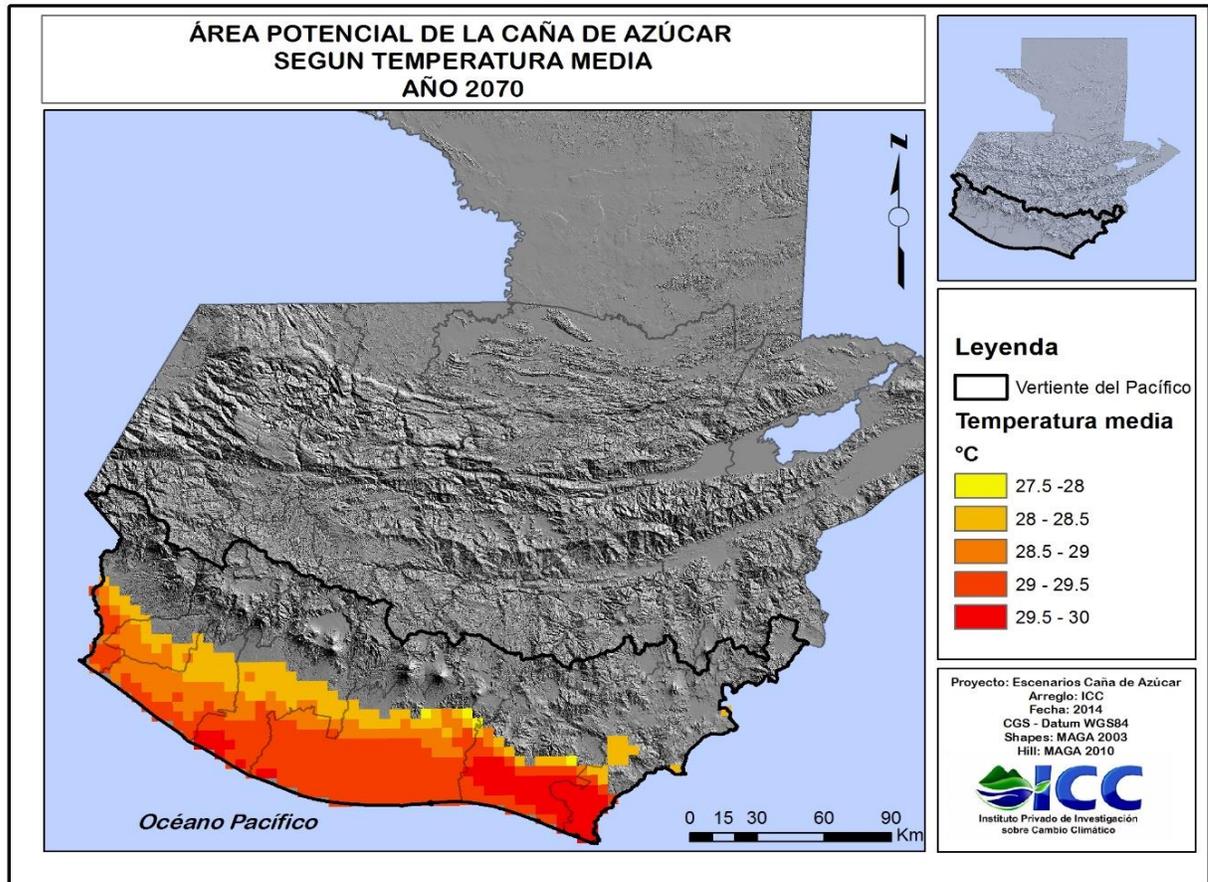


Figura 46 Escenario futuro para la variable de temperatura año 2070.

Según la Figura 46, el comportamiento de la temperatura variará en cada uno de los diferentes estratos de la zona cañera, el estrato alto por ejemplo se reducirá en cuanto a su extensión, el comportamiento de la temperatura oscilará entre los 27.5°C e incluso podría llegar a tener valores de hasta 28.5°C.

El estrato medio presentará una temperatura entre 28° a 28.5°C, mientras que para el estrato bajo los rangos de temperatura media esperados podrían oscilar entre los 28.5°C a 29°C en algunos puntos incluso podrían existir algunas áreas como en la parte sur de Santa Rosa donde podría incluso llegar a 29.5°C-

Finalmente para el estrato litoral de la zona cañera las temperaturas oscilarán entre los 29°C y 29.5°C, los puntos más cálidos serían por la parte de Santa Rosa y Jutiapa donde se esperarían un máximo de temperatura de hasta 30°C, una aportación interesante es que en

el departamento de Suchitepéquez existe un punto donde también la temperatura será mayor, específicamente entre los 29.5°C y 30°C.

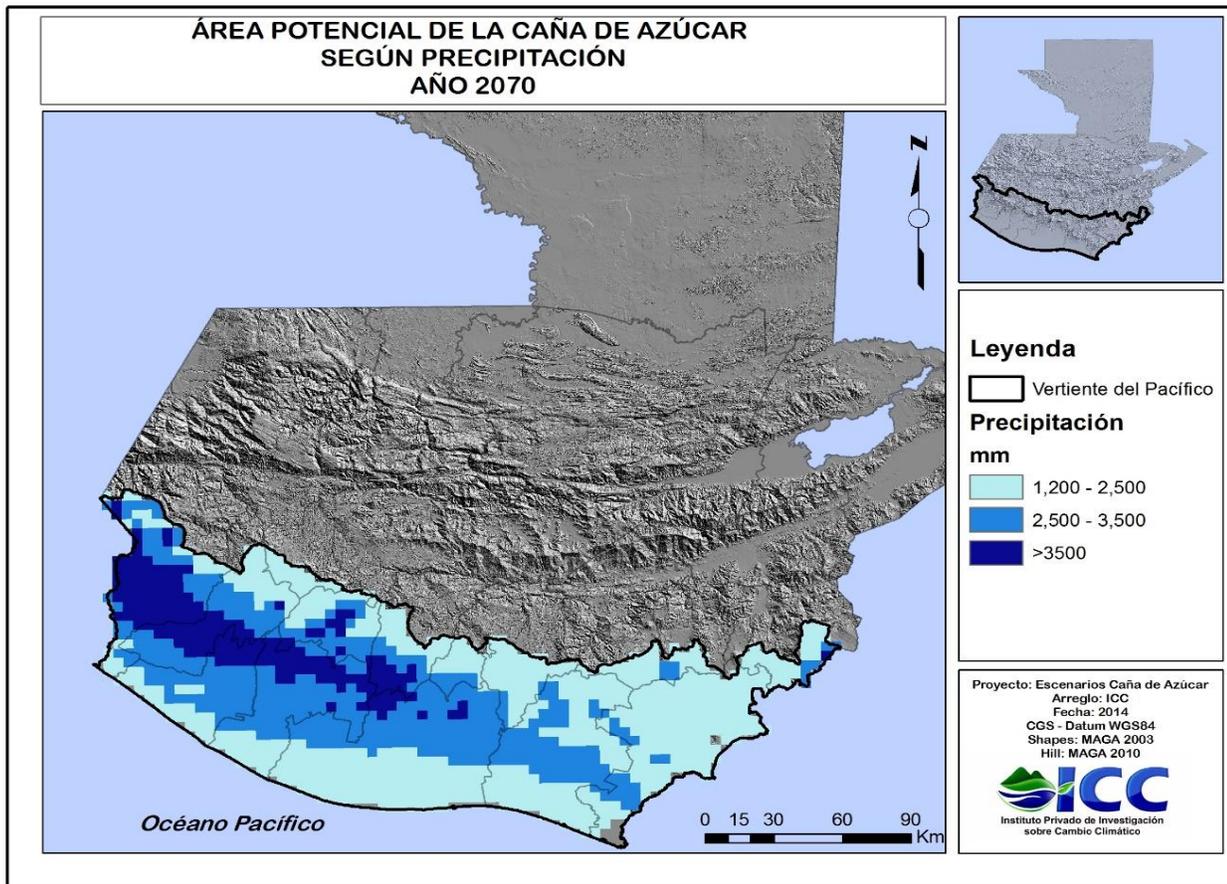


Figura 47 Escenario futuro para la variable de precipitación año 2070

Para el caso de la distribución de la precipitación esperada para el año 2070 en la vertiente del pacífico se observa que los patrones de lluvia se ven alterados completamente respecto a lo observado en el año 2040. Ahora bien, se observa que en la mayor parte de la vertiente habrá precipitaciones distribuidas de la siguiente manera:

Para la parte de la boca costa comenzando desde San Marcos, Quetzaltenango, Suchitepéquez y parte de Escuintla las precipitaciones serán superiores a los 3500mm, a medida que aumenta la altura sobre el nivel del mar en algunos puntos de los departamentos mencionados las precipitaciones oscilarán entre 2500mm y 3500mm, de manera que se van reduciendo conforme aumenta la altura sobre el nivel del mar.

Para la zona cañera en el estrato alto, medio y bajo las precipitaciones esperadas serían entre 2500mm a 3500mm, para el estrato litoral la precipitación se reduciría considerablemente hasta encontrarse en un rango de 1200 a 2500mm.

Si se observa a detalle la imagen 47 existe un área pequeña al sur de Jutiapa donde las lluvias probablemente sean nulas para esta región.

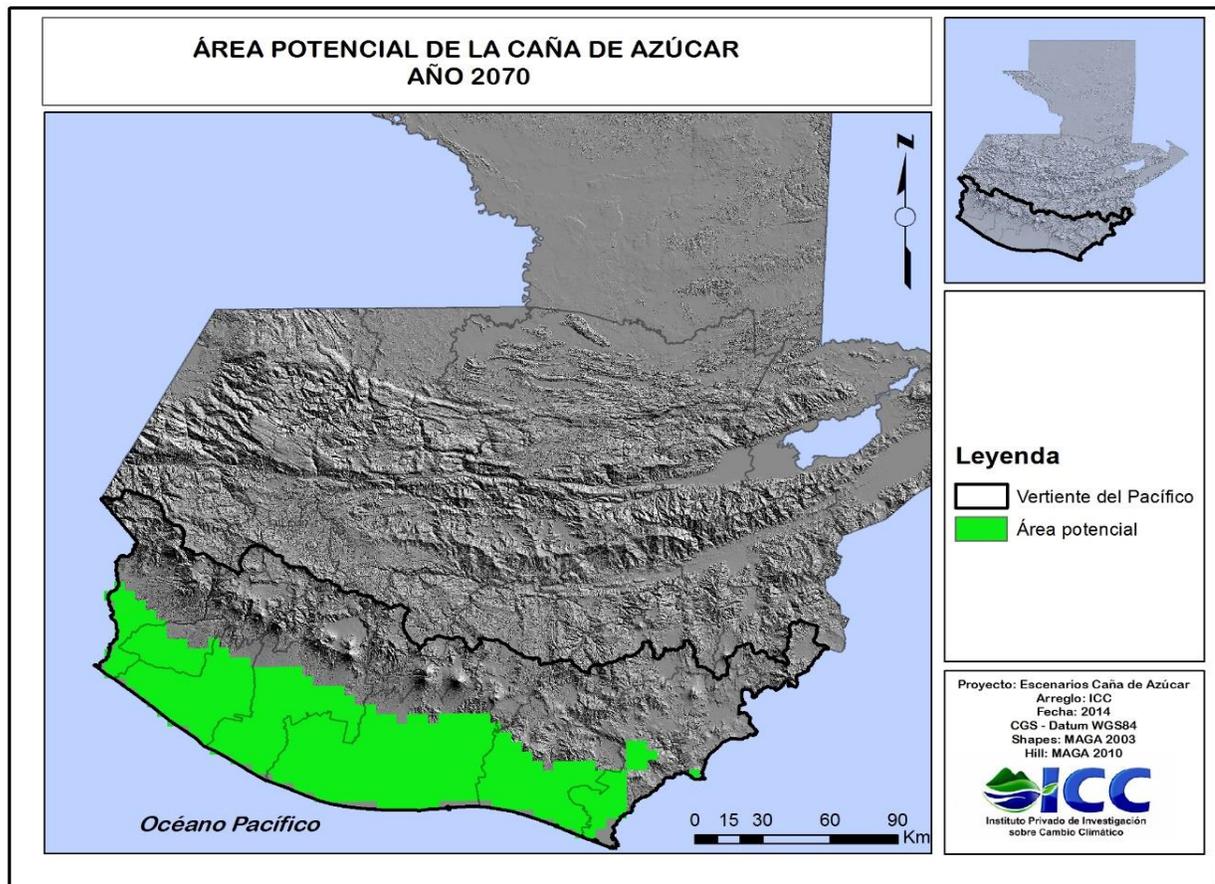


Figura 48 Área potencial de la caña de azúcar para el año 2070.

Según el comportamiento de la temperatura media y la precipitación esperada, el área potencial de la caña de azúcar se estabilizará especialmente en los estratos bajo y litoral de la zona cañera, es importante recordar que en el mapa del área potencial del año 2040 estos estratos se vería seriamente afectados ya que la mayor parte de la caña de azúcar se concentrará en estratos alto, medio y probablemente en alturas superiores a los 300 msnm.

Para el año 2070 la única región que no sería apta para la caña de azúcar sería la parte sur y sureste de Jutiapa, mientras que gran parte de la zona cañera especialmente los 4 estratos estarían disponibles para su cultivo.

3.1.5 Conclusiones

- La caña de azúcar en Guatemala es un cultivo sumamente importante debido a su alta productividad y a la alta generación de empleo que provee. De acuerdo a sus características climáticas, esta se desarrolla en temperaturas comprendidas entre los 27°C a 33°C, donde un incremento o disminución de estos valores de temperatura afectaría considerablemente el desarrollo de la caña de azúcar donde por ejemplo si la temperatura disminuye por consiguiente el crecimiento de la caña de azúcar se daría más lento o incluso llegaría a detenerse si la temperatura desciende considerablemente para que esto suceda. Por otra parte valores de temperatura superiores a los 33°C se da una serie de fenómenos que también limitaría su desarrollo, por ejemplo a temperaturas de 35°C la tasa fotosintética de la caña de azúcar disminuye debido a que la respiración es mayor.

Para la precipitación también existen rangos adecuados, según el Libro de la caña de azúcar (Cengicaña, 2012) demuestra que en promedio se requieren 1,200 a 1,500 mm de precipitación que deben estar distribuidos durante todo el período vegetativo, por consiguiente cuando la planta va creciendo la demanda de agua es mayor por lo que incluso valores sobre los 1,500 mm podrían darse y en los estratos de la zona cañera no es la excepción donde algunas estaciones meteorológicas del estrato medio reportan precipitaciones mayores a 4000mm (Cengicaña, 2012).

- A nivel mundial, una de las incógnitas de mayor preocupación la constituye la forma en la que el cambio climático se va a manifestar, por lo que la zona productiva de la costa sur es una zona donde se debe prestar mayor interés ya que es la zona que contiene la mayor extensión de caña de azúcar del país. Los mapas generados para la variable de temperatura media al año 2040 y 2070 respectivamente demuestran que las temperaturas se espera que aumenten para cada uno de los diferentes estratos donde se ubica la zona cañera, comenzando desde el estrato alto a estrato litoral.

Para el año 2040 se esperaría que las precipitaciones se vean reducidas en la mayor parte de la Vertiente del Pacífico donde las zonas más afectadas serían los estratos

bajo y litoral de la zona cañera, donde únicamente se esperarían lluvias en los estratos alto y medio esto en referencia a la zona cañera ya que, a nivel de vertiente se esperaría que en la zona de boca costa las precipitaciones sean superiores a los 3,000mm anuales.

Una situación que llama mucho la atención es que para el año 2070 el patrón de la precipitación se vea seriamente modificada ya que en toda la vertiente del pacífico se esperarían precipitaciones oscilando entre los 1,200 a 2,500mm para el estrato bajo y litoral de la zona cañera, mientras que para el estrato alto y medio la precipitaciones esperadas oscilarían entre los 2,500 a 3,500 mm. Esto se debe principalmente a que los escenarios de cambio climático pronostican un incremento de eventos extremos (huracanes, tormentas, etc) por lo que los patrones de lluvia incrementan respecto a los patrones del año 2040.

3.1.6 Recomendaciones

- Es importante hacer uso de herramientas que pueden servir de mucho para conocer el comportamiento del clima futuro como lo son los escenarios de cambio climático, ya que esto permitiría a todas aquellas personas tomadoras de decisiones importantes, elegir la ruta correcta para hacer frente a los severos cambios de clima que se prevén para el futuro.
- Se deben tomar medidas preventivas desde ya, debido que de alguna u otra manera los patrones de lluvia y el aumento de la temperatura serán inequívocos con el transcurrir de los años, por lo que prevenir y tomar medidas desde ya reduciría considerablemente los posibles impactos del cambio climático especialmente en una zona altamente productiva como la Vertiente del Pacífico y específicamente la zona cañera.

3.1.7 Bibliografía

- CENGICAÑA (Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar). 2012. El Cultivo de la Caña de Azúcar en Guatemala. Guatemala. Artemis Edinter, S.A. 479 p.
- Gawander, J. 2007. Las consecuencias del cambio climático sobre los cultivos de la caña de azúcar en Fiji. Boletín de la OMM 65 (1); 34-39
- IPCC. 2007. "Resumen para responsable de políticas". En "Cambio Climático 2007: La Base Científica Física. Contribución del Grupo de Trabajo I al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático". (Solomon, D. Qin, M. Mannig, Z, Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor y H.L. Miller, eds.). Universidad de Cambridge.
- Subirós, F. 2000. El cultivo de la caña de azúcar. Editorial Universidad Estatal a Distancia, San José, Costa Rica. 441p.

3.2 SERVICIO 2. BASE DE DATOS OFICIAL DEL ICC

3.2.1 Introducción

El Instituto Privado de Investigación Sobre Cambio Climático actualmente dispone de 20 estaciones meteorológicas distribuidas en la Vertiente del Pacífico específicamente en la zona cañera del país.

Las estaciones meteorológicas captan y almacenan constantemente los datos de variables como: temperatura, precipitación, velocidad del viento, dirección del viento, humedad etc., datos que son transmitidos posteriormente a una computadora central ubicada en las oficinas del programa de Investigación en Clima e Hidrología.

Ante esta situación es de vital importancia disponer de una base de datos que permita ir almacenando los registros de todos estos datos climáticos, mas no así también es importante que esta base de datos sea actualizada periódicamente en un solo archivo o una sola base de datos.

Es por eso que este servicio se enfocó principalmente en la actualización de la base de datos del ICC, así mismo de crear un solo archivo conteniendo todos aquellos registros climatológicos históricos para no tener que hacer uso de varias bases de datos.

Así mismo se trabajó en la creación de un cuadro resumen que permitiera conocer aquellas estaciones que disponen de bases de datos completas o incluso incompletas, un factor que es sumamente importante a tomar en cuenta al momento que se quiera disponer de datos climáticos históricos.

3.2.2 Objetivos

3.2.2.1 General:

- Tener una base de datos correctamente estructurada y actualizada para su mejor manejo dentro del programa de Clima e Hidrología.

3.2.2.2 Específicos:

- Actualizar la base de datos meteorológicos del ICC hasta el mes de mayo del presente año.
- Realizar un cuadro resumen que permita determinar por mes y por año, en los que la base de datos se encuentre completa.

3.2.3 Metodología

3.2.3.1 Actualización de la base de datos meteorológicos hasta el mes de mayo 2014.

Para esta fase, se dispuso de todos los registros de históricos de los datos climáticos registrados por las estaciones meteorológicas, ya que encontrándose en diferentes archivos agrupados por años, fue necesario crear una sola base de datos, complementando en una sola base de datos todos los registros climatológicos, también se dispuso de la base de datos del presente año, tomando únicamente los datos hasta el mes de mayo del presente año

3.2.3.2 Cuadro resumen para conocer las bases completas e incompletas agrupados por mes y por año

Los cuadro resumen se generaron a partir de la creación de una tabla dinámica dentro de la base de datos actualizadas en el inciso anterior, a partir de esa tabla dinámica se procedió a determinar los años en los que las bases de datos se encontraban completas o no.

3.2.4 Resultados

3.2.4.1 Actualización de la base de datos meteorológicos hasta el mes de mayo 2014

Una base de datos es un conjunto de datos que ha sido organizado bajo un mismo contexto y cuya información está almacenada y lista para ser utilizada en cualquier momento. Las bases de datos pueden almacenar información sobre personas, productos, ventas o cualquier otra cosa. (Ortiz, 2014)

La base de datos del ICC se ha tratado de mantenerla lo más actualizada posible, el principal problema encontrado fue que los registros desde el origen de la mayoría de estaciones se encontraban en diferentes archivos, por lo que fue necesario crear una sola tabla con todos los registros.

La estructura de la base de datos fue la siguiente:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	Estación	Altitud (msnm)	Estrato	Fecha	Fecha (dd)	Fecha (mm)	Fecha (yyyy)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura media	Temperatura máxima (°C)	Amplitud Térmica	Radiación global (W m ⁻²)	Radiación de un día despejado (W/m ²)	Radiación solar acumulada (W m ⁻²)	Radiación diaria promedio (W/m ²)	Radiación diaria estimada Hargreaves (W/m ²)	Humedad Relativa mínima (%)	Humedad relativa media	Humedad relativa máxima (%)	Lluvia (mm)
2	CENGICAÑA	300	Alto	01/01/1997	1	1	1997													
3	CENGICAÑA	300	Alto	02/01/1997	2	1	1997													
4	CENGICAÑA	300	Alto	03/01/1997	3	1	1997													
5	CENGICAÑA	300	Alto	04/01/1997	4	1	1997													
6	CENGICAÑA	300	Alto	05/01/1997	5	1	1997													
7	CENGICAÑA	300	Alto	06/01/1997	6	1	1997													
8	CENGICAÑA	300	Alto	07/01/1997	7	1	1997													
9	CENGICAÑA	300	Alto	08/01/1997	8	1	1997													
10	CENGICAÑA	300	Alto	09/01/1997	9	1	1997													
11	CENGICAÑA	300	Alto	10/01/1997	10	1	1997													
12	CENGICAÑA	300	Alto	11/01/1997	11	1	1997													
13	CENGICAÑA	300	Alto	12/01/1997	12	1	1997													
14	CENGICAÑA	300	Alto	13/01/1997	13	1	1997													
15	CENGICAÑA	300	Alto	14/01/1997	14	1	1997													
16	CENGICAÑA	300	Alto	15/01/1997	15	1	1997													
17	CENGICAÑA	300	Alto	16/01/1997	16	1	1997													

Figura 49 Estructura utilizada para el ordenamiento de la base de datos.

Las variables a trabajar en su mayoría corresponden a:

Temperatura, amplitud térmica, Radiación, Humedad relativa, Lluvia y velocidad del viento.

Como un subproducto de esto, se generaron tablas dinámicas para poder comprender de forma resumida los resultados obtenidos. Las tablas dinámicas fueron generadas por cada estación, en total se obtuvieron 20 tablas dinámicas.

Cuadro 15 Tabla dinámica generada para resumen de resultados de la base de datos.

Año	Cuenta de Temperatura mínima (°C)	Cuenta de Temperatura máxima (°C)	Cuenta de Humedad Relativa mínima (%)	Cuenta de Humedad relativa máxima (%)	Cuenta de Lluvia (mm)	Cuenta de Velocidad media viento (Km h-1)	Cuenta de Velocidad máxima viento (Km h-1)
1997	44	44	44	44	44	44	42
1998	32	31	31	32	334	32	32
1999	353	342	330	356	358	358	355
2000	299	297	294	300	362	366	357
2001	364	362	361	365	365	365	365
2002	358	350	357	363	365	365	365
2003	342	339	335	340	362	355	355
2004	265	267	263	264	272	267	267
2005	362	356	357	364	365	251	250
2006	348	288	306	357	365	365	365
2007	365	365	365	365	365	365	365
2008	366	366	366	366	366	366	366
2009	365	365	365	365	365	365	365
2010	365	365	365	365	365	365	365
2011	365	365	365	365	365	365	365
2012	366	366	366	366	366	366	366
2013	365	365	365	365	365	365	365
2014	151	151	151	151	151	151	151
Total general	5475	5384	5386	5493	5900	5476	5461

Las estaciones que tienen completa su base de datos por ejemplo para en este caso la variable de Humedad relativa mínima se encuentran rellenas con el ashurado color negro, mientras que las estaciones con base de datos incompletas ya sea en uno o varios días, se encuentran ashuradas de color gris mientras que en blanco se encuentran aquellas estaciones que no poseen datos para la variable que se está trabajando.

3.2.5 Conclusiones

- Una base de datos actualizada brinda muchas ventajas, ya que se puede realizar una consulta más confiable de aquellos datos climáticos de interés, al mismo tiempo manejar una sola base de datos en lugar de pequeñas bases de datos distribuidas en diferentes hojas electrónicas facilita un mejor manejo de los datos en una sola tabla y evitamos lo que es la redundancia o duplicación de datos. La duplicación de datos genera a su vez una duplicación del trabajo a la hora de mantener las bases de datos y actualizarlas. Por tanto las Bases de Datos al reducir la duplicación de datos, disminuyen el trabajo. Es fundamental hacer copia de seguridad de la base de datos cada vez que esta quede actualizada.
- A través de la creación de un cuadro resumen de las bases de datos climáticos que se disponen, resumidas en aquellas que se encuentran completas o incompletas, brinda un mejor panorama sobre la disponibilidad de datos con que se cuenta a partir de las diferentes fechas, si es que se quiere realizar trabajos o investigaciones con datos climatológicos históricos.

3.2.6 Recomendaciones

- Es necesario continuar con la actualización de la base de datos del ICC, en el formato ya establecido para evitar así crear bases de datos distribuidas en otros documentos u hojas electrónicas ya que esto crearía cierto conflicto al momento de querer tener todo en una sola base de datos.

3.2.7 Bibliografía

- Ortiz, M., Bases de datos en Excel. 2014. En línea. Consultado 23-11-2014. Disponible en: <http://exceltotal.com/base-de-datos-en-excel/>