



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN INGENIERÍA**

INGENIERÍA CIVIL – APROVECHAMIENTOS HIDRÁULICOS

**ESTIMACIÓN ALTERNATIVA DEL POTENCIAL DE
TORMENTAS A PARTIR DE INFORMACION
CLIMATOLÓGICA ANTECEDENTE. CASO DE
ESTUDIO NOROESTE DE MEXICO.**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

DOCTOR EN INGENIERÍA

P R E S E N T A :

FABIOLA DEL ROSARIO ARELLANO LARA



TUTOR:

**DR. CARLOS AGUSTÍN ESCALANTE SANDOVAL
FACULTAD DE INGENIERÍA**

MÉXICO, D.F. DICIEMBRE 2012



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. María Joselina Espinoza Ayala
Secretario: Dr. Rodolfo Silva Casarín
Vocal: Dr. Carlos Agustín Escalante Sandoval
1^{er}. Suplente: Dra. Lilia Reyes Chávez
2^{do}. Suplente: Dr. Paulo Salles Afonso de Almeida

Lugar donde se realizó la tesis:

FACULTAD DE INGENIERÍA

TUTOR DE TESIS:

DR. CARLOS A. ESCALANTE SANDOVAL

FIRMA

DEDICATORIAS

Dedico esta investigación a:

A Dios,

A mis padres, **José Pablo Arellano Rodríguez y Ma. Concepción Lara Servin**, y a mis hermanos **Dinorah, Azucena, Esmeralda, Héctor Hugo y Maria Concepción**, por su apoyo, confianza, por haber recorrido este camino conmigo y por amor incondicional.

A mi hermano **Héctor Hugo**, por su colaboración fundamental en la realización de esta investigación. ¡tormentas!

y

A todos mis **amigos y compañeros**, quienes me acompañaron y animaron a lo largo del desarrollo de ésta tesis.

A todos ustedes por alentarme, sinceramente GRACIAS por siempre.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor de tesis:

Dr. Carlos A. Escalante Sandoval

A mis sinodales:

Dra. María Joselina Espinoza Ayala

Dra. Lilia Reyes Chávez

Dr. Paulo Salles Afonso de Almeida

Dr. Rodolfo Silva Casarín

A la **Universidad Nacional Autónoma de México**.

Al **Servicio Meteorológico Nacional (SMN)** por el suministro de las imágenes satelitales empleadas en la investigación.

Al **M.C. Jaime Velázquez Álvarez** por la orientación y apoyo sobre el manejo de imágenes de satélite.

Al **Dr. Michael Weinreb** y al **Dr. Dejianh Han** investigadores de la NOAA.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**

Resumen

La estimación de la precipitación potencial de tormentas con antelación suficiente es esencial en el control de inundaciones, hecho que a su vez es de gran relevancia para México debido a la ocurrencia de severas inundaciones asociadas a la temporada de lluvias. Durante el monzón mexicano o monzón de Norteamérica se presentan en el noroeste de país el mayor número de tormentas generadas por sistemas convectivos de mesoescala.

En este contexto, el objetivo principal de ésta investigación fue desarrollar una metodología que permitiera la estimación del potencial de tormentas (cantidad de lluvia en milímetros) en la región noroeste de México, con base en los patrones antecedentes de estas y con un tiempo de antelación extenso. Previamente a la determinación de los patrones antecedentes de tormentas fue delimitada la región homogénea de precipitación por medio de la combinación de las técnicas multivariadas análisis de componentes principales y agrupación jerárquica ascendente; así se determinaron tres regiones no solamente asociadas a los patrones de lluvia, sino también claramente relacionadas al relieve, como son las regiones costa, media y montaña. Con base en ésta delimitación, y con el acoplamiento de información climatológica medida en superficie y datos interpretados de imágenes de satélite se obtuvieron los patrones antecedentes para una muestra de tormentas ocurridas en la región de montaña, durante los meses de julio del periodo de estudio conjunto (2004-2006). El acoplamiento de información mencionada mostró alta relación entre los diferentes datos, sustentando de esta manera el hecho de que la información meteorológica sea empleada en forma aislada y eficiente en la estimación del potencial de tormentas con un tiempo de anticipación de 12 horas. Estas relaciones son especialmente importantes en los casos en los que no se cuenta con información de satélite, las cuales son presentadas en el cuerpo de la investigación.

Abstrac

The estimate storm potentiality (amount of rainfall) in advance is essential in controlling floods, which is highly relevant to Mexico where severe storms occur in the rainy season. During the Mexican monsoon or North American monsoon at northwestern, most of storms generated by mesoscale convective systems occur.

In this regard, the main objective of this research was to develop a methodology to estimate storm potentiality in the northwestern of Mexico, based on antecedent pattern of storms in advance. Before to determination of antecedent patterns of storms was delineated the rainfall homogeneous region through combination of multivariate techniques such as principal components analysis and ascending hierarchical clustering, and were identified three regions associated to rainfall patterns, but also clearly related to the relief. These regions are coastal, medium and mountain. Based on this delineation, and also coupling surface weather information and data interpreted from satellite imagery antecedent patterns were obtained for a sample of storms occurred in the mountain region, during the months of July within period of study (2004-2006). The coupling information aforementioned showed high relationship between them, thereby supporting the fact that weather information is efficiently used in isolate way for estimating storm potentiality 12 hours in advance. These equations are especially important in cases which there are no satellite information available, such results are included into this research.

CONTENIDO

Índice	i
Índice de tablas	iii
Índice de figuras	iv
Glosario	vi

ÍNDICE

Introducción	1
Capítulo 1. Aspectos básicos sobre los mecanismos generadores de lluvia	4
1.1 Los procesos de formación la precipitación	4
1.2 Tipos de precipitación	7
1.2.1 Precipitación convectiva	7
1.2.2 Precipitación frontal	13
1.2.3 Precipitación orográfica	13
1.3 Comentarios relevantes	14
Capítulo 2. Conformación de regiones de precipitación homogéneas con base en el análisis multivariado	15
2.1 Antecedentes	15
2.2 Región del Noroeste de México	17
2.3 Regionalizaciones antecedentes en el Noroeste de México	18
2.4 Metodología del análisis regional multivariado	19
2.4.1 Datos de estudio	19
2.4.2 Matrices de variables y metodología	22
2.5 Resultados del análisis regional multivariado	24
2.5.1 Resultados de los escenarios del Análisis Inicial	24
2.5.2 Resultados de los escenarios del Análisis Final	30
Capítulo 3. Estudio de sistemas de tormentas con base en imágenes satelitales	35
3.1 Generalidades sobre el análisis de imágenes de satélite	35
3.1.1 Tipos de satélites	35
3.1.2 Interpretación de imágenes de satélite	36
3.1.3 Realce de imágenes	37
3.1.1 Fenómenos atmosféricos observables por medio de imágenes satelitales	38
3.2 Estimación de precipitación en base a imágenes satelitales	38
3.3 Caso de estudio	40
3.3.1 Caracterización morfológica de tormentas	40
3.4 Determinación de lámina de lluvia para un caso de estudio especial	53
Capítulo 4. Patrones climáticos antecedentes de tormentas	56
4.1 Antecedentes	56
4.2 Caso de estudio	57
4.3 Condiciones meteorológicas antecedentes	58
4.3.1 Análisis en superficie	58
4.3.2 Análisis de tormentas a partir de imágenes de satélite	64
4.4 Resultados	67
4.4.1 Observaciones generales: Tormentas fuertes (rango 20-50), zona montañosa	68

4.4.2	Observaciones generales: Tormentas moderadas (rango 10-20), zona montañosa	72
4.4.3	Aplicación de patrones de temperaturas antecedentes en la estimación del rango de lamina de lluvia	79
Capítulo 5. Conclusiones		80
5.1	Conclusiones del apartado “Aspectos básicos sobre los mecanismos generadores de lluvia”	80
5.2	Conclusiones del apartado “Conformación de regiones de precipitación homogéneas con base en el análisis multivariado”	81
5.3	Conclusiones del apartado “Estudio de sistemas de tormentas con base en imágenes satelitales”	82
5.4	Conclusiones del apartado “Patrones climáticos antecedentes de tormentas”	83
5.5	Conclusiones generales	84
Bibliografía y referencias		86
Anexos		94
Anexo 1	Catalogo de estaciones climatológicas	95
Anexo 2	Gráficos obtenidos para los escenarios de CJA, Análisis Inicial	104
Anexo 3	Procesamiento de información de superficie	114
Anexo 4	Evolución de tormentas obtenidas con base en imágenes de satélite	121
Anexo 5	Soporte del análisis combinado de información de superficie y satélite	134

Índice de tablas

Tabla 1.1. Criterios principales de clasificación de las precipitaciones.	5
Tabla 1.2. Escalas vs. Procesos atmosféricos (Thunis y Bornstein, 1996)	11
Tabla 2.1. Lista de variables empleadas en el análisis regional del Análisis Inicial	22
Tabla 2.2. Concentrado del total de variables creadas para el Análisis Final	23
Tabla 2.3. Grupos de variables por cada escenario de simulación en la regionalización.	24
Tabla 2.4. Cargas de los factores 1 y 2 de correlación derivadas del ACP sobre las variables del primero, segundo y tercer cuadrante.	28
Tabla 2.5. Grupos de variables por cada escenario de simulación en la regionalización.	31
Tabla 3.1. EMA's localizadas dentro de la zona de estudio.	40
Tabla 3.2. Rangos de lluvia utilizados por SMN	42
Tabla 3.3. Tormentas moderadas, EMAs Alamos, mes de julio	43
Tabla 3.4. Tormentas fuertes, EMAs Alamos, mes de julio	43
Tabla 3.5. Clasificación de tormentas, mes de junio, EMA Álamos	43
Tabla 3.6. Clasificación de tormentas, mes de agosto, EMA Álamos	43
Tabla 3.7. Clasificación de tormentas, mes de sep., EMA Álamos	43
Tabla 3.8. Datos estadísticos sobre la identificación de tormentas registradas por la EMA Alamos., mes Julio	44
Tabla 3.9. Paleta de colores empleada en el realce por colores de nubes frías.	47
Tabla 4.a. EMA's localizadas dentro de la zona de estudio.	58
Tabla 4.1. Tormentas de montaña empleadas para el análisis climático antecedente en superficie	60
Tabla 4.2. Coeficientes de correlación entre las variables meteorológicas medidas en superficie. Tormentas moderadas	60
Tabla 4.3. Coeficientes de correlación entre las variables meteorológicas medidas en superficie. Tormentas fuertes	60
Tabla 4.4. Lista de tormentas moderadas para análisis	65
Tabla 4.5. Lista de tormentas fuertes para análisis	65
Tabla 4.6. Coeficientes de correlación entre superficie y satélite, 12 hr previas a la precipitación	66
Tabla 4.7. Tormentas de prueba de tendencias antecedentes	79

Índice de figuras

Figura 1.1. -Tamaños, concentración y velocidades terminales de las partículas típicas en el proceso de formación de nubes y de la precipitación (Rogers y Yau, 1989)	6
Figura 1.2. - Modelo de evolución de una tormenta ordinaria de acuerdo a Byers-Braham. La circulación del aire y la forma de precipitación también son representadas (figura adaptada de Martín y Riosalido, (1999), anteriormente citada en Byers-Braham, (1949)).	8
Figura 1.3. - Esquema de multicélula convectiva típica, reflectividad del radar en decibeles (figura adaptada de Martín y Riosalido, (1999), anteriormente citada en Doswell, (1982))	10
Figura 1.4. - Corte vertical de una tormenta de supercélula madura (esquema adaptado de Martín y Riosalido, (1999), anteriormente citada en Lemon, (1980)).	11
Figura 2.a. - Conformación espacial de la zona_NAME.	18
Figura 2.1. - Estaciones del ERIC III pertenecientes a las regiones hidrológicas. No 8, 9 y 10.	20
Figura 2.2. - Círculos de proximidad para complementación de registros en las estaciones	21
Figura 2.3. - Estaciones validadas para el estudio regional	21
Figura 2.4. - Distribuciones espaciales correspondientes a las simulaciones CJA para los escenarios Caos, Representativa 1_CU, 2_CU,3_CU del Análisis Inicial.	25
Figura 2.5. - Distribuciones espaciales correspondientes a las simulaciones CJA para los escenarios,1_CU, 2_CU y 3_CU del Análisis Inicial, modificados por selección de variables (80% y 70%).	29
Figura 2.6. - Distribución espacial de las estaciones y dendogramas correspondientes a las simulaciones L-Cv y geo L-Cv	31
Figura 2.7. - Definición de las fronteras de la regionalización geo L-Cv	32
Figura 2.8. - Mapa del acoplamiento de curvas de nivel y las fronteras de regionalización.	34
Figura 2.9. -Modelo digital de elevación esc. 1:50,000 y las fronteras de regionalización	34
Figura 3.1. - EMA's localizadas dentro de la zona de estudio.	41
Figura 3.2. - Extracto de imágenes de satélite IR canal 4 del día 13 de julio del 2005	45
Figura 3.3. - Ejemplos del procesamiento primario de las imágenes IR	47
Figura 3.4. - Escenario de temperaturas por rangos (°C)	48
Figura 3.5. - Muestra del procesamiento de imágenes de la tormenta 07/07/04	50
Figura 3.6. - Trayectoria de los sistemas nubosos, tormenta 07/07/04	51
Figura 3.7. - Áreas de cobertura nubosa de la tormenta 07/07/04 de acuerdo a los rangos de temperatura empleados en el estudio.	51
Figura 3.8. - Longitudes de los ejes mayor y menos trazados para la tormenta 07/07/04	52
Figura 3.9. - Lluvia estimada entre el periodo de las 01:49 hr a 02:51 hr para la tormenta del 29 de septiembre del 2004 en Querétaro, Qro.	54
Figura 4.a. - Delimitación espacial de la zona montañosa de estudio.	59
Figura 4.1. -Patrón de temperaturas promedio en la zona de montaña, tormentas moderadas y fuertes.	61
Figura 4.2. -Patrón de humedad relativa promedio en la zona de montaña, tormentas moderadas y fuertes.	62
Figura 4.3. -Patrón de direcciones de viento promedio en la zona de montaña, tormentas moderadas y fuertes.	62
Figura 4.4. -Patrón de velocidades de viento promedio en la zona de montaña, tormentas moderadas y fuertes	63

Figura 4.5. -Patrón de presiones barométricas promedio en la zona de montaña, tormentas moderadas y fuertes.	63
Figura 4.6. -Patrón de radiación solar promedio en la zona de montaña, tormentas moderadas y fuertes.	64
Figura 4.7. - Curvas de temperaturas promedio, tormentas moderadas	67
Figura 4.8. - Curvas de temperaturas promedio, tormentas fuertes	67
Figura 4.9. - Cobertura de las regiones parciales dentro de la zona de montaña	69
Figura 4.10. -Coeficientes de correlación temperaturas sup-satélite en zona montaña y zonas parciales, tormentas fuertes.	70
Figura 4.11. -Curvas Δssi (diferencias de temp entre sup y sat) y curvas δssi (cambios propios de las diferencias en el tiempo), tormentas fuertes. Curvas δsat_i (evolución de los cambios de temperaturas en sat) y curvas δsup_i (evolución de los cambios de temperaturas en sup), zona montaña y zonas parciales, tormentas fuertes.	71
Figura 4.12. -Curvas de porcentajes de reducción entre temp sup y sat, zona montaña y zonas parciales. (Zona montaña, pivote), tormentas fuertes.	72
Figura 4.13. -Coeficientes de correlación temperaturas sup-satélite en zona montaña y zonas parciales, tormentas moderadas.	73
Figura 4.14. -Curvas Δssi (diferencias de temp entre sup y sat) y curvas δssi (cambios propios de las diferencias en el tiempo), tormentas fuertes. Curvas δsat_i (evolución de los cambios de temperaturas en sat) y curvas δsup_i (evolución de los cambios de temperaturas en sup), zona montaña y zonas parciales, tormentas moderadas.	74
Figura 4.15. -Curvas de porcentajes de reducción entre temp sup y sat, zona montaña y zonas parciales. (Zona montaña, pivote), tormentas moderadas.	75
Figura 4.16. -Ecuaciones de los patrones de temperaturas y de humedades relativas en superficie, 12 horas previas. Tormentas moderadas.	76
Figura 4.17. -Ecuaciones de los patrones de temperaturas y de humedades relativas en superficie, 12 horas previas. Tormentas fuertes.	77
Figura 4.18. -Curvas de los patrones de temperaturas y de humedades relativas en superficie, tormentas de prueba	79
Figura 4.19. -Distribución espacial de lluvia estimada para la tormenta 04/07/2004	80

Glosario

Termino	Significado
ACP	Análisis de componentes principales
Alt	Altitud
AVHRR	Radiómetro avanzado a muy alta resolución, por sus siglas en inglés
BP	Presión barométrica
CCM	Complejos convectivos de mesoescala
CJA	Clasificación jerárquica ascendente
CvAcum_#mes	Coefficiente de variación de precipitación media mensual
CvAnual	Coefficiente de variación de precipitación promedio anual
CvLluvAn	Coef. de variación de días anuales de lluvia
CvMax24	Coef. de variación de HpMax24per
CvMax48	Coef. de variación de HpMax48per
CvMmesAnual	Coefficiente de variación de precipitación media mensual por año
CvSeason	Coef. de variación de la lluvia acumulada estacional
D_lluvia_#mes	Número de días lluviosos promedio por mes (días)
D_lluviaMAMES	Número de días promedio de lluvia mensuales por año
D_lluviaMANUAL	Número de días lluviosos promedio al año
D_lluvStdAn	Desviación estándar de días con lluvia anuales
Dir	Variable de dirección del viento
EMA	Estaciones meteorológicas automáticas
ERIC III	Extracción rápida de información climatológica
ESMR-5	Electrically scanning microwave radiometer
GOES	Geostationary operational environmental satellite
H.R	Variable de humedad relativa
Hp_acum_#mes_desv	Desviación estándar de la lluvia promedio mensual (mm)
Hp_acum_M#	Lluvia acumulada mensual promedio (mm)
Hp_Mseason	Lluvia acumulada estacional promedio anual (mm)
HpDesvAnual	Desviación estándar de la lluvia anual (mm)
HpDesvSeason	Des. estándar de la lluvia acumulada estacional promedio anual (mm)
HpMANual	Lluvia acumulada anual promedio (mm)
HpMax_#mes	Lluvia máxima diaria mensual (mm)
HpMax24per	Lluvia max. de 24 hr. promedio (mm), en el periodo
HpMax48per	Lluvia max. de 48 hr. promedio (mm), en el periodo
HpMedia_#mes	Lluvia media diaria mensual (mm)
HpVarAnual	Varianza de la lluvia anual
IR	Imágenes en el espectro infrarrojo
ISCCP	International satellite cloud climatology
Lat	Latitud
Lcv#mes	Coef. de variación – L de lluvia acumulada mensual.

Lcv_DAn	Coef. de variación – L de días de lluvia promedio anuales
Lcv_HpAnual	Coef. de variación – L de la lluvia media anual en todo el periodo
Long	Longitud
LT	Líneas de turbonada
LUT	Lookup tables, <i>tablas de consulta</i>
Lvc_HpS	Coef. de variación – L de lluvia estacional promedio anual
METEOSAT	Satélites de tipo geoestacionario
NAME	North American Monsoon Experiment, por las siglas en inglés
NAMS	Sistema de monzón norteamericano, por sus siglas en ingles
NESDIS	National environmental satellite, data and information service
NOAA	National oceanic and atmospheric administration
PCX	Formato en pixeles digital comprimido, valores de brillantez
R.H. 10	Región Hidrológico No. 10
R.H. 8	Región Hidrológico No. 8
R.H. 9	Región Hidrológico No. 9
Rain	Variable precipitación
Raster	Formato de imagen digital
RGB	Red-green-blue
RS	Variable radiación solar
SCM	Sistemas convectivos de mesoescala
SCSMEX	Recuperación de lluvia durante el experimento del monzón del mar del Sur de China, por sus siglas en inglés
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
SQL	Structured query language
SSM/I	Special sensor microwave imagery
Temp	Variable temperatura
TRMM	Misión de Medición de Lluvia Tropical por sus siglas en ingles
TRRM PR	Tropical rainfall measuring mision precipitation radar
VIS	Imágenes de satélite en el espectro visible
WSK	Variable de la velocidad del viento
WSMDir	Variable de dirección de la ráfaga de viento
WSMK	Variable de velocidad de la ráfaga de viento
WV	Imágenes de satélite de vapor de agua
δsat_i	Gradiente interno de evolución entre las temperaturas de satélite
Δssi	Diferencias entre temperaturas de superficie y satélite
Assi	Gradientes de evolución entre estas diferencias
δsup_i	Gradiente interno de evolución entre las temperaturas de superficie

Introducción

Antecedentes

En México la red de estaciones climatológicas a cargo del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) no presenta una distribución uniforme, por lo cual no cumple con las recomendaciones mínimas de densidad del número de estaciones que dicta la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (Arellano, 2006). Lo anterior conduce a que los datos de la red climatológica deben ser utilizados con reservas, especialmente cuando se trata de la realización de pronósticos de tormentas. La importante dispersión de estas estaciones de medición obliga a la extrapolación de datos en la mayoría de las simulaciones, y aunque los modelos de pronóstico posean formulaciones sólidas, las estimaciones que estos puedan generar difícilmente representan la variabilidad del terreno.

Por otro lado, el SMN también mantiene y opera una red de radares meteorológicos instalados a lo largo del país, dispone de imágenes de satélite para el monitoreo de la atmósfera y emplea varios modelos atmosféricos de pronóstico, como el modelo meteorológico a mesoescala MM5-3. En este sentido, en México se realiza el monitoreo de las condiciones climatológicas y atmosféricas de forma remota y superficial. Sin embargo, aún no ha sido aprovechado efectivamente el enorme potencial operativo de

la información proveniente de radar, satélite o de modelos atmosféricos, en la estimación de lluvia.

Adicionalmente resulta de gran relevancia la presencia de numerosas tormentas en el país, originadas entre otras causas, por las características geográficas especiales de la Republica. Las tormentas más significativas y frecuentes que tienen lugar en México son originadas por los sistemas convectivos de mesoescala (SCM) los cuales involucran en la mayoría de las ocasiones graves daños por inundación a la población. La ocurrencia de estos fenómenos es de especial importancia en el Noroeste de México, región donde tiene lugar el monzón mexicano. Sin embargo existen otras variedades de tormentas que requieren también de ser identificadas, así como los respectivos mecanismos que las originan, de tal forma que estos procesos puedan ser implementados en la modelación hidrológica clásica, y las acciones de prevención y mitigación a los fenómenos sean más eficientes.

El empleo de datos de lluvia registrados únicamente por redes pluviométricas, radares meteorológicos o satélites, proporciona una certeza aceptable en la estimación de la precipitación, no así óptima al no involucrar el conocimiento del tipo de tormentas debido a las limitantes propias de cada técnica.

Con base en los motivos expuestos, en este trabajo de investigación se exploró la integración de información proveniente de imágenes de satélite, así como de los datos medidos en superficie y se presenta como resultado una metodología alternativa de la estimación de potenciales de tormentas, la cual contempla la climatología antecedente.

Objetivos de la investigación

Objetivo general

Proponer una metodología de estimación de potencial de tormentas aprovechando la información proveniente de imágenes satelitales, la información de superficie y la climatología antecedente.

Objetivos específicos

- Establecimiento de regiones homogéneas de precipitación.
- Exploración de la caracterización de tormentas empleando imágenes de satélite.
- Relacionar la información de satélite y de superficie para las tormentas.

Estructuración de la tesis

La presente investigación se desarrolla a lo largo de seis capítulos, los cuales son descritos a continuación en forma breve.

Los aspectos relacionados con la fundamentación de la investigación como son los objetivos, así como el planteamiento general del problema abordado se encuentran dentro de esta **introducción**.

Dentro del **capítulo 1** se exponen los aspectos básicos del origen y el proceso de desarrollo de tormentas. Además, se hace énfasis especial en los fenómenos de precipitación de tipo convectivo, los cuales son los generadores de las tormentas más intensas.

El área de estudio y el proceso de establecimiento de sus respectivas regiones de precipitación homogéneas obtenidas a partir de una metodología propuesta basada en la aplicación de métodos multivariados son presentados dentro del **capítulo 2**.

Una vez establecidas las regiones de precipitación homogéneas se procedió con la exploración y las primeras aplicaciones del aprovechamiento de las imágenes de satélite en la observación de la evolución de tormentas ocurridas en esta región, lo cual se aplicó a un caso de estudio. También se incluye la descripción de la técnica propuesta e implementada para la parametrización de tormentas, así como la determinación de lámina de lluvia aplicando a un caso especial igualmente empleando imágenes satelitales, esto con propósito solamente comparativo. Lo anterior corresponde al contenido del **capítulo 3**.

En el **capítulo 4** fueron relacionadas la información aportada por las imágenes de satélite y aquella registrada en superficie para una muestra seleccionada de tormentas acotadas a la región se estudio. Ambos tipos de datos corresponden a un periodo de tiempo antecedente a cada evento. Posteriormente, a partir de las relaciones encontradas se propuso un método alternativo de estimación temprana de ocurrencia de tormentas con potencial moderado y fuerte de lluvia, el cual es de implementación sencilla.

En el **capítulo 5** se presentan las conclusiones organizadas por cada capítulo de la presente investigación; y finalmente, la bibliografía y referencias constituyen el apartado del mismo nombre. También se adjunta un apartado con los anexos del trabajo.

Capítulo 1

Aspectos básicos sobre los mecanismos generadores de lluvia

1.1 Los procesos de formación la precipitación

Para iniciar el estudio de los procesos físicos involucrados en la generación de la precipitación resulta conveniente contar con una definición general de este fenómeno meteorológico, así el termino precipitación se refiere a la caída de partículas de agua en estado sólido o líquido de las nubes.

La lluvia, el granizo y la nieve son los tipos más representativos de las precipitaciones, sin embargo, se han encontrado en la literatura dos clasificaciones esenciales de la precipitación de acuerdo a la génesis, y a la forma e intensidad de ésta. En la Tabla 1.1 se muestran los criterios correspondientes a cada una de estas categorías.

Tabla 1.1. Criterios principales de clasificación de las precipitaciones.

Categoría de agrupación	Criterio
Génesis de la precipitación	Obedece al proceso de formación de nube de la que proviene la precipitación.
Forma de los elementos de la precipitación	Se toma en cuenta el estado físico de la precipitación (sólido ó líquido) y el tamaño de las gotas, el cual determina la velocidad de caída de la precipitación.

La relación entre las nubes y la precipitación es muy estrecha, ya que la precipitación está condicionada a la presencia de las nubes, así en este contexto es valido establecer que la precipitación corresponde a la etapa final de la existencia de la nube. Por lo tanto, la comprensión de la generación de precipitación se encuentra ligada directamente al conocimiento de los mecanismos físicos del origen, desarrollo y disipación de las nubes, los cuales se describen brevemente a continuación.

En general, una nube se forma cuando una parcela de aire húmedo de aire es elevada y enfriada progresivamente hasta por debajo de su punto de rocío, así dando lugar a la condensación del vapor de agua, proceso mediante el cual se originan sus partículas componentes, este es el método principal de formación de nubes (Battan, 1962; Triplet y Roche, 1986; Rogers y Yau, 1989). Las nubes están compuestas de gotitas de agua (nube calida), gotitas de agua y cristales de hielo (nube mezclada), o cristales de hielo (nube fría) de acuerdo a los tipos de mecanismos de condensación que hayan tenido lugar en el aire y estas pueden tener formas diversas que dependen de los movimientos verticales de la atmósfera y la altura a la que se encuentren.

En general, el tamaño de las partículas que conforman la nube está comprendido desde unos pocos micrones hasta los 100 micrones, partículas nombradas como gotitas de nube (Battan, 1962), su tamaño es tan pequeño que su caída es impedida por las corrientes ascendentes del aire o por evaporación. Posteriormente estas gotitas de nube incrementaran su tamaño para convertirse en las gotitas de agua que finalmente se precipitarán, siempre y cuando se conjuguen los procesos microfísicos en el interior de la nube. En la Figura 1.1 está representado el proceso de formación de nube.

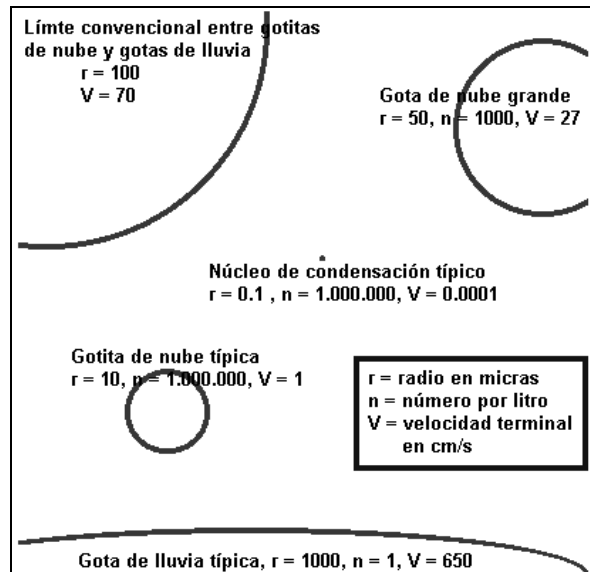


Figura 1.1. Tamaños, concentración y velocidades terminales de las partículas típicas en el proceso de formación de nubes y de la precipitación (Rogers y Yau, 1989)

Las condiciones determinantes bajo las cuales se da la ocurrencia de la condensación son dos (Inzunza, 2003):

- El aire debe estar saturado de humedad. La saturación puede originarse ya sea cuando, el aire se enfría hasta alcanzar la temperatura del punto de rocío ó, cuando al aire se le agrega suficiente vapor de agua. Estos procesos pueden presentarse de manera simultánea o independiente.
- La existencia de partículas sobre las cuales el vapor de agua pueda adherirse para condensarse, las cuales son denominadas como núcleos de condensación.

Es importante resaltar la gran importancia de los núcleos de condensación en la formación de nubes, ya que la probabilidad de ocurrencia de estas resultaría reducida si no estuvieran presentes estas partículas higroscópicas en la atmósfera. De otro modo sería necesario un estado de sobresaturación del vapor de agua mayor del 100% de humedad relativa para desencadenar la condensación, en cambio sobre los núcleos de condensación el proceso puede comenzar con una humedad relativa cercana al 75%.

Una vez formadas las primeras gotitas de nube más diminutas por condensación, continua el desarrollo de la nube ligado al crecimiento de estas partículas, como se mencionó previamente, activado por diferentes mecanismos microfísicos que actúan en mayor o menor grado y que son los causantes del mayor incremento del volumen de la nube. Los mecanismos relacionados con las nubes cálidas son la difusión de vapor de agua en una primera etapa y enseguida por colisión-coalescencia. En el caso de nubes frías y mezcladas se presenta el proceso de Bergeron o proceso de los cristales de hielo, propuesto por el meteorólogo noruego Tom Bergeron a principios de 1930.

Los factores que rigen el crecimiento de las gotitas de nube por difusión de vapor son la cantidad de vapor disponible, las propiedades higroscópicas del núcleo y el tamaño de partícula. Este proceso de incremento es muy rápido sin embargo decrece su eficiencia al aumentar el número de gotitas y su tamaño, sin embargo el tamaño todavía es lo suficientemente pequeño para que estas permanezcan en suspensión. En esta etapa los

movimientos de ascenso y descenso de las gotitas debido a las corrientes verticales de aire se vuelven importantes por que inducen al desarrollo de las gotitas de agua por colisión-coalescencia. Los choques y adhesión entre las gotitas provocan el aumento de su volumen, al igual que su velocidad terminal, luego cuando adquieren un tamaño (gotas de lluvia) lo suficientemente grande las gotas caerán de la nube en forma de precipitación. Este tipo de precipitación es común en zonas tropicales.

En la formulación teórica del proceso de los cristales de hielo se enfatizó la importancia del hecho de que la saturación de la presión de vapor del agua y del hielo eran diferentes para temperaturas justo por debajo del punto de congelación. La máxima diferencia se alcanza a los -12°C . Esto significa que el aire está saturado con respecto al agua pero está sobresaturado con respecto a los cristales de hielo. Como resultado sucede que los cristales de hielo adquieren la función de núcleos de congelación los cuales pueden crecer rápidamente y comenzar a caer (Battan, 1962). Los movimientos verticales del aire y la colisión entre cristales pueden incrementar el número de núcleos de congelación y en consecuencia la evaporación, dando lugar a un ciclo continuo que formará las masas de copos de nieve. Las masas de nieve al caer pueden derretirse y continuar su caída como lluvia. El proceso descrito es característico de las latitudes medias.

Por otro lado, los procesos que derivan el enfriamiento de las masas de aire y por lo tanto la formación de las nubes son: enfriamiento convectivo, enfriamiento mecánico y enfriamiento por radiación. A partir de dos de estos mecanismos, el convectivo y mecánico son generadas las tres clases de precipitaciones más frecuentes denominadas precipitación orográfica y precipitación frontal provenientes del enfriamiento mecánico y la precipitación convectiva resultante del mecanismo del mismo nombre. En el siguiente apartado se comentan las características generales de cada uno de estos tipos de precipitaciones.

1.2 Tipos de precipitación

1.2.1 Precipitación convectiva

Se trata de la lluvia proveniente de una nube originada del enfriamiento convectivo o de la convección térmica, la cual es propiciada por la inestabilidad de una masa de aire caliente respecto a las parcelas circundantes. La turbulencia generada ocasiona el ascenso inicial de la masa de aire, luego a medida que la parcela es elevada su temperatura desciende hasta llegar a la temperatura de punto de rocío, donde comienza el proceso de condensación. El ascenso continúa hasta que la temperatura de la masa de aire frío está en equilibrio o es mayor que la temperatura del aire que la rodea, etapa en la cual la convección se detiene. Así son generadas las nubes cumuliformes denominadas también células convectivas debido a que desarrollan precipitación en forma de chubascos o tormentas, caracterizadas por fuertes intensidades y cortas duraciones (1 hora).

La base de las nubes cumuliformes se localiza normalmente en las altitudes en las cuales ocurre la saturación, alrededor de los 2 km sobre la superficie terrestre. El tope de estas nubes corresponde a la elevación donde la parcela de aire ha alcanzado o superado la temperatura del aire circundante. De acuerdo al grado de inestabilidad del

aire, el tope de la nube puede ascender a la elevación cercana a los 15 km sobre las capas estables de la tropopausa y bajo la base de la estratosfera (Rogers y Yau,1989). Tal crecimiento vertical está asociado a fase de disipación de la tormenta.

El ciclo de vida de una tormenta ordinaria (célula convectiva) comprende tres etapas que son, la fase inicial o cúmulo, la fase de madurez y la fase de disipación. En la Figura 1.2, se muestra la representación de estas fases. Esta sencilla idealización fue propuesta por Byers y Braham en 1949, la cual está basada en las observaciones de las tormentas presentes en latitudes medias (Byers y Braham, 1949; Rogers y Yau, 1989; Smith, 1993).

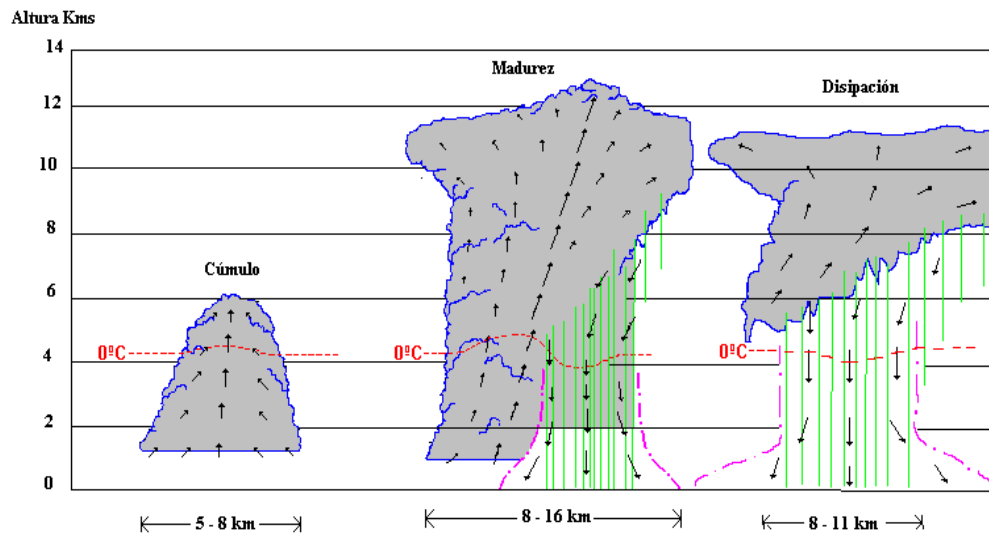


Figura 1.2. Modelo de evolución de una tormenta ordinaria de acuerdo a Byers-Braham. La circulación del aire y la forma de precipitación también son representadas (figura adaptada de Martín y Riosalido, (1999), anteriormente citada en Byers-Braham, (1949)).

Las características fundamentales de cada una de las etapas según Martín y Riosalido (1999) se mencionan a continuación:

- Fase inicial o cúmulo: En el interior de la nube predominan los movimientos ascendentes que determinan su desarrollo alcanzando una altura entre los 6 y 8 km. El cúmulo está compuesto básicamente de gotitas de nube por lo que no se presenta precipitación, la máxima humedad, así como la velocidad vertical mayor se localizan al centro del sistema y el ancho de la base oscila entre 5 y 8 km. En esta etapa no se producen rayos.
- Fase de madurez: La torre vertical puede alcanzar una elevación cercana a los 12 km, se tiene la presencia de precipitación la cual detona la corriente descendente que arrastra el aire por fricción, misma que evoluciona gradualmente. La precipitación cae verticalmente manteniéndose muy cerca de, o en contacto con la corriente descendente. La base de la nube se extiende entre los 8 y 16 km, y aparecen los primeros rayos durante esta etapa.
- Fase de disipación: En esta etapa la circulación ascendente del aire ha sido absorbida por la corriente descendente, excepto en la parte superior

de la célula. La tormenta ha alcanzado su máximo crecimiento, que puede ser hasta los 15 km, ya que ha cesado alimentación de agua a evaporar suministrada por la corriente ascendente. El final de la tormenta es una masa de aire frío y húmedo, manteniéndose como una burbuja fría que tiende a esparcirse por la superficie y puede derivar un micro frente en superficie. La frecuencia de los rayos que se originan en esta etapa disminuye notablemente en comparación con la fase previa. La precipitación continúa hasta la desaparición de la burbuja fría.

Un aspecto de gran importancia acerca de la precipitación convectiva es el hecho de que las células convectivas pueden existir en forma aislada u organizadas de manera más o menos estructurada. La organización de las células convectivas ha sido establecida con base en las observaciones de estos fenómenos, las cuales son realizadas por medio de los radares y los satélites atmosféricos.

La descripción básica de las tormentas convectivas derivada de observaciones de radar consta de tres estructuras celulares principales, estas son las células aisladas, las multicélulas y las supercélulas. Tal organización toma en cuenta la intensidad de las corrientes ascendentes, y la frecuencia de ocurrencia fundamentalmente. Las propiedades de la célula aislada corresponden a las descritas anteriormente para la tormenta ordinaria.

Las estructuras multicelulares son las más comunes y contienen a diferentes núcleos convectivos en distintas fases de desarrollo. Las tormentas multicelulares normalmente se presentan cuando existe gran turbulencia atmosférica (cizalladura vertical) además pueden encontrarse agrupadas en forma de racimos (cluster) aparentemente circulares o en estructuras agrupadas en forma de línea (líneas de turbonada), su grado de organización es mayor que en el caso de las células aisladas.

Los sistemas convectivos de mesoescala quedan comprendidos dentro de esta clase de arreglo de núcleos capaces de generar tormentas muy severas en superficie. En la Figura 1.3, se observan diferentes células en distintas fases de desarrollo, desde el cúmulo hasta la disipación pasando por varias elevaciones (numeradas en orden inverso).

Las tormentas de supercélulas están compuestas únicamente por una gran célula convectiva originada de una multicélula donde uno de sus núcleos se desarrolla extraordinariamente que logra automantenerse. La supercélula se caracteriza por la capacidad que posee de alcanzar un diámetro de 20 a 50 km en la fase de madurez, así como por tener un ciclo de vida mayor 1 hr. Las intensidades de lluvia propias de estas estructuras son mucho mayores que los dos primeros tipos de tormentas convirtiéndolas en tormentas potencialmente más severas. En la Figura 1.4, se muestra la sección vertical de una supercélula de gancho en la vertical obtenida de radar.

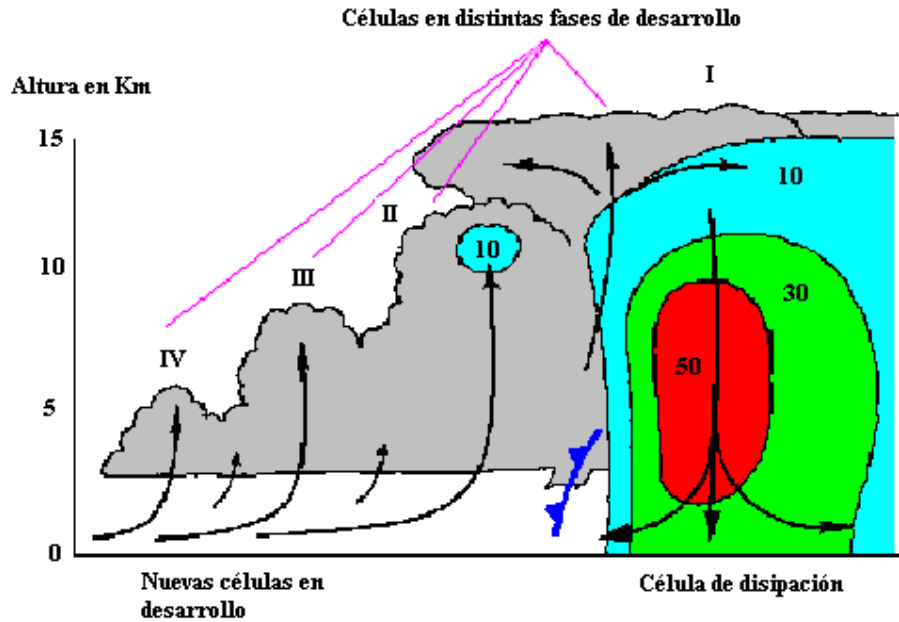


Figura 1.3. Esquema de multicélula convectiva típica, reflectividad del radar en decibeles (figura adaptada de Martín y Riosalido, (1999), anteriormente citada en Doswell, (1982))

Al respecto, esta caracterización básica de las tormentas de tipo convectivo a partir de imágenes de radar ha sido enriquecida por varios autores de acuerdo a diferentes criterios. Austin y Houze (1972) plantearon como la característica de identificación de las tormentas a la escala del fenómeno.

Así dividieron a los fenómenos convectivos en: sistemas convectivos de escala sinóptica, de mesoescala grande, de mesoescala pequeña y células de lluvia o células convectivas. Este ordenamiento corresponde a superficies de precipitación desde los 10 km² hasta 10000 km², donde la intensidad de la lluvia aumenta al disminuir la escala. Tales tormentas pueden ocurrir en forma anidada, es decir, que se contienen en el mismo orden que fueron mencionados. Para una mayor referencia, en la tabla 1.2 se presentan escalas de fenómenos atmosféricos comúnmente aceptadas en la literatura.

Los sistemas convectivos de mesoescala (SCM) representan un caso especial de tormenta ya que son los productores de la mayor cantidad de lluvia (Valdés *et al.*, 2005), de tal manera que su descripción es ampliada. La probabilidad de generación de tormentas ocasionadas por SCM es mayor que la de las células convectivas, pero menor que los sistemas convectivos sinópticos, sin embargo estos son menos frecuentes. Estos SCM en su fase de madurez están formados por dos partes bien reconocidas que son, la zona convectiva de gran desarrollo y la zona de nubes estratiformes generada a partir de la primera, cuyas dimensiones son superiores a las de una tormenta simple.

Tabla 1.2 Escalas vs. Procesos atmosféricos (Thunis y Bornstein, 1996)

Escala	Duración	Stull (1988)	Pielke (1975)	Orlansky (1975)	Thunis y Bornstein (1996)	Fenómeno atmosférico
10,000 km	1 mes	Macro	Regional sinóptico	Macro- α	Macro- α	Circulación general, ondas largas
2,000 km	1 semana			Macro- β	Macro- β	Ciclones sinópticos
200 km	1 día			Meso- α	Macro- γ	Frentes y huracanes
20 km	1 hora	Meso	Meso	Meso- β	Meso- β	Chorros de bajo nivel, complejos convectivos, brisas, vientos y ondas de montaña, isla térmica.
2 km				Meso- γ	Meso- γ	Tormentas, TAC.
200 m				30 min	Micro- α	Meso- δ
20 m	1 min	Micro	Micro	Micro- β	Micro- β	Penachos, estelas, trombas, tolvaneras.
2 m	1 s			Micro- γ	Micro- γ	Ondas sonoras, turbulencia.
				Micro- δ		

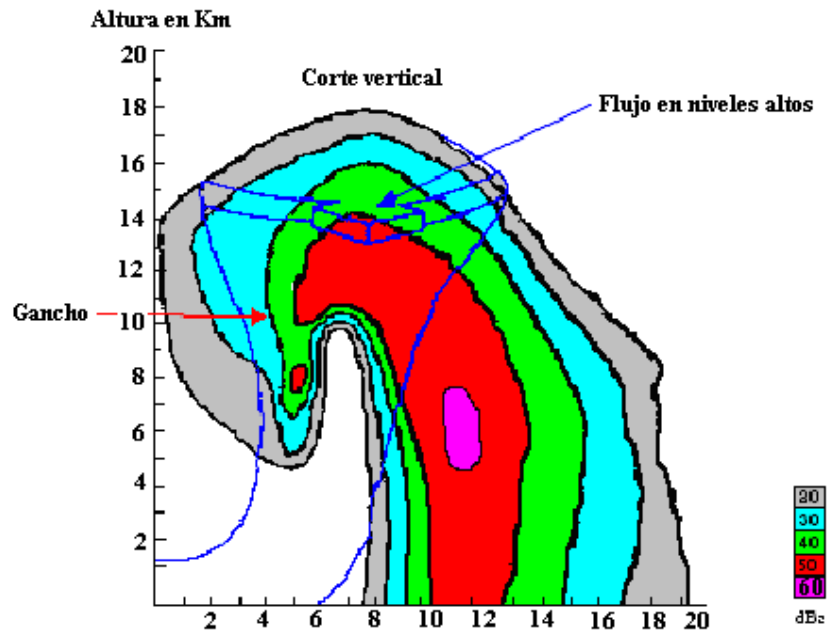


Figura 1.4. Corte vertical de una tormenta de supercélula madura (esquema adaptado de Martín y Riosalido, (1999), anteriormente citada en Lemon, (1980)).

Los SCM son definidos en función de las observaciones de radar de manera similar a la descripción de las tormentas convectivas ya sea por la organización de las células o por la orientación de la zona estratiforme con respecto a las núcleos convectivos. A continuación se describen brevemente los SCM correspondientes a estos criterios.

Los SCM organizados de acuerdo a la disposición de las células convectivas, pueden ser líneas de turbonada (LT) simétricas y asimétricas (Houze *et al.*, 1990), en base al grado de simetría que presenta la estructura completa. Una LT simétrica, es aquella que tiene una distribución simétrica de la zona de precipitación (zona estratiforme) y la zona convectiva con respecto a un eje normal que pasa por el punto medio de la línea convectiva. Por lo tanto, una LT asimétrica no tiene bien definido un eje normal, las células más activas no se encuentran al centro de la línea convectiva, generalmente la actividad convectiva se incrementa del borde más al norte hacia el borde más al sur (SCM, 2007).

Tiempo después fue planteada una nueva agrupación de SCM por Schiesser *et al.*, (1995), en la que existen dos subtipos de SCM, los cuales fueron identificados en función de la posición relativa de la zona estratiforme con respecto a la línea convectiva de la tormenta, y por la forma de agrupación de las células.

En la primera de estas clasificaciones, se tienen SCM de zona trasera estratiforme, zona delantera estratiforme ó sin zona estratiforme. Esta clasificación se puede aplicar a los SCM cuando han desarrollado la región de precipitación estratiforme a partir de la fase de madurez.

La segunda clasificación de SCM propuesta por Schiesser *et al.*, (1995), fue basada en el agrupamiento de las células convectivas, del tal forma que se distinguen ahora las siguientes estructuras: la célula aislada, el racimo o grupo de células, la línea rota y línea continua de turbonada.

Con respecto a la caracterización de las tormentas en base a las imágenes de satélite, instrumento que permite contar con una percepción más amplia de los fenómenos, se tienen las siguientes estructuras convectivas: líneas de turbonada (LT), sistemas convectivos de mesoescala (SCM) y complejos convectivos de mesoescala (CCM).

Maddox (1980) definió los complejos convectivos de mesoescala (CCM), a partir de las imágenes satelitales vistas en banda infrarroja (IR). Estas imágenes IR utilizan el reflejo de diferentes umbrales de temperatura, sin embargo las temperaturas de las nubes altas no están muy bien relacionadas al proceso físico de las tormentas y por lo tanto de la lluvia (Nesbitt *et al.*, 2000). En un principio, los criterios de Maddox (1980) comprendían estructuras nubosas que debían abarcar áreas entre 50 000 km² y 100 000 km², duración de 6 horas y forma elíptica, las cuales corresponden a grandes fenómenos convectivos.

Principalmente por estos motivos, los criterios de Maddox se redefinieron para abarcar en este rango a un mayor número de estructuras convectivas. Posteriormente la imágenes IR fueron empeladas por Houze (1993), quien definió a los SCM como “una estructura nubosa formada por un conjunto de focos convectivos que contribuyen todos a conformar un área de precipitación común del orden de 100 km o más, al menos en una dirección”. En la definición indica la existencia de lluvia, hecho que es complejo de

garantizar a partir sólo de imágenes de satélite, ésta es una limitante de la definición. Sin embargo, la dimensión de 100 km de longitud de un SCM significa una duración del ciclo de vida del sistema convectivo superior al de una tormenta aislada, cuya longitud es muy inferior.

A partir de la definición de SCM de Houze (1993), se han planteado nuevas definiciones más restrictivas, que consideran las imágenes de satélites geoestacionarios para identificar las características de forma y dimensiones de los SCM.

Las líneas de turbonada desde el punto de vista de satélite, son sistemas nubosos de origen convectivo que presentan una estructura lineal.

Debido a la apariencia de los SCM, estos se clasifican en estructuras en “V” o en “U”. Las estructuras en “V” se caracterizan por fuertes vientos de altura, además los estudios realizados en E.U.A y Europa, sobre estos sistemas en cuanto a la ocurrencia de inundaciones repentinas y tormentas severas en superficie muestran una importante relación. Los SCM orientados en forma de “U” presentan vientos de altura más débiles.

1.2.2 Precipitación frontal

La precipitación frontal es directamente uno de los fenómenos resultantes de los dos procesos mecánicos de enfriamiento de una parcela de aire, precisamente del enfriamiento mecánico frontal mencionado anteriormente, aunque específicamente ésta es asociada al encuentro de masas de aire cuyas condiciones térmicas y de humedad difieren entre sí (frentes), de tal manera que la precipitación puede ser consecuencia de un frente frío tanto como de un frente cálido.

La masa de aire caliente es forzada a ascender por encima de la masa de aire frío que es más densa, sin embargo, la inclinación del frente y el contenido de humedad del aire cálido determinarán la velocidad de su ascenso y por lo tanto el tipo de nube a desarrollar.

Si se trata de una pendiente suave, la elevación del aire es lenta y las nubes serán más extendidas y delgadas (estratiformes), esto siempre y cuando el enfriamiento del aire cálido alcance la temperatura del punto de rocío. En este caso, de los frentes cálidos, las lluvias producidas son continuas y de poca intensidad. En el caso del frente frío, presente cuando la inclinación de la superficie de contacto es pronunciada, el desplazamiento vertical de la parcela de aire cálido por el aire frío es muy rápido dando lugar a una gran inestabilidad en la parcela ascendente. Tal turbulencia genera nubes cumuliformes de gran desarrollo vertical productoras de lluvias muy intensas en general y con gran potencial de convertirse en tormentas.

1.2.3 Precipitación orográfica

El segundo tipo de precipitación debida al enfriamiento mecánico de tipo orográfico da origen a la lluvia de esta denominación. La confrontación de las partículas de aire cálido con una barrera montañosa activan el ascenso, enfriamiento y condensación del aire, también consecuentemente de la formación de nubes.

El tipo de nubes depende por completo de la velocidad del aire relacionada al mismo tiempo de manera inversa al descenso de la temperatura, así una velocidad lenta derivará en nubes estratiformes, y se formarán nubes cumuliformes si la velocidad es alta.

1.3 Comentarios relevantes

La distribución temporal y espacial de las precipitaciones, constituyen datos básicos y de gran importancia en problemas de la hidrología, en consecuencia, el conocimiento de la génesis y características de la misma también son determinantes.

Los principales tipos de precipitación debidos a los diferentes mecanismos de enfriamiento de las masas de aire (convectivo, frontal y orográfico) son capaces de originar desde fenómenos ligeros de lluvia (llovizna) hasta fuertes tormentas, de los cuales dependerán las respuestas de las cuencas.

La ubicación muy cercana de México a la zona intertropical de convergencia, así como la presencia de las cadenas montañosas en toda su longitud, favorecen la formación de los distintos tipos de precipitación y su distribución, por ejemplo en verano y principios de otoño las lluvias se deben comúnmente a la convección, fenómenos que dejan a su paso fuertes escurrimientos en ambos litorales del país, mientras que a finales de otoño y en invierno adquieren mayor importancia las lluvias de tipo frontal las cuales afectan en mayor medida la zona norte-centro. Esto refuerza la necesidad de identificar el tipo de precipitación, así como, los mecanismos que la originan en general (también responsables de las características de los eventos), para aumentar la confiabilidad de las aplicaciones hidrológicas.

En este contexto, la investigación se dirige al estudio de los sistemas de tormentas, que como fue mencionado previamente, estos son los fenómenos generadores del mayor volumen de lluvias en el país.

Capitulo 2

Conformación de regiones de precipitación homogéneas con base en el análisis multivariado

2.1 Antecedentes

Se recurre al análisis regional en aquellas ocasiones en que se requiere del estudio de frecuencias en un sitio donde no se tiene suficiente información disponible ó que se carece de ella. Por otro lado, la información hidrológica regional es muy útil en sitios aforados debido a la imprecisión en la estimación de avenidas extremas a través de los datos disponibles (ASCE,1996). Básicamente está técnica correlaciona las variables hidrológicas con las características físicas de las región, así a través de estas relaciones regionales, es posible obtener estimados de gastos en función de características hidrológicas.

El objetivo primordial del análisis regional consiste en la delimitación de las fronteras regionales como parte inicial del estudio; estos límites dependen de los parámetros o variables a estimar (Viessman *et al.*,1989), corroborados posteriormente por medio de las pruebas de homogeneidad. Una vez determinada la región homogénea se procede con los análisis puntuales de frecuencias y finalmente se desarrollan las ecuaciones

regionales entre características fisiográficas, hidrográficas, climatológicas, principalmente.

Para la definición de la zona homogénea existen dos enfoques: el cualitativo, basado en características geográficas (división de cuencas, en fronteras políticas, en regiones de terrenos aprovechables y regiones fisiográficas) y el cuantitativo que utiliza pruebas estadísticas (Campos,1999).El desarrollo de los estudios regionales inició con la aplicación de formulaciones empíricas. En Kite (1988), se encuentra una buena recopilación de estas formulaciones. Paralelamente fueron creados mapas regionales donde se representaron variables hidrológicas tales como la precipitación, el escurrimiento, evapotranspiración, etc. Dentro del crecimiento del análisis regional también se encuentran métodos que no tienen bases estadísticas (Viessman *et al.*, 1989). Con el avance del conocimiento en análisis regional se presentó la necesidad de evaluar los índices de incertidumbre y las características de la aplicabilidad de estos métodos, tal como se muestra en los trabajos de Nouh (1987), Cunane (1988), Lin y Chen (2003), Rosbjerg (1995), GREHYS (1996a), GREHYS (1996b), Varas y Lara (1998)). En St.-Hilaire *et al.* (2003) se presenta una revisión bibliográfica de los desarrollos más recientes de regionalización. También, ha sido bien documentado el hecho de que el análisis regional se benefició de la aplicación de las distribuciones multivariadas (Florentino *et al.*, 1985; Troutman y Karlinger, 2001; Chokmani y Ouarda, 2004; Escalante, 1994; Magaña y Ramírez, 2000; Escalante y Domínguez, 2001). Por otro lado, los procedimientos no paramétricos aplicados al análisis regional presentan la ventaja de no seleccionar alguna distribución de frecuencias y el método de estimación de parámetros (Adamowski ,2000).

Tal como se mencionó, el análisis regional involucra al tema de la delimitación de la región homogénea, proceso calificado como uno de los obstáculos más serios para la obtención de una solución regional satisfactoria (Gingras y Adamowsky, 1993) además constituye el punto inicial dentro del proceso del estudio regional. De acuerdo a la literatura especializada la definición de las regiones homogéneas ha sido determinada, entre otros métodos, por metodologías poderosas como son las técnicas multivariadas capaces de correlacionar un gran número de factores fisiográficos, hidrográficos y climatológicos como se muestra en: Wiltshire (1985), Stedinger (1983) Gingras y Adamowsky (1993), Burn (1988), Robinson (1997), Gutiérrez (1996), Escalante y Reyes (1998), Pandey (1999), Escalante y Reyes (2000), Ouarda (2001), Gómez (2003), Gutiérrez *et al.* (2004), Skaugen y Vaeringstad (2005), Ouarda *et al.* (2008), etc. En este sentido dentro de la modelación regional, los métodos multivariados tienen la ventaja de que no se requiere de la selección de una distribución a priori y de que varios de estos procedimientos se pueden emplear para transferir información entre unidades de medición adyacentes con un gran diferencial de longitud de registros ó para el estudio del efecto de parámetros físicos o para el análisis de eventos extremos. Sin embargo, la mayor ventaja de las técnicas multivariadas regionales es que son relativamente fáciles de emplear, proporcionan un estimador de la precisión del índice de medición e incorporan variables descriptivas que reflejan la única característica física de la cuenca de estudio (ASCE,1996).

En este trabajo se explora también la ventaja de la aplicación del análisis multivariado en la regionalización hidrológica, acoplando las técnicas de los modelos por agrupación con un método correspondiente a la creación de variables, con la finalidad de optimizar exitosamente las variables. Con el proceso se disminuyó satisfactoriamente la

incertidumbre en una extensa región de México, el noroeste, al obtenerse una correspondencia fisiográfica total. Las variables fueron obtenidas sencillamente a partir de los registros de precipitación con el propósito de contemplar los patrones meteorológicos puros además características geográficas.

2.2. Región del Noroeste de México

El criterio principal en que se sustentó la elección de la región es por que estacionalmente en esta zona tiene presencia el monzón mexicano, fenómeno de gran importancia (económica, social y científica) para la climatología del norte de México, así como para el sur de los Estados Unidos de Norte America. El monzón mexicano ó también conocido como sistema de monzón norteamericano (NAMS, por sus siglas en ingles), es un fenómeno de la climatología de México que produce un gran impacto en la región del noroeste debido al fuerte incremento de la precipitación desde mediados del verano hasta finales del otoño regularmente. Este evento se presenta de manera súbita después de la temporada de sequía de primavera y principios de verano. La ocurrencia del monzón está asociada a condiciones de la dinámica atmosférica y las características del relieve (Sierra Madre Occidental) principalmente, las cuales interactúan entre si para originar un ambiente convectivo que favorece la generación de tormentas con gran potencial de peligro para los pobladores de la región.

México y Estados Unidos de Norte América han mantenido un programa de cooperación para el estudio del fenómeno desde hace algunos años nombrado NAME (North American Monsoon Experiment, por las siglas en inglés) disponible en línea en NAME (2004). Para la consulta de la información detallada sobre el monzón referirse también a Higgins et al.,(2003).

El clima en esta región es semiárido, con un relieve muy accidentado de oeste a este ya que la transición de la franja costera a la zona montañosa de la Sierra Madre Occidental se da súbitamente, resultando en escarpadas pendientes montañosas. También la variación longitudinal de la región es muy amplia debido a aproximadamente 1100 km. de extensión de la región. Igualmente ésta zona se caracteriza por una gran variabilidad hidrológica espacial y temporal, razón por la cual es de gran interés por parte de la comunidad científica, lo que conlleva al paulatino incremento de diversos trabajos de investigación, como lo menciona Gochis et al. (2006).

Concretamente la porción noroeste de México en cuestión está formada por las regiones hidrológicas Sonora Norte (R.H. 8), Sonora Sur (R.H. 9) y la región Sinaloa (R.H. 10)., las cuales representan el 19.23%, 46.75% y el 34.02% respectivamente del total de la zona de estudio (316,919.75 km²). De aquí en adelante se denomina como zona_NAME. En relación a la representación de entidades estatales dentro de la zona_NAME, el estado de Sonora constituye el 60.08% de la superficie total, Sinaloa aporta el 15.49%, Durango participa con 7.06% a la zona_NAME y finalmente Chihuahua incorpora 18.74% a la extensión completa del área de estudio. En el mapa de la figura 2.a se muestra la configuración descrita.

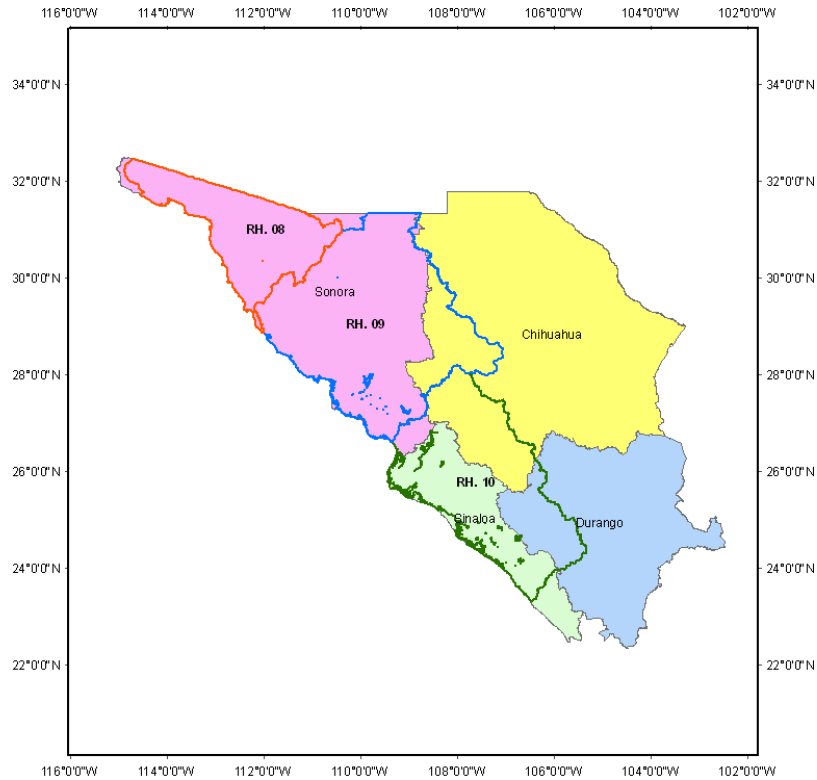


Figura 2.a-. Conformación espacial de la zona_NAME.

2.3 Regionalizaciones antecedentes en el Noroeste de México

El noroeste de México ha sido el interés de estudio de múltiples especialidades (Douglas et al., 1993; Comrie, A.C., y Glen, E.C., 1998; Descroix et al., 2002a; Descroix et al., 2002b; Viramontes and Descroix, 2003, etc.) entre las cuales la regionalización hidrológica no es la excepción. Por lo que resulta importante mencionar las investigaciones antecedentes enfocadas específicamente a la delimitación de regiones homogéneas en la región mencionada. En la investigación de Magaña et al. (1997) a través de modelos estadísticos se determinaron regiones climáticas en el país, donde la mayor similitud entre los resultados se presentó en el noroeste, estos trazos asemejan bandas a lo largo del litoral. Otros análisis han contemplado el empleo de las técnicas multivariadas dirigidas por las variables sobre la región hidrológica No.10 (R.H. No. 10) como en Escalante (1998), donde estas variables se basaron en información de precipitación y se delimitó una región al norte y otra al sur. Posteriormente, en Brito-Castillo et al. (2002; 2003) se empleó la técnica de rotación de componentes principales, perteneciente al grupo de métodos anteriores, aplicada sobre valores de escurrimientos medidos en ríos y superficiales a lo largo de la porción occidental de la Sierra Madre Occidental (aproximadamente coincide con R.H. No 10). Estos estudios arrojaron dos zonas, norte y sur, lo cual es similar a los resultados de Escalante (1998) en número de regiones aunque el trazo no es completamente coincidente, aquí las técnicas utilizadas, variables y unidades de estudio fueron distintas. La combinación de los métodos multivariados dirigidos a los individuos y aquellos orientados a las variables en el estudio realizado por Gutiérrez et al., (2004)

dentro de la R.H. No. 10 permitió el refinamiento de las subregiones homogéneas ya se identificó una subregión al norte de menor extensión que las de los estudios previos y dos subregiones al sur bien asociadas a las condiciones del relieve (costa, montaña). Las variables pertenecientes a este análisis se obtuvieron a partir de condiciones geográficas y datos de lluvia. En 2005, Gochis et al. fueron identificadas regiones homogéneas discontinuas alojadas en la porción adyacente de la Sierra Madre Occidental con Sinaloa y sur de Sonora. Las regiones se obtuvieron a partir del acoplamiento de las técnicas dirigidas a las variables y aquellos métodos dirigidos a los individuos, lo cual significó la obtención de resultados robustos entre las 2 variables del análisis (precipitación y escurrimientos), además estos resultados fueron validados entre sí. Se observaron muy ligeras semejanzas relativas a la delimitación entre las regiones generadas por Gutiérrez et al. (2004) y Gochis et al. (2005), en cuanto a la diferenciación de las zonas de montaña, pero sin llegar a una correspondencia satisfactoria.

Por otro lado, en Gutiérrez-Ruacho et al. (2010) se identificaron microrregiones climáticas asociadas a patrones de precipitación y temperatura en el noroeste de México por medio de una de las técnicas multivariadas aplicadas de las variables (OEF) y variables de tipo sinóptico y local. En el noreste de Sonora y en una pequeña porción al suroeste se preservaron claramente microrregiones homogéneas que además corresponden a zonas geográficas bien definidas (costa y montaña).

Se observa que a medida que fue aumentada la dificultad de los análisis fueron obtenidas regiones homogéneas con mayor definición, pero preservando las localizaciones principales. También se debe remarcar que unidades experimentales empleadas (estaciones de medición), técnicas de análisis y variables fueron diferentes en cada caso, lo cual es indicativo de la bondad de la aplicación de los métodos multivariados en la delimitación de regiones homogéneas.

Sin embargo resulta indispensable identificar el propósito de los análisis, la información disponible del estudio, y las propiedades de esta información, lo cual al ser combinado permita la generación de regiones homogéneas robustas, que además contemplen la asociación de las condiciones fisiográficas con las características climáticas y meteorológicas.

2.4 Metodología del análisis regional multivariado

2.4.1 Datos del estudio

Los registros de precipitación diaria utilizados para el estudio corresponden a un total de 468 pluviómetros localizados dentro de la zona de estudio, estos datos fueron extraídos del sistema ERIC III (Extracción rápida de información climatológica). La preparación de la información se llevó a cabo a partir de la base de datos de lluvia mencionada, denominada Base_CLICOM y consistió primero en filtrar y posteriormente en completar los registros diarios de cada una de las estaciones con datos faltantes tal manera de contar con un periodo de 42 años completos, 1965 a 2006. En la figura 2.1 se muestra el mapa de la región de estudio y la distribución de los pluviómetros empleados. Estas estaciones se presentan en la tabla 1, anexo 1.

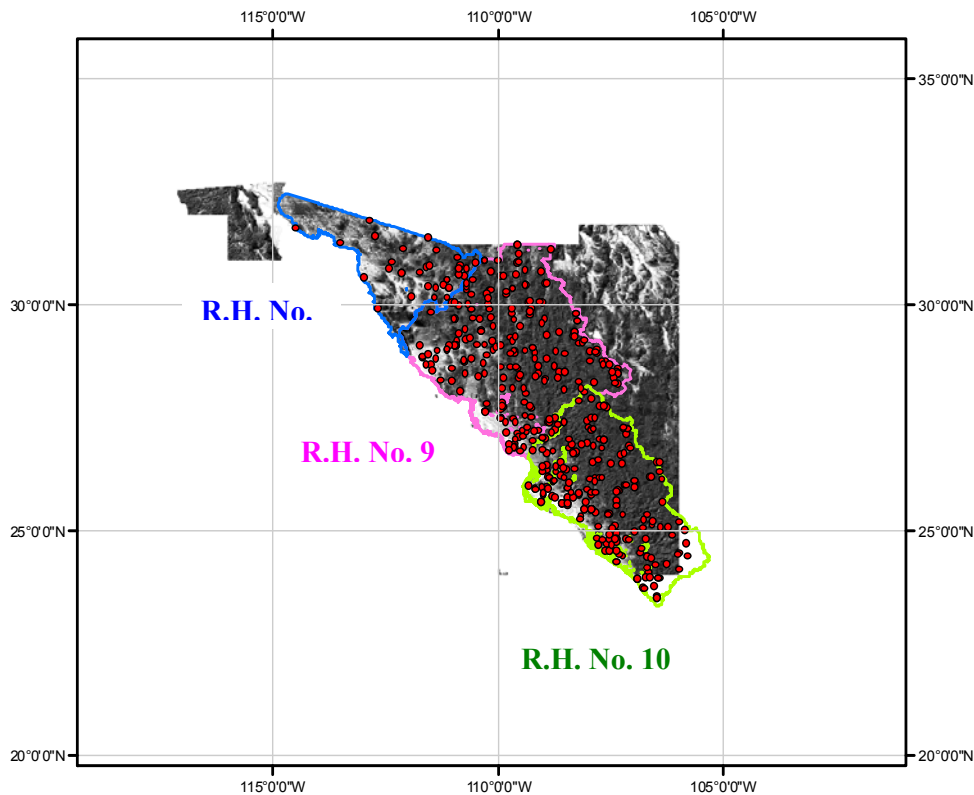


Figura 2.1. Estaciones del ERIC III pertenecientes a las regiones Hidrológicas. No 8, 9 y 10.

El procesamiento del filtrado de las estaciones fue basado en la aplicación de las siguientes condiciones para validar estaciones: 85% de años con datos dentro del periodo y lluvia acumulada mensual en los meses de lluvia mayor que cero, por cada estación. Las estaciones que cumplieron con estos criterios fueron 424. Enseguida, la etapa de completar la información diaria sirvió de base para el estudio definitivo y robusto de este estudio. Se empleó el siguiente criterio para la validación de las mejores estaciones a completar para el estudio: selección de aquellas que tuvieran por lo menos diez años de registros diarios anuales completos continuos. Con esta acción las estaciones validas del estudio disminuyeron de 424 a 308. En el mapa de la figura 2.3 se presentan ambos escenarios.

El método empleado para el llenado de registros fue el de regresión y correlación, el cual fue aplicado de par en par de estaciones cercanas en un radio máximo de 30 km. El coeficiente de regresión R se acepto a partir de 0.70 o mayor en cada caso. El proceso se inicio con aquel par de estaciones donde una de ellas contara con el 100 % de datos completos, y que el par se encontrara en el porción más al norte de la zona de estudio, llenando así de norte a sur. En la figura 2.2 se observan los círculos de proximidad de cada una de las estaciones de la región de estudio, durante varias etapas del procesamiento. Con la finalidad de preservar los patrones de lluvias a lo largo del año de tal manera de obtener mayor certidumbre la complementación de datos se realizó por cada mes. Por lo tanto se requirió extraer de la Base_CLICOM los registros de lluvia diarios mensuales para cada conjunto especial de estaciones (par de estaciones) dentro de la proximidad indicada.

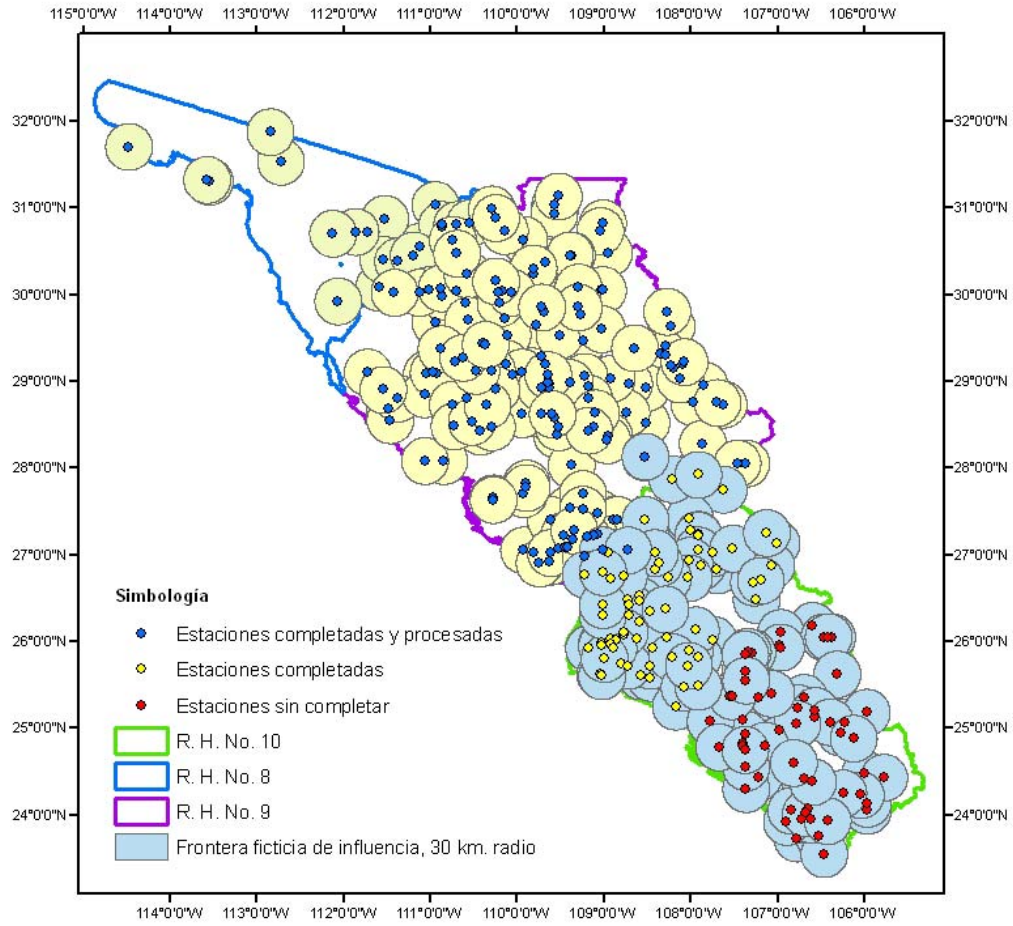


Figura 2.2.- Círculos de proximidad para complementación de registros en las estaciones.

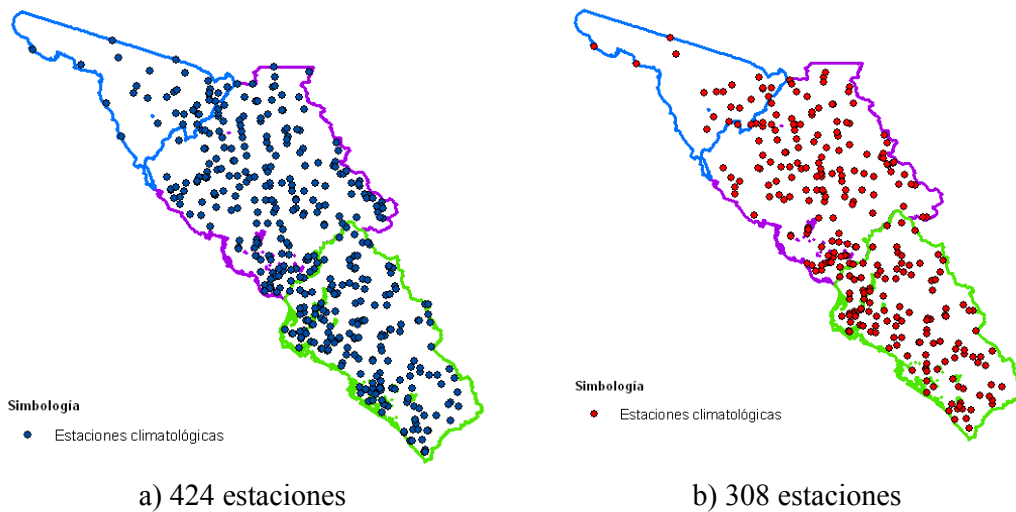


Figura 2.3.- Estaciones validadas del estudio

La metodología de llenado de datos diarios mensuales se resume de la siguiente forma: una vez encontrada la ecuación de mejor ajuste diaria mensual entre dos series de datos para el periodo de estudio, se completaban los datos de la estación con huecos de información, esta información se agregaba y ordenaba en una nueva base de datos a la que se denominó BDllenar. Posteriormente se continuó con la siguiente estación más cercana con huecos empleando el mismo procedimiento, hasta el llenado de todas las estaciones del estudio.

2.4.2 Matrices de variables y metodología

El análisis regional desarrollado en el estudio se basó en los métodos multivariados de ACP (análisis de componentes principales) y CJA (clasificación jerárquica ascendente) requirió de la simplificación del registro de lluvia diaria total de cada una de las estaciones en datos discretizados que representaran las características de la población, denominados variables, así se conformó una matriz de variables-estaciones. Las variables que fueron propuestas se clasifican en dos grandes grupos, uno que agrupa a las variables de tipo mensual y otro a variables anuales, todas generadas a partir de datos de precipitación. También las variables debían contar tanto con un significado físico como numérico.

Con estos criterios se establecieron 23 variables definidas a partir de la base de datos de precipitación (BDllenar), tabla 2.1. Las matrices variables – estaciones necesarias para el estudio fueron generadas a partir del procesamiento de BDllenar mediante el código de programación SQL (del inglés Structured query language), disponible en Access. El conjunto de simulaciones regionales realizadas se agruparon de acuerdo a la etapa del proceso de estudio y así se denominaron Análisis Inicial y Análisis Final.

La primera matriz de este análisis comprendió 308 estaciones por 100 variables. Posteriormente con base en los resultados que comprendieron el Análisis Inicial se desarrolló la simulación denominada Análisis Final, en la cual se utilizaron 15 variables nuevas, mismas que se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.1.- Lista de variables empleadas en el análisis regional del Análisis Inicial

clave	Nombre de variable	Clasificación de la variable	Descripción
1a	D_lluviaMAMES	Variable anual	Número de días promedio de lluvia mensuales por año
2a	D_lluviaMANUAL	""	Número de días lluviosos promedio al año Desviación estandar de días con lluvia anuales
3a	D_lluvStdAn	""	
4a	CvLluvAn	""	Coef. de variación de días anuales de lluvia
5a	HpMANUAL	""	Lluvia acumulada anual promedio (mm)
6a	HpVarAnual	""	Varianza de la lluvia anual
7a	HpDesvAnual	""	Desviación estándar de la lluvia anual (mm)
8a	CvAnual	""	Coeficiente de variación de precipitación promedio anual
9a	CvMmesAnual	""	Coeficiente de variación de precipitación media mensual por año
10a	HpMax24per	""	Lluvia max. de 24 hr. promedio (mm), en el periodo

clave	Nombre de variable	Clasificación de la variable	Descripción
11a	CvMax24	""	Coef. de variación de HpMax24per
12a	HpMax48per	""	Lluvia max. de 48 hr. promedio (mm), en el periodo
13a	CvMax48	""	Coef. de variación de HpMax48per
14a	Hp_Mseason	""	Lluvia acumulada estacional promedio anual (mm)
15a	HpDesvSeason	""	Des. estandar de la lluvia acumulada estacional promedio anual (mm)
16a	CvSeason	""	Coef. de variación de la lluvia acumulada estacional
17a	Hp_acum_M#	Variable mensual	Lluvia acumulada mensual promedio (mm)
18a	Hp_acum_#mes_desv	""	Desviación estándar de la lluvia promedio mensual (mm)
19a	HpMax_#mes	""	Lluvia máxima diaria mensual (mm)
20a	HpMedia_#mes	""	Lluvia media diaria mensual (mm)
21a	CvAcum_#mes	""	Coefficiente de variación de precipitación media mensual
22a	D lluvia_#mes	""	Número de días lluviosos promedio por mes (días)

Nota: #mes, significa que puede tomar cualquier valor entre 1 y 12 correspondientes a los meses del año.

Tabla 2.2.- Concentrado del total de variables creadas para el Análisis Final

clave	Nombre de variable	Clasificación de la variable	Descripción
1b	Lcv_HpAnual	Variable anual	Coef. de variación – L de la lluvia media anual en todo el periodo
2b	Lcv_DAn	""	Coef. de variación – L de días de lluvia promedio anuales
3b	Lvc_HpS	""	Coef. de variación – L de lluvia estacional promedio anual
4b	Lcv#mes	Variable mensual	Coef. de variación – L de lluvia acumulada mensual.

Nota: #mes, significa que puede tomar cualquier valor entre 1 y 12 correspondientes a los meses del año.

A continuación se presentan, primero los resultados obtenidos para las 9 series de simulaciones realizadas dentro del Análisis Inicial, y enseguida los resultados del Análisis Final.

El análisis multivariado aplicado como se mencionó anteriormente fue el método de conjuntos (o *cluster*) de clasificación jerárquica ascendente (CJA). De acuerdo al método, este requiere del establecimiento del índice de aproximación y su algoritmo de agregación, para este estudio se seleccionó la distancia euclidiana y el del método de Ward respectivamente, debido a que estas son las variantes más recurridas en la hidrología según (Smithers and Schulze, 2001; Ouarda et al., 2008). Consultar StatSoft (1995) para mayor referencia acerca de CJA.

La metodología empleada consistió en las siguientes etapas:

0.- Simulación Caos. Escenario de la primera aproximación. Se emplearon todas las variables propuestas, sin ninguna consideración previa, para construir la matriz estaciones-variables y obtener las agrupaciones con base en CJA.

1.- Simulación Representativa: Selección de aquellas variables con alta sensibilidad física del fenómeno en cuestión para la construcción de matriz de datos robusta y la agrupación de las estaciones través de CJA. Posteriormente se realiza la reducción de las variables mediante la aplicación de ACP sobre esta matriz y la identificación de los grupos de variables correspondientes a los 2 primeros componentes principales (grupos de variables asociados a 4 cuadrantes).

2.- Simulaciones por cuadrantes. En esta etapa se lleva a cabo el perfeccionamiento de las agrupaciones de estaciones. Se crean las matrices de variables-estaciones para cada cuadrante y se realizan los análisis de CJA respectivos

3.- Afinación y comprobación de las agrupaciones de las estaciones: Se realiza el ACP a las variables cuyos cuadrantes presenten la mejor significación espacial. Se identifican los grupos de variables de los factores coordinados más altos. Entonces se efectúan nuevamente los análisis de CJA sobre las nuevas matrices variables-estaciones.

4.- Agrupaciones finales. Identificación de la simulación óptima basada en las escenarios obtenidos.

2.5 Resultados del análisis regional multivariado

2.5.1 Resultados de los escenarios del Análisis Inicial

La serie de pruebas de identificación de regiones homogéneas perteneciente al Análisis Inicial inicio con la matriz de 100 variables x 308 estaciones como se mencionó, referirse a la tabla 2.1. En la tabla 2.3 se muestran los conjuntos de variables utilizados en cada escenario de simulación, ordenados por su ejecución de izquierda a derecha. Para sintetizar la información contenida en la tabla 2.3 fueron utilizadas las claves asignadas a las variables dentro de la tabla 2.1, y en los casos de variables mensuales se agregaron los meses entre paréntesis. Los resultados del Análisis Inicial que comprende desde la simulación Caos hasta la simulación 3_CU_70 son presentados en la figura 2.3.

Tabla 2.3. Grupos de variables por cada escenario de simulación en la regionalización.

Escenarios de simulación								
Caos	Representativa	1 CU	2 CU	3 CU	4 CU	1 CU 80	2 CU 80	3 CU 70
1a	2a	2a	5a	4a	21a (10)	2a	5a	8a
2a	3a	3a	7a	8a		17a (1,2,6)	7a	16a
3a	4a	17a (1,2,...,6;12)	14a	16a		18a (3)	14a	21a (6,7)
4a	5a	18a (2,3,4,5,12)	15a	21a (1,2,3,...,9, 11,12)			15a	
5a	7a		17a (7,8,9,10,11)				17a (7,8,9,10)	
6a	8a		18a (1,6,7,8,9,10, 11)					
7a	14a							
8a	15a							
9a	16a							
10a	17a							
11a	18a							
12a	21a							

Caos	Representativa	1_CU	2_CU	3_CU	4_CU	1_CU 80	2_CU 80	3_CU 70
13a								
14a								
15a								
16a								
17a								
18a								
19a								
20a								
21a								
22a								

Simulación Caos

Este es el escenario de agrupaciones de la primera aproximación de resultados con base en CJA, obtenido con la matriz estaciones-variables formada por el total de variables propuestas. Esto se realizó con el propósito de observar el efecto de la carencia de algún criterio en la elección de variables para el método CJA sobre las agrupaciones de estaciones. El comportamiento de la distribución espacial de los 3 grupos superiores de estaciones en la región de estudio (A,B,y C) mostraron una alta intersección entre los grupos, inclusive en el grupo C, el más pequeño; lo cual implica que no se obtuvo alguna definición clara de regiones, como se observa en la figura 2.4a. Las figura 1 del anexo 2 muestra el dendograma correspondiente a este escenario. Tales resultados dieron lugar al siguiente escenario del estudio.

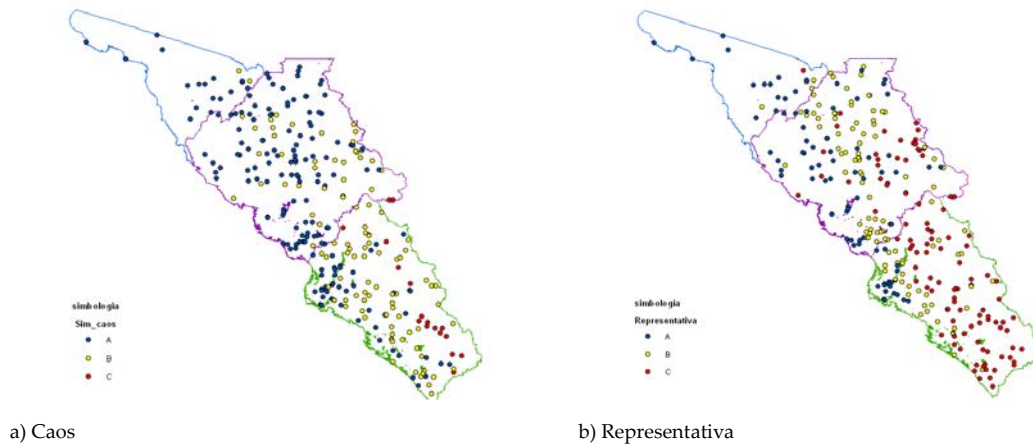
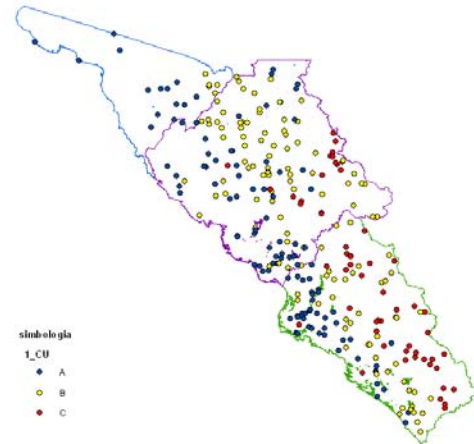
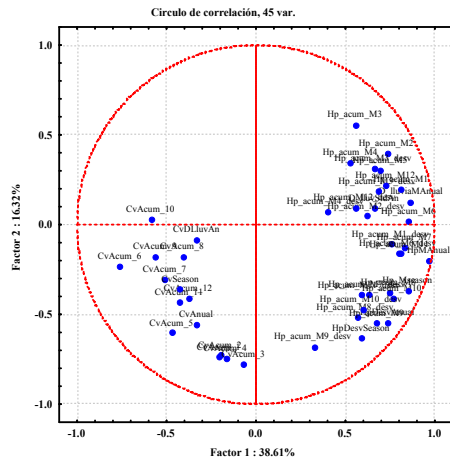
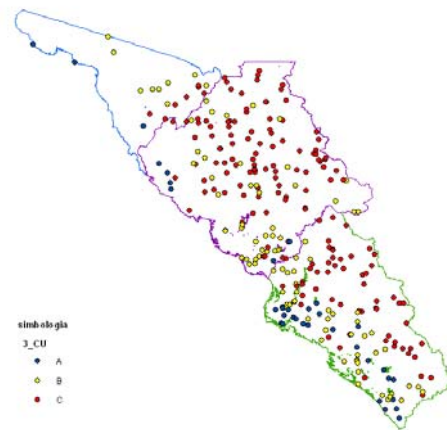
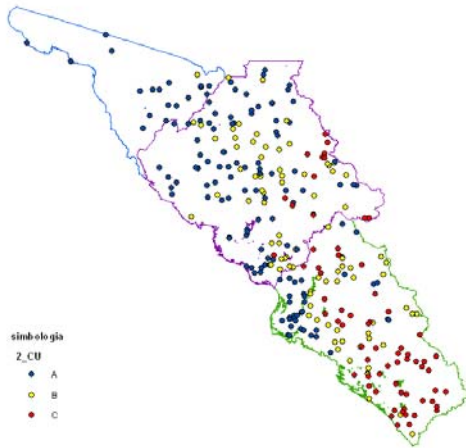


Figura 2.4.- Distribuciones espaciales correspondientes a las simulaciones CJA para los escenarios Caos, Representativa 1_CU, 2_CU,3_CU del Análisis Inicial.



c) Circulo de correlación

d) 1_CU



e) 2_CU

f) 3_CU

Figura 2.4.- Distribuciones espaciales correspondientes a las simulaciones CJA para los escenarios Caos, Representativa 1_CU, 2_CU,3_CU del Análisis Inicial. (Continuación)

Simulación Representativa

Las variables empleadas se encuentran en la tabla 2.3, en la columna identificada como *Representativa*. Estas variables preservan información determinante estadísticamente del patrón de precipitación. Previo al análisis CJA se aplicó un análisis de correlación sobre las variables a la matriz de datos (308 estac. x 45 var.), para identificar aquellas variables con alta interdependencia que debieran ser descartadas. Sin embargo ninguna variable resultó francamente inadecuada por lo que se mantuvo esta matriz propuesta. Nuevamente se seleccionaron los 3 grupos superiores producidos por CJA, A, B, y C, respectivamente. La conformación espacial de estos grupos presentó intersecciones aun mezcladas entre las 3 regiones de acuerdo a la figura 2.4b, pero las definiciones de estas dentro de la región son más claras, y parecen desarrollarse a largo de la misma. La figura 2 del anexo 2 muestra el dendograma correspondientes a este escenario.

Esté análisis aún no mostró independencia entre las 3 regiones, lo cual exhibió la necesidad de seleccionar las mejores variables con mayor significación y limpiar el ruido blanco que pudiera estar dificultando la definición de las regiones (outliers) mediante esta metodología. La selección de las variables fue se basó en el análisis de

componentes principales (ACP), por la valiosa capacidad de este método multivariado de determinar la dimensionalidad espacial de los datos y por lo tanto la posibilidad de reducir el espacio dimensional de la población, entre otras razones. Los escenarios se presentan a continuación.

Simulaciones por cuadrantes: Escenarios 1_CU, 2_CU, 3_CU y 4_CU

De la aplicación del ACP a la matriz 308 estaciones x 45 variables, sobre los individuos (45 var.) resultó que la primera componente explica el 38.61% y la segunda el 16.32%. Las variables fueron seleccionadas a partir de sus posiciones, relacionadas con los valores de correlación normalizados, dentro de los cuadrantes en el círculo de correlaciones del ACP, donde los ejes correspondieron a las dos primeras componentes principales, tal como se observa en la figura 2.4c. Los detalles de los cuadrantes de este círculo se presentan en la figura 3 del anexo 2. En las columnas 1_CU, 2_CU, 3_CU, 4_CU se listan las variables pertenecientes al primero, segundo, tercero y cuarto cuadrante respectivamente. Se construyeron solamente 3 matrices variables-estaciones correspondientes a las variables del 1er al 3er cuadrante, ya que en el 4to cuadrante solo se alojó una variable. Así fueron realizados los procesos de CJA asociados a cada matriz y sus agrupaciones espaciales resultantes se exponen en las figuras 2.4 d,e y f. Por otro lado, la agrupación de las 45 variables mostró las siguientes asociaciones de variables: aquellas variables creadas para los meses de temporada de sequía se reunieron en el 1ro cuadrante (1_CU), las variables del 2do cuadrante (2_CU) en su mayoría corresponden a los meses de temporada de lluvia, en el 3er cuadrante (3_CU) se ubicaron las variables de coeficientes de variación.

En estos ensayos se mantuvo el análisis de los 3 subgrupos mayores facilitando así la identificación de las clasificaciones espacialmente además de la reducción de incertidumbres. Las estaciones pertenecientes a las regiones obtenidas para 1_CU, figura 2.4d, se encontraron todavía interceptadas dentro del sitio de estudio, pero en menor grado con respecto a la simulación Representativa. Además la conformación de las regiones es diferente ya que varias de las estaciones se reubican en otros grupos diferentes, sin embargo se conserva la definición longitudinal. Las regiones derivadas de la matriz del 2º cuadrante, figura 2.4e, mostraron otras agrupaciones diferentes a las anteriores, pero las estaciones continúan cambiando de región aun y presentando intersecciones entre grupos. En la región hidrológica No. 9 se encontró la mayor mezcla entre grupos. En el caso del 3er cuadrante (figura 2.4e), el cambio en la definición de los 3 subgrupos es radical con respecto a los dos escenarios anteriores, aunque se sigue conservando el desarrollo de las regiones en forma longitudinal. En el grupo C, localizado en el extremo oriental de la región se alojaron cerca del 70% de las estaciones quedando inscrita la región de montaña completamente, y las intersecciones de los otros grupos disminuyeron en forma importante, especialmente en la región hidrológica No. 10. Las estaciones del grupo A se ubicaron en la franja sobre la costa, con muy poca penetración tierra adentro y limitadas por una línea imaginaria a 40 km tierra dentro, es decir que se trata de una región franca de costa. Se observó que el grupo B se localizó en la franja central entre el grupo A y C. En general, este escenario presentó las mejores definiciones de zonas. La figura 4 del anexo 2 incluye los dendogramas correspondientes a cada uno de estos escenarios.

Con base en estos bosquejos de posibles regiones, fueron consideradas estas tres matrices anteriores como candidatas para ser afinadas en la siguiente parte del estudio.

Afinación y comprobación de las agrupaciones de las estaciones: Escenarios 1_CU_80, 2_CU_80 y 3_CU_70

El perfeccionamiento a las regiones del 1er, 2do y 3er cuadrantes se fundamentó en filtrar ambas matrices por sus variables, lo cual se realizó a través de efectuar ACP y empleando las cargas más altas de las variables correspondientes al primer componente principal, el cual explica el mayor porcentaje de la variabilidad total de la población. Se extrajeron las variables con representatividad mayor al 80%, excepto para 3_CU donde se empleo el 70% de factor de carga debido a que para el 80% de factor de carga únicamente una variable cumplía con esta condición. Las simulaciones se nombraron 1_CU_80, 2_CU_80 y 3_CU_70. En el tabla 2.4 se presentan las cargas de variables para cada uno de los cuadrantes mencionados, la reducción de variables bajo los criterios mencionados fluctuó del 50 al 30 %. Las variables resaltadas en este cuadro fueron las empleadas en la construcción de las nuevas matrices para cada nueva simulación de CJA y así obtener las clasificaciones correspondientes que se muestran en la figura 2.5 a, b, y c, en la figura 4 del anexo 2 se incluyen los dendogramas correspondientes a cada uno de estos escenarios. La similitud entre el porcentaje de variables retenidas para los cuadrantes es signo de la tendencia hacia la estabilización del proceso. Nuevamente se seleccionaron los subgrupos mayores, sin embargo en cada dendograma obtenido, en el tercer nivel de agregación se presentaron cuatro subgrupos, mismos que fueron graficados en el espacio.

Los resultados para las agrupaciones de 1_CU_80 basadas en el 80% de factor de carga mostraron la estabilización del grupo A, ya que la penetración de estas estaciones hacia dentro disminuyó bastante. Lo mismo ocurrió con las estaciones del grupo C, estas se mantuvieron casi completamente a la misma distancia alejada de costa. Sin embargo, la aparición del grupo D y las intersecciones entre los grupos sobre la R.H. No 9, aún indican inestabilidad importante del proceso, lo cual se presenta en la figura 2.4a. Un comportamiento similar de inestabilidad ocurrió en los subgrupos del escenario 2_CU_80 en mayor grado al anterior escenario, ya que las intersecciones entre grupos se incrementaron y se perdió la definición longitudinal de las zonas (figura 2.5b).

Con respecto a los resultados sobre los grupos del escenario 3: CU_70 se observaron estabilizaciones relativas en los grupos A y C, por que las estaciones de cada grupo se mantienen casi completamente compactados como sigue: el grupo A entre la línea de costa y una línea imaginaria a 40 km tierra dentro, el grupo C entre su frontera oriental y una línea a 100 km tierra dentro. Por otro lado, las estaciones de los grupos B y D presentaron altas intersecciones. El mapa de esta simulación se encuentra en la figura 2.5c. En si, no se obtuvo una mejoría en las agrupaciones.

En esta etapa, en general no se obtuvieron mejoras significativas de las regiones, sin embargo se observó la tendencia del desarrollo de las regiones a lo largo de la región de estudio, aunque con fluctuaciones entre los conjuntos de estaciones.

Tabla 2.4. Cargas de los factores 1 y 2 de correlación derivadas del ACP sobre las variables del primero, segundo y tercer cuadrante.

No.	1 CU		2 CU		3 CU	
	Variable	Factor 1	Variable	Factor 1	Variable	Factor 1
1	D_lluviaMAnnual	-0.829373	HpMAnnual	-0.946664	CvDLluvAn	-0.520791
2	D_lluvStdAn	-0.730705	HpDesvAnnual	-0.896286	CvAnnual	-0.840059
3	Hp_acum_M1	-0.860860	Hp_acum_M1_desv	-0.693409	CvAcum_1	-0.620618

No.	Variable	Factor 1	Variable	Factor 1	Variable	Factor 1
4	Hp_acum_M2	-0.859203	Hp_acum_M6_desv	-0.764282	CvAcum_2	-0.646334
5	Hp_acum_M2_desv	-0.701135	Hp_acum_M7	-0.819120	CvAcum_3	-0.523808
6	Hp_acum_M3	-0.759018	Hp_acum_M7_desv	-0.774779	CvAcum_4	-0.604868
7	Hp_acum_M3_desv	-0.803881	Hp_acum_M8	-0.850446	CvAcum_5	-0.644645
8	Hp_acum_M4	-0.713869	Hp_acum_M8_desv	-0.754803	CvAcum_6	-0.772464
9	Hp_acum_M4_desv	-0.509520	Hp_acum_M9	-0.851925	CvAcum_7	-0.726790
10	Hp_acum_M5	-0.794690	Hp_acum_M9_desv	-0.594976	CvAcum_8	-0.600318
11	Hp_acum_M5_desv	-0.717440	Hp_acum_M10	-0.861701	CvAcum_9	-0.634781
12	Hp_acum_M6	-0.801666	Hp_acum_M10_desv	-0.764752	CvAcum_11	-0.603200
13	Hp_acum_M12	-0.799332	Hp_acum_M11	-0.793503	CvAcum_12	-0.531840
14	Hp_acum_M12_desv	-0.618940	Hp_acum_M11_desv	-0.704929	CvSeason	-0.779690
15			Hp_Mseason	-0.938064		
16			HpDesvSeason	-0.833286		

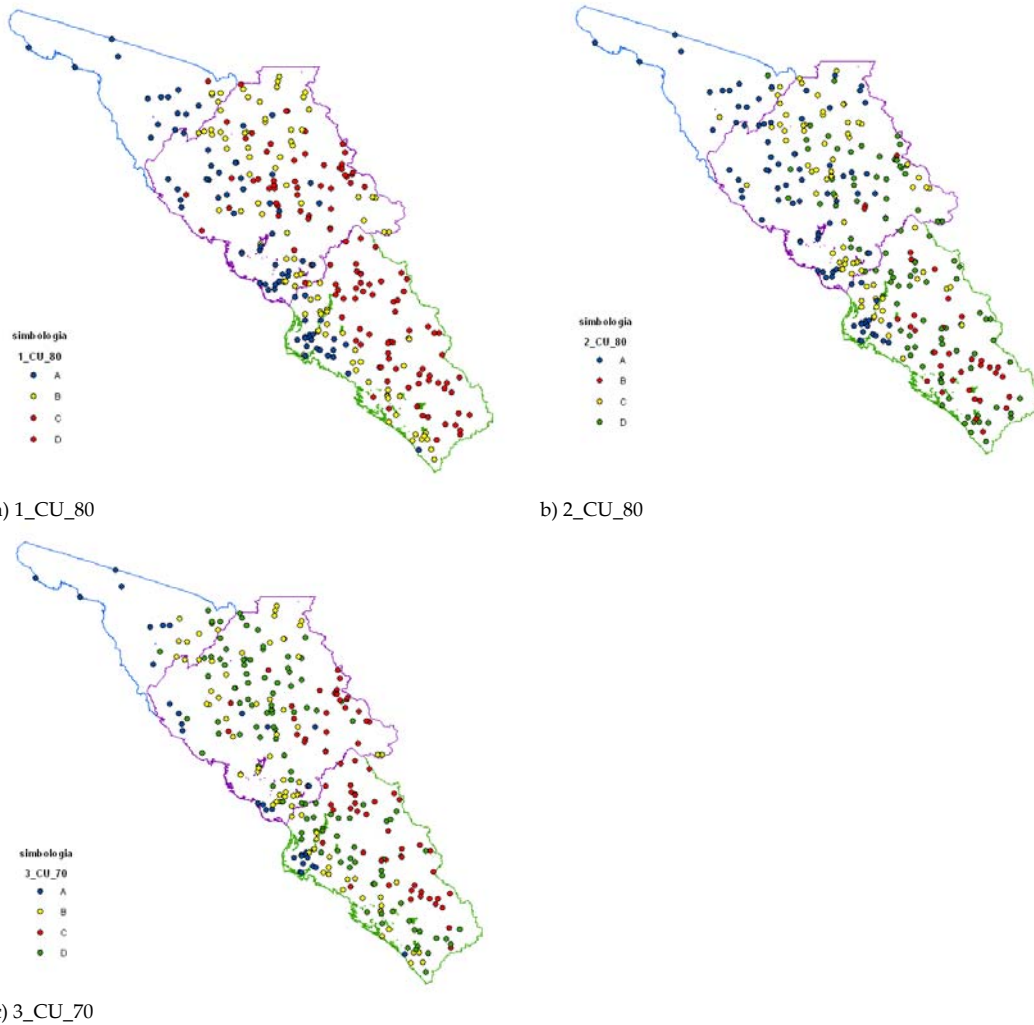


Figura 2.5.- Distribuciones espaciales correspondientes a las simulaciones CJA para los escenarios,1_CU, 2_CU y 3_CU del Análisis Inicial, modificados por selección de variables (80% y 70%).

Agrupaciones finales

Con base en las agrupaciones obtenidas a partir de las seis simulaciones previas, el escenario que presentó una mejor definición de los grupos fue el 3_CU. Este escenario perfeccionó de manera relevante las agrupaciones del escenario Representativo, las cuales posteriormente se desestabilizaron al aplicar CJA a la matriz de variables reducidas. Esto indicó la estabilidad de esta simulación asociada a los coeficientes de variación convencionales, así como la presencia indicativa de una región franca de costa (zona costa), una de montaña (zona montaña) y por ende una región intermedia (zona media). Sin embargo, la persistencia de intersección entre los grupos fundamenta la realización del Análisis Final, que se describe a continuación.

2.5.2 Resultados de los escenarios del Análisis Final

Esta etapa del estudio se llevó a cabo con la finalidad de alcanzar la optimización de las regiones homogéneas meteorológicas y se fundamentó a partir de las variables empleadas en la simulación 3_CU asociadas a los coeficientes convencionales, tal como se mencionó. En este sentido, se propuso un nuevo conjunto de variables de calidad estadísticamente superior al previo. Así este grupo de variables se obtuvo con base en los coeficientes de variación lineales (simulación L-Cv) calculados para las variables completas del escenario mencionado, ya que el Cv de lluvia mensual mes 10 no estaba comprendido. El cálculo de momentos L sobre los Cv optimiza aún en mayor grado a los Cv. La aplicación en la hidrología de estos procedimientos estadísticos ha sido ampliamente recurrida en la literatura (Guttman, N., 1993a,b; Hoskins, J. y Wallis, J., 1997; Salas, L. y Fernandez, Y., 2006; Kysely et al., 2007; Yurakli, K., Modarres, R., 2007; Gaal, L. 2007; Gonzalez, J., y Valdez, J., 2008).

Es importante resaltar que dentro del grupo de simulaciones del Análisis Final también se emplearon variables de tipo geográfico, como son la longitud (Long), latitud (Lat) y la altitud (Alt), debido primero a la latente asociación geográfica de los grupos revelada por el escenario 3_CU, y también a la gran relevancia que aportan estas variables en estudios hidrológicos (Hayward and Clarke, 1996; Govaerts, P., 2000; Smithers and Schultze, 2001, Kysely J., et al., 2007; Carrera-Hernandez y Gaskin , 2007). Esta variable no había sido utilizada en el Análisis Inicial. En la tabla 2.5 se muestran los grupos de variables utilizados en cada escenario de simulación cuyo orden en la tabla corresponde al su realización.

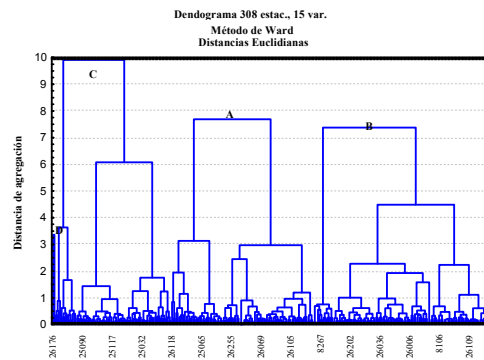
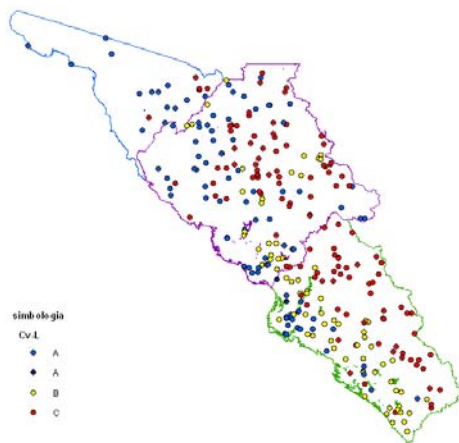
Cada una de estas etapas mejoró los grupos obtenidos con anterioridad en el Análisis Inicial, ya que se optó por utilizar un grupo óptimo de variables como fue mencionado, buscando evitar el aplicar ACP en la selección de mejores variables, permitir el perfeccionamiento de los resultados y agilizar el procedimiento de regionalización propuesto. A continuación se describen rápidamente los resultados de los escenarios listados en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Grupos de variables por cada escenario de simulación en la regionalización.

Escenarios	
L-Cv	geo L-Cv
1b	1b
2b	2b
3b	3b
4b (1,2,..12)	4b (1,2,..12)
	Long
	Lat
	Alt

Simulaciones completas: L-Cv y geo L-Cv

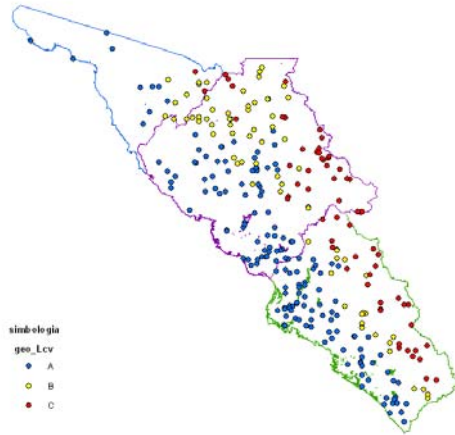
Se llevó a cabo el análisis para la simulación Cv-L, y a partir de los resultados se observó una migración importante de estaciones que formaban parte del grupo zona media al grupo zona costa, también un conjunto de estaciones pertenecientes a zona montaña se acomodaron en la zona costa en especial en la R.H. No.9. Este hecho en particular resulta particular por que la extensión del grupo de estas estaciones (grupo A) coincide con la parte desértica de Sonora además de estar alejado de la costa pero preservando las altitudes costeras. Por otro lado, un grupo estable de estaciones del grupo zona montañosa permanecieron sin cambio, todas estas condiciones constituyeron importantes indicadores de estabilidad de la modelación y de la optimización esperada por la aplicación de momentos L. En la figura 2.6a y b se presenta el mapa de estas agrupaciones y su dendograma.



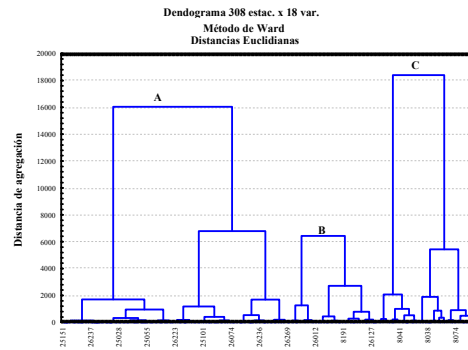
a) L-Cv

b) Dendograma para la simulación L-Cv

Figura 2.6.- Distribución espacial de las estaciones y dendogramas correspondientes a las simulaciones L-Cv y geo L-Cv



c) geo L-Cv



d) Dendrograma para la simulación geo L-Cv

Figura 2.6.- Distribución espacial de las estaciones y dendogramas correspondientes a las simulaciones L-Cv y geo L-Cv (Continuación)

A pesar de estos resultados que muestran grandes coincidencias con el relieve de la región, aun persisten pocas estaciones mezcladas entre los grupos. Por esta razón se procedió con otro análisis CJA para el cual se modificó la matriz estaciones-variables integrando las variables geográficas referidas anteriormente. Las agrupaciones de estaciones obtenidas de esta simulación presentaron migraciones trascendentales con respecto al escenario L-Cv, tal como se muestra en las figuras 2.6c y d, correspondientes al mapa y al dendrograma asociados al escenario. Un número importante de estaciones se ubicaron en la zona costa, esta franja quedó conformada hasta una línea alejada de la costa a 120 km promedio; las estaciones de la zona montaña fueron reducidas notablemente y muy pocas quedaron inmersas en la zona media.

Finalmente, la zona media fue replegada al interior de la región pero se extendió a lo largo de la misma. Sin embargo también se observan pocas estaciones mezcladas con las estaciones de zona costa, precisamente en la región central de la R.H. No 9, en la porción desértica. Las intersecciones entre grupos de estaciones es intrascendente en relación a todas las simulaciones previas, es decir que los grupos obtenidos presentan una gran definición, además la relación con la topografía ha persistido.

Con base en las consideraciones anteriores, en esta etapa se aceptó la regionalización obtenida como la definitiva, tanto por el tipo de variables empleadas y seleccionadas a priori, como por los robustos resultados asociados con el relieve.

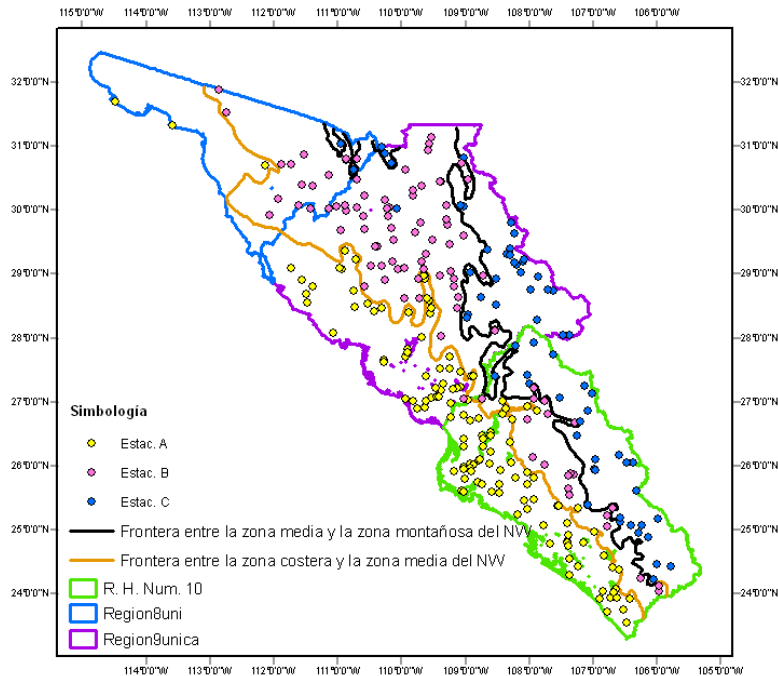


Figura 2.7.- Definición de las fronteras de la regionalización geo L-Cv

Validación de las regiones finales

Fueron contrastadas las delimitaciones de las zonas homogéneas de precipitación, obtenidas del escenario geo L-Cv con el relieve del terreno en la región de estudio total con el objetivo de observar el grado de asociación obtenido de la regionalización, lo cual permitió la validación física de tales regiones. Para alcanzar esta meta se recurrió a las curvas de nivel a cada 500 m en la región y a la definición del relieve a partir del modelo digital de elevación a escala 1:50, 000.

Para obtener una mejor perspectiva espacial fueron realizados los trazos de las fronteras entre regiones, esto antes del acoplamiento de estaciones y curvas de nivel. El mapa de estas delimitaciones se muestra en la figura 2.7. Luego se superpusieron las curvas de nivel y finalmente se visualizaron las regiones sobre el modelo digital, imagen que evidenció que la ubicación de un pequeño conjunto de estaciones pertenecientes al grupo zona_montaña era correcta a pesar de que parecían estar dentro de la zona_media. Se encontró que estas estaciones se localizaban realmente en estrechos cañones montañosos, localizados en la zona de transición entre el desierto y la Sierra Madre Oriental, cuyas elevaciones están en el rango de los 1500 m.s.n.m. En la figura 2.8 se presenta el acoplamiento entre las curvas de nivel y las fronteras de las zonas costa, media y montaña. El mapa de la figura 2.9 muestra estas mismas fronteras sobre el MDE resaltado, perteneciente a la región.

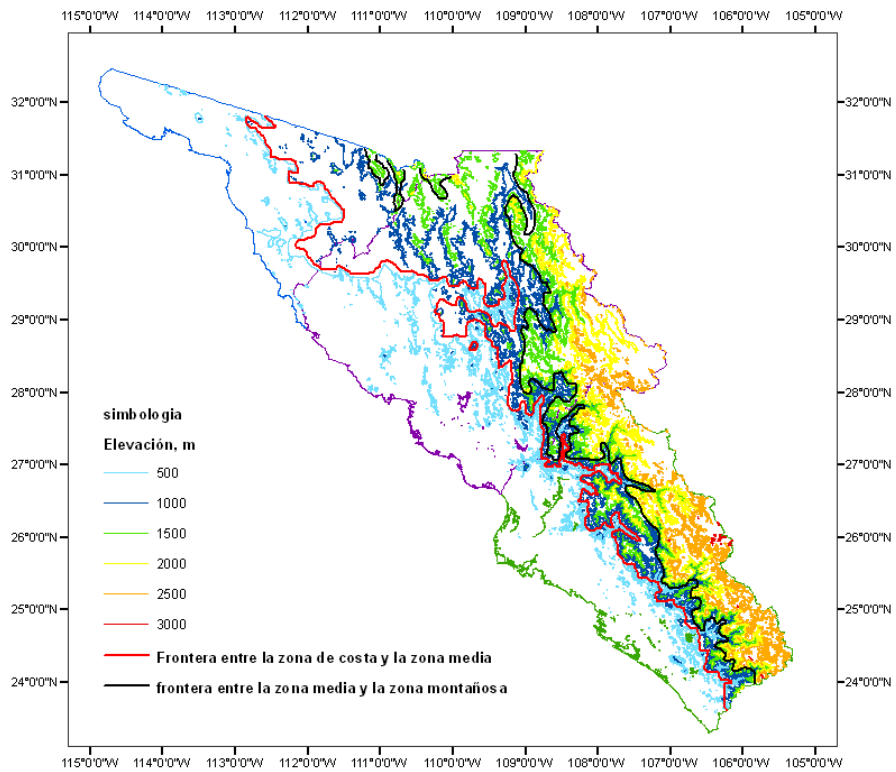


Figura 2.8.- Mapa del acoplamiento de curvas de nivel y las fronteras de regionalización.

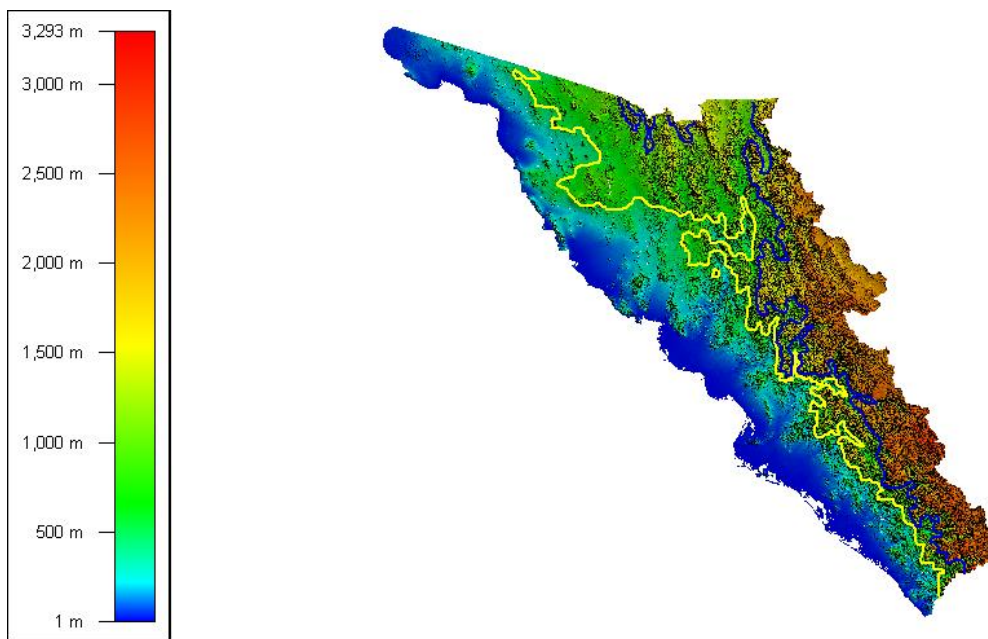


Figura2.9.- Modelo digital de elevación esc. 1:50,000 y las fronteras de regionalización

Capítulo 3

Estudio de sistemas de tormentas con base en imágenes satelitales

3.1 Generalidades sobre el análisis de imágenes de satélite

3.1.1 Tipos de satélites

De acuerdo a la órbita, los satélites pueden ser del tipo geoestacionario o polar. Los satélites geoestacionarios tienen un periodo orbital de un día y es ecuatorial, están a una altitud de 35,910 km, siguen la misma rotación que la Tierra y así permiten obtener imágenes cada media hora o hasta 5 minutos de un sitio. En el caso de los satélites polares estos se colocan a altitudes entre 500 y 2000 km, son puestos normalmente en órbitas polares, su periodo de rotación es de 1 a 2 h (Fattorelli *et al.*, 1996).

El primer satélite meteorológico llamado TIROS-1 corresponde a la órbita polar, y fue lanzado en 1960. Posteriormente a principios de la década de setenta fueron puestos en órbita varios tipos de satélites meteorológicos con diversos rangos de órbita y diversos tipos de sensores, los cuales conforman programas satelitales de monitoreo.

Entre los principales programas satelitales se encuentra la serie NOAA (Nacional oceanic and atmospheric administration) de los E. U. con varias generaciones de satélites de órbitas polares. El sensor de los satélites NOAA es un radiómetro avanzado a muy

alta resolución (AVHRR, por sus siglas en inglés). Tiempo después fueron lanzados los satélites GOES (Geostationary operational environmental satellite) también por parte de USA. Las imágenes que obtienen los GOES son de tipo visible e infrarrojo, generadas dos veces en la hora. Las cuales son descritas más adelante. El último satélite de este tipo puesto en órbita es el GOES 13, lanzado en el 2011.

Los sistemas de satélites utilizados en Europa están formados por satélites METEOSAT, satélites de tipo geoestacionario con una altitud de 36 000 km. El sensor que se utilizan en estos satélites es un radiómetro multispectral que produce imágenes en tres bandas diferentes (VIS, IR térmico, y VA). Otros países como Japón y Rusia operan sus propios programas satelitales. Sin embargo, la información de cualquiera de estos sensores no mide directamente la lluvia.

3.1.2 Interpretación de imágenes

La utilidad de las imágenes de satélite se extiende a una amplia variedad de campos de estudio, entre estos se encuentra la meteorología. La aplicación de las imágenes de satélite a la meteorología revolucionó significativamente a esta ciencia, evolucionando del estudio estadístico de los fenómenos atmosféricos al pronóstico dinámico en tiempo real del comportamiento atmosférico.

En este sentido, el estudio de la meteorología asistido de imágenes de satélite se basa en la interpretación de las imágenes, que consiste en relacionar características específicas de las imágenes con los procesos físicos atmosféricos instantáneos o con un conjunto de eventos históricos. Con la interpretación de las imágenes se persigue la identificación de las nubes u otros elementos radiativos así como la determinación de los mecanismos físicos que los producen.

La interpretación de las imágenes de satélite inició con un proceso de análisis manual de los fenómenos atmosféricos, el cual estaba sujeto a la evaluación subjetiva del analista. Sin embargo, esta interpretación manual ha evolucionado por medio de la aplicación de equipo de cómputo, dando lugar a diversas técnicas de análisis de imágenes digitales de satélite.

Básicamente, las imágenes digitales de satélite contienen valores de radiación medidos por el sensor satelital, almacenados como valores digitales simples en posiciones específicas en la imagen, o píxeles. Así estos valores digitales permiten asignar un color o una escala de gris a los píxeles a la imagen de satélite.

La resolución de las imágenes de satélite depende del canal espectral seleccionado y del tipo de sensor. Tales canales o bandas corresponden a los intervalos o segmentos del espectro electromagnético identificados por valores de longitud de onda (λ : μm) o por sus valores recíprocos conocidos como números de onda (κ : m^{-1}). Los canales frecuentemente utilizados por los satélites meteorológicos son los siguientes:

- **Espectro visible (VIS):** $0 \mu\text{m} < \text{visible} < 7 \mu\text{m}$
Las imágenes VIS muestran una visión muy similar a la percibida por el ojo humano y poseen la más alta resolución espacial. La principal limitación se debe a que estas solo están disponibles durante el periodo de luz solar sobre la Tierra.
- **Espectro infrarrojo (IR):** $1 \mu\text{m} < \text{infrarrojo} < 30 \mu\text{m}$ (comprendido por los subintervalos infrarrojos cercano, medio)

Los satélites meteorológicos emplean comúnmente la banda de 10.5 – 12.5 μm para imágenes IR. Su principal ventaja radica en que se obtienen imágenes IR aun de noche. En las imágenes meteorológicas IR, los elementos con altas radiaciones se identifican con los píxeles más oscuros, por lo tanto los elementos con menor radiación (fríos) corresponden a los píxeles más brillantes (nubes).

- **Vapor de agua (WV):** 6.7 μm
Este tipo de imágenes satelitales permiten interpretar aproximadamente los valores de humedad relativa. Los píxeles más brillantes se asocian a valores de humedad relativa más altos (mayor cantidad de vapor de agua), por lo tanto los píxeles oscuros representan menor cantidad de vapor de agua.
- Otros canales empleados varían del ultravioleta (100 – 400 nm) a las micro ondas (0.15 – 6 cm).

En relación a las características mencionadas, la combinación de más de un tipo de imagen satelital favorece la identificación de los fenómenos atmosféricos, lo cual a su vez implica mayor capacidad de procesamiento digital.

3.1.3 Realce de imágenes

La identificación de fenómenos meteorológicos a partir de imágenes de satélite es posible a través de las técnicas de mejoramiento de imágenes. Estos procedimientos permiten la diferenciación entre el terreno o el agua de las características meteorológicas mediante el realce de las mismas en la imagen.

Estas técnicas se clasifican en tres grupos principales, las cuales se describen brevemente a continuación:

a) Realce por color.

Esta técnica consiste en la asignación de colores o incluso escala de grises a cada píxel con base en el valor del mismo o a un rango de valores. Uno de los métodos de realce por colores más empleado es el basado en *tablas de consulta* (lookup tables, LUT), el cual resulta muy útil en la identificación de grandes células convectivas ya que es posible aplicar a cada valor de píxel de imagen infrarroja un valor de temperatura radiativa y por consiguiente cada color representa un valor o un rango de temperaturas. Además, este realce se implementa sencillamente por software. Las imágenes producidas por este procedimiento son conocidas como imágenes de color falso o pseudo color. Otro método utilizado frecuentemente es el *realce multiespectral* por color el cual involucra imágenes multiespectrales permitiendo la combinación de esta misma clase de datos y dando lugar a imágenes conocidas como imágenes en color verdadero ó imágenes RGB (red-green-blue).

b) Realce físico.

Este tipo de mejoramiento de imágenes requiere equipo con mayor grado de especialización, que el grupo de técnicas anteriores. El método de realce físico de imágenes conocido como bucles o imágenes en secuencia de tiempo es una de las técnicas más comunes. En especial, mediante esta técnica es posible monitorear el movimiento de fenómenos meteorológicos tales como huracanes, sistemas frontales o sistemas complejos de tormentas. La segunda técnica es la visualización de imágenes en tercera dimensión (3D). Las imágenes 3D pueden

proporcionar información altamente especializada, la cual no se distingue en las imágenes en dos dimensiones.

c) Realce estadístico.

A través de este conjunto de técnicas pueden ser identificadas diferentes características en las imágenes, como es la diferenciación píxel a píxel entre terreno/agua y nube/terreno entre otros parámetros. Los parámetros de realce estadístico más sencillos son la comparación entre píxeles de vecinos cercanos, el gradiente, o el valor Laplaciano. Las técnicas mencionadas son fácilmente sistematizables.

4.1.4 Fenómenos atmosféricos observables por medio de imágenes satelitales

Los fenómenos atmosféricos comúnmente monitoreados y analizados por medio de imágenes de satélite pueden ser asociados a tres procesos característicos: nubes, tormentas y vientos. En la literatura han sido desarrolladas diversas técnicas para la identificación de estos fenómenos basadas en imágenes de satélite, las cuales son detalladas en varias referencias como en Badder et al. (1995). A continuación se mencionan brevemente aspectos relacionados a estos diferentes fenómenos.

a) Nubes.

Las nubes son los elementos básicos e indicativos de la presencia de humedad y de la ocurrencia de algún proceso de enfriamiento. Estas razones las colocan como los elementos que poseen la mayor información en las imágenes de satélite. Las propiedades representativas de las nubes vistas por medio de satélites son el tipo y la extensión de la nube, así como la ubicación de la masa nubosa. Por ejemplo, con base en imágenes IR es posible identificar nubes en los tres diferentes niveles aceptados en meteorología bajo, medio y alto. Las subclasificaciones de estas nubes requieren imágenes VIS y en algunos casos imágenes de WV.

b) Tormentas

Diversas técnicas basadas en la aplicación de imágenes de satélite (IR, VIS y WV) han sido desarrolladas con el objetivo de detectar, monitorear, estudiar, y estimar fenómenos atmosféricos tan relevantes como son los diferentes tipos de tormentas, ciclones tropicales y extratropicales, conglomerados de tormentas, etc.

c) Vientos

La orientación de las nubes o los tipos de estas permiten identificar indirectamente las variedades de vientos, como son los vientos a niveles bajo y medio, corrientes y líneas de chorro, patrones de circulación ciclónica y anticiclónica, turbulencia, brisa marina, etc.

3.2 Estimación de precipitación en base a imágenes satelitales

Las imágenes de satélite han permitido la creación de diversas técnicas de estimación de lluvia, en las cuales se aprovecha la estrecha relación entre nubes y precipitación. Otra de las consideraciones importantes, es el hecho de la separación entre nubes de lluvia y nubes sin lluvia, ya que solo una pequeña fracción de la nube produce lluvia en un determinado instante, de acuerdo a Nagle y Serebreny (1962).

De acuerdo a Barret y D. W. Martin (1981), las técnicas de estimación de lluvia basadas en datos infrarrojos y visibles se dividen en: índice de nube, ciclo de vida, métodos biespectrales, y en técnicas de modelos de nubes. Los métodos agrupados en la categoría del índice de nube están fundamentados en la identificación del tipo de nube, entre los más conocidos están los procedimientos propuestos por Barret (1970), Follansbee (1973), Kilonsky y Ramage (1976), y Arkin (1979). Los métodos biespectrales combinan las características de imágenes IR y VIS respectivas a las nubes con altas probabilidades de lluvia. Algunas de estas técnicas son las desarrolladas por Dittberner y Vonder Haar (1973), Lovejoy y Austin (1979a), y Tsonis y Isaac (1985). En cuanto a las técnicas de ciclo de vida, estas se desarrollaron bajo la relación entre cada etapa del ciclo de vida de la nube (convectiva) y la cantidad de lluvia asociada. Entre estas técnicas se encuentran la de Stout, Martin y Sikdar (1979), y la de Griffith-Woodley technique (Griffith et al. 1976). La última de estas categorías mencionadas, modelos de nube, toma en cuenta el proceso físico de la nube. Dentro de esta clase de técnicas se conocen las propuestas por Gruber (1973a), Wylie (1979), técnica Convectiva-Estratiforme de Adler y Negri (1988), y el esquema de Scofield y Oliver (1977).

Así mismo existen procedimientos que combinan información de satélite y superficie. Uno de estos modelos es el que relaciona imágenes IR y mediciones instantáneas de lluvia registradas por radar es la técnica llamada auto-estimador de Vicente et al. (1998). En la actualidad la versión mejorada se conoce como hydro-estimador, la cual es utilizada por NOAA-NESDIS (Nacional environmental satellite, data and information service) en los Estados Unidos de América, entre otras instituciones internacionales. El SMN (Servicio Meteorológico Nacional) de México emplea el sistema EPPrePMex.

Técnicas de estimación de lluvia con base en datos de satélite más recientes han sido desarrolladas a partir de micro ondas pasivas. Las mediciones de la precipitación con microondas pasivas obtenida de satélites pueden ser de absorción-emisión (por gotas de lluvia) aplicable sobre el mar o por métodos de dispersión (por partículas de hielo) los cuales son aplicables sobre terrenos o las superficies oceánicas. Entre los sensores utilizados para estas mediciones se tienen el ESMR-5 (Electrically scanning microwave radiometer) lanzado en 1972, SMNR (Scanning multichannel microwave radiometer) y el SSM/I (Special sensor microwave imagery).

Otro grupo de estos métodos se originó a partir de la adquisición de datos de radares de precipitación colocados en satélites (satélite-radar). Uno de estos satélites-radar es el denominado como Misión de Medición de Lluvia Tropical (TRMM por sus siglas en inglés).

Cada grupo de técnicas anteriores presenta sus propias limitantes, sin embargo el uso de las técnicas combinadas tiende a mejorar las estimaciones de la precipitación. Se hace mención de varias aplicaciones de imágenes de satélite para la estimación de lluvia. Nesbitt *et al.* (2000) desarrollaron un algoritmo para la identificación de características de precipitación en la zona de los Trópicos, el cual se basó en datos de satélite; Chen y Li (2002) emplearon los datos satelitales del TRMM PR (Tropical rainfall measuring mision precipitation radar) y del GOES 5 para la recuperación de lluvia durante el experimento del monzón del mar del Sur de China (SCSMEX, por sus siglas en inglés), la técnica desarrollada combina datos de microondas y de lluvia IR; Schumacher y Houze (2003) identificaron los patrones de lluvia estratiforme a través de los datos del

satélite TRMM PR en las zonas de los trópicos; Klepp *et al.* (2003) desarrollaron una técnica nueva que mejoró las estimaciones de lluvia ciclónica obtenida de datos de satélite sobre la zona norte del océano Atlántico, por medio de la transformación de códigos espaciales en lluvia acumulada; Hirose y Nakamura (2003) caracterizaron la variación espacio temporal del gradiente de lluvia acumulada individual y de los sistemas de precipitación, con base en los datos del TRMM PR; Zhang *et al.* (2005) realizaron la comparación de 10 modelos de circulación atmosférica general, con las mediciones del satélite ISCCP (International satellite cloud climatology), y así evaluaron los modelos climáticos de simulación de nubes; Wilcox y Donner (2007) evaluaron las distribuciones de frecuencia de la lluvia de cada media hora simulada por el modelo atmosférico de circulación general GFDL AM2, con base en la lluvia acumulada estimada por mediciones de satélite (microondas) en la zona de los Trópicos y en la latitudes medias del Hemisferio Norte.

3.3 Caso de estudio

3.3.1 Caracterización morfológica de tormentas

Continuando con este estudio, la caracterización de tormentas se llevó a cabo para aquellas ocurridas en zona_NAME. Es importante mencionar que el propósito de este apartado es el de mostrar una metodología sencilla para la caracterización de tormentas a partir de imágenes de satélite. Esta metodología resultó de la conjunción de ciertos procedimientos desarrollados y probados en la literatura, los cuales serán referidos en su momento.

El trabajo se basó en la información de estaciones meteorológicas automáticas (EMA) disponible de 1999-2006 así como en imágenes IR de satélite del periodo 2004-2006 en intervalos de 15 min, el cual fue el periodo con imágenes satelitales disponibles. Las imágenes de satélite fueron proporcionadas por el Servicio Meteorológico Nacional de México (SMN). Específicamente se utilizaron las imágenes correspondientes al espectro infrarrojo (IR) en la banda 10.7 μm (canal 4), provenientes de los satélites GOES-11 y GOES-12, los cuales observan al territorio mexicano. El procedimiento consistió en las siguientes etapas:

- a. Identificación de la tormenta a partir de información de la EMA
- b. Procesamiento primario de imágenes IR para la caracterización de tormentas
- c. Caracterización de tormentas

A continuación se describirán las etapas mencionadas para una tormenta como ejemplo.

a. Identificación de la tormenta a partir de información de la EMA

Dentro de zona_NAME se localizan las EMA's de la tabla 3.3, las cuales fueron empleadas en esta fase del estudio. La información fue proporcionada por el SMN. Se procesaron los datos de las EMA's para la obtención de bases de datos de lluvia en cada estación. En el mapa de la figura 3.1 se muestra la distribución de las EMAS.

Tabla 3.1.- EMA's localizadas dentro de la zona de estudio.

ESTADO	NOMBRE	Fecha-Inicio	Latitud	Longitud	Altitud
Chihuahua	BASASEACHI	07-May-99	28°11'57"	108°12'32"	1973
	CHINATÚ	04-Jun-99	26°13'46"	106°46'14"	1982
	CHINIPAS	24-May-99	27°23'34"	108°32'11"	431
	GUACHOCHI	31-May-99	26°48'49"	107°04'23"	2390
	MAGUARICHI	10-Jun-99	27°51'30"	107°59'40"	1663
	URIQUE	15-Abr-99	27°12'56"	107°55'11"	577
Sinaloa	OBISPO	16-Nov-04	24°15'04"	117°11'17"	4
	ALAMOS	31-May-99	27°01'18"	108°56'16"	409
Sonora	HERMOSILLO – B. DE KINO	29-Dic-03	29° 00' 48"	111° 08' 13"	160
	YECORA	10-Dic-02	28° 22'	108° 55'	1531

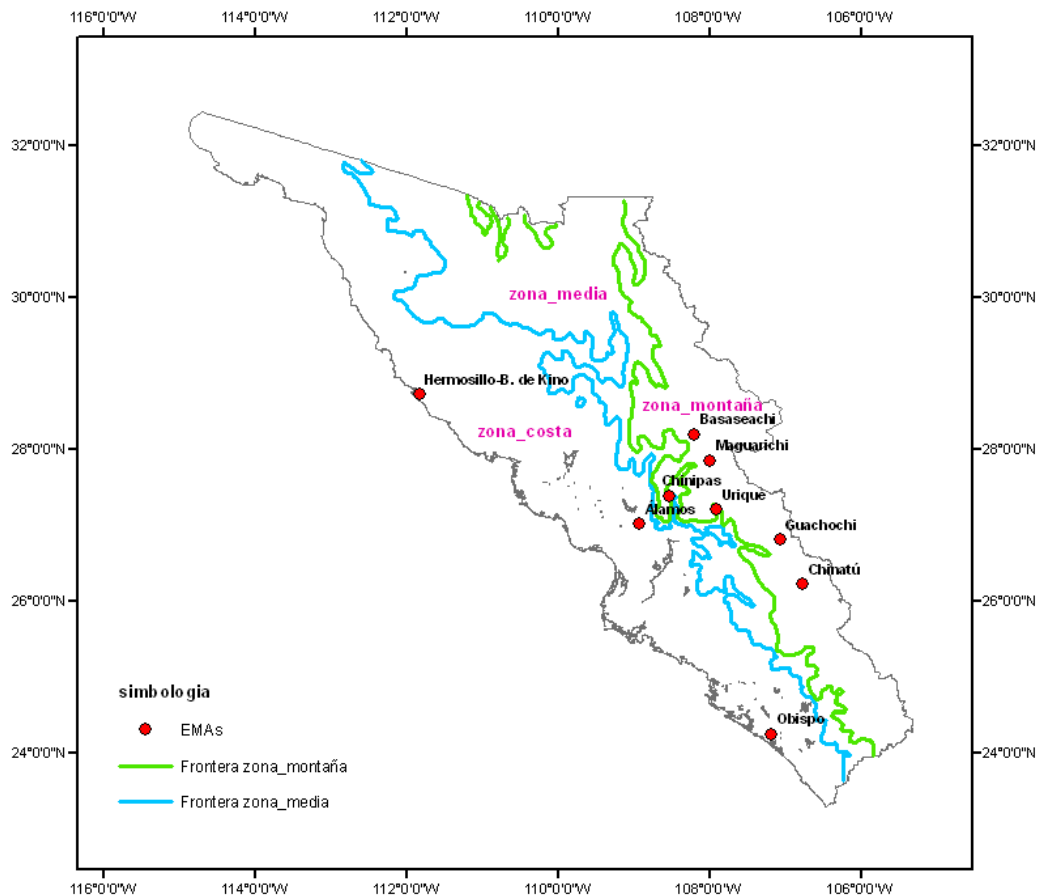


Figura 3.1.- EMA's localizadas dentro de la zona de estudio.

Se realizó la identificación de todas las tormentas registradas por cada una de las EMA's, durante los meses del periodo de lluvias (junio, julio, y agosto, septiembre) a partir de la muestra de información disponible. Las tormentas fueron agrupadas mensualmente de acuerdo a duraciones de lluvia en minutos, iniciando de 20 min, con incrementos de 10 minutos hasta los 60 min de duración. Después se clasificaron las tormentas con duraciones mayores a 60 min, en grupos de duraciones con intervalos a cada 30 min, comenzando en los 90 min de duración. Esta última consideración fue llevada a cabo únicamente para simplificar la información de tormentas por duraciones.

Cada uno de estos grupos contiene las tormentas cuyas duraciones estén comprendidas entre la duración antecedente y la duración del grupo en cuestión existente. Paralelamente fueron obtenidas las láminas de lluvia de cada una de las tormentas, también las tormentas se clasificaron de acuerdo a los rangos de lámina de lluvia que emplea el SMN, tal como se presentan en la tabla 3.2.

Tabla 3.2.- Rangos de lluvia utilizados por SMN

Rango de lamina de lluvia (mm)	Denominación del rango de lluvia
0 < Lamina < 5	Lluvia escasa
5 < Lamina < 10	Lluvia ligera
10 < Lamina < 20	Lluvia moderada
20 < Lamina < 50	Lluvia fuerte
50 < Lamina < 70	Lluvia muy fuerte
> 70	Lluvia intensa

Se muestran las listas del total de tormentas moderadas y fuertes identificadas para el mes de julio de la estación Alamos en las tablas 3.3 a 3.4. En el anexo 4, tabla 1 se encuentran las tormentas escasas y ligeras. El resumen de clases de tormentas para los meses de junio, agosto, y septiembre corresponden a las tablas 3.5 a 3.7 Adicionalmente fueron obtenidos parámetros estadísticos básicos que complementaron el análisis igualmente de manera mensual. Como un ejemplo de los resultados de este proceso se presenta en la tabla 3.8 esta información estadística para las tormentas registradas por la EMA Álamos, de acuerdo a las duraciones de tormentas. Las tablas para los meses de junio, agosto, y septiembre se encuentran en el anexo 3, tablas 2 a 4. Se incluyen también estos datos estadísticos para la EMA Basesachi en las tablas 5 a 8 del anexo 3. Con estos mismos criterios fueron identificadas las tormentas para las EMA's comprendidas en zona_NAME.

Tabla 3.3.- Tormentas moderadas, EMAs Alamos, mes de julio

No.	Nom tormenta	Lamina
1	23/07/2002 01:50 - 02:20	13.72
2	10/07/2002 21:20 - 21:50	15.75
3	18/07/2003 23:10 - 23:40	18.54
4	15/07/2003 22:00 - 22:40	16.76
5	27/07/2003 00:30 - 01:10	17.53
6	22/07/2005 01:50 - 02:30	15.48
7	09/07/2001 07:00 - 07:50	15.76
8	25/07/2001 06:40 - 07:30	13.46
9	18/07/2002 02:10 - 03:00	14.73
10	24/07/2003 02:10 - 03:00	18.53
11	27/07/2003 23:30 - 00:20	19.56
12	23/07/2004 01:40 - 02:30	10.15
13	15/07/2006 23:50 - 00:40	12.18
14	31/07/2006 01:00 - 01:50	16.25
15	19/07/2000 23:50 - 00:50	17.54
16	01/07/2006 19:30 - 20:30	19.05
17	27/07/2000 07:30 - 08:40	18.28
18	19/07/2002 06:00 - 07:10	16.25
19	18/07/2005 09:40 - 10:50	14.73
20	12/07/2005 22:10 - 23:40	17.02
21	16/07/2001 23:20 - 01:10	13.21
22	31/07/2001 12:00 - 14:00	13.96

Tabla 3.4.- Tormentas fuertes, EMAs Alamos, mes de julio

No.	Nom_tormenta	Lamina
1	14/07/1999 03:40 - 04:20	28.19
2	20/07/2003 03:40 - 04:20	23.36
3	02/07/1999 00:20 - 01:10	40.38
4	27/07/2000 03:20 - 04:10	28.96
5	31/07/2000 00:00 - 00:50	43.94
6	19/07/2002 04:40 - 05:30	22.61
7	24/07/2002 21:40 - 22:40	28.96
8	31/07/2001 10:30 - 11:40	20.08
9	14/07/2002 22:30 - 23:40	27.68
10	20/07/2001 06:00 - 07:10	47.99
11	21/07/2004 00:30 - 01:40	21.08
12	23/07/2004 05:50 - 07:10	24.89
13	27/07/1999 02:00 - 03:40	41.65
14	12/07/1999 01:30 - 03:10	29.47
15	20/07/2002 16:10 - 18:10	30.47
16	28/07/2001 02:30 - 04:50	26.92
17	24/07/2003 03:30 - 06:20	31.75

Tabla 3.5.- Clasificación de tormentas, mes de junio, EMA Alamos

Lámina de lluvia	No. tormentas
Escasa -Ligera	3
Moderada	5
Fuerte	33

Tabla 3.6. Clasificación de tormentas, mes de agosto, EMA Alamos

Lámina de lluvia	No. tormentas
Escasa -Ligera	98
Moderada	16
Fuerte	18
Muy fuerte	2

Tabla 3.7. Clasificación de tormentas, mes de sep., EMA Alamos

Lámina de lluvia	No. tormentas
Escasa -Ligera	72
Moderadas	5
Fuertes	7

Tabla 3.8. - Datos estadísticos sobre la identificación de tormentas registradas por la EMA Alamos., mes Julio

Fecha	20	30	40	50	60	90	120	150	180
Jul-99	4	2	5	2	6	5	2		
Jul-00	3	2	2	1	5				
Jul-01	7	5	3	3	5	2	2	1	
Jul-02	5	5	4		7	3	2	1	
Jul-03	10	3	3	4	4				1
Jul-04	10	4	1	2	4	2			
Jul-05	9	3	2	3		2			
Jul-06	4	7	1	2	6	1	1		
# Tormentas	52.00	31.00	21.00	17.00	37.00	15.00	7.00	2.00	1.00
# Promedio	6.63	3.88	2.63	2.43	5.29	2.50	1.75	1.00	1.00
Lamina_acum Max, mm	9.14	15.74	18.54	28.19	43.94	47.99	41.65	26.92	31.75
Lamina_acum Prom, mm	1.43	3.00	5.24	8.82	11.94	15.30	19.33	16.81	31.75
Desv.Est. Lamina	1.69	3.24	5.32	8.45	10.67	12.60	14.52	10.15	0.00
Probabilidad I mm/hr	0.28	0.17	0.11	0.09	0.20	0.08	0.04	0.01	0.01
	4.29	6.00	7.86	10.59	11.94	10.20	9.67	6.72	10.58

b. Procesamiento primario de imágenes IR para la caracterización de tormentas

La identificación de nubes de tormentas a partir de imágenes IR es posible a través de los escenarios de temperaturas de nubes frías, los cuales se interpretan con base en estas mismas.

Para este caso de estudio se emplearon las imágenes IR proporcionadas en formato de imagen comprimida .PCX de 8 bits, en proyección nativa del software satelital MARTA, con datum WGS84 y a una resolución de 4 km x 4km. La cobertura de las imágenes comprende la zona inscrita entre los 80° a los 123° de longitud oeste y de los 14° a los 36° de latitud. Esta región es vista por los satélites GOES que observan América del Norte. Una breve secuencia de estas imágenes se muestra en la figura 3.2.

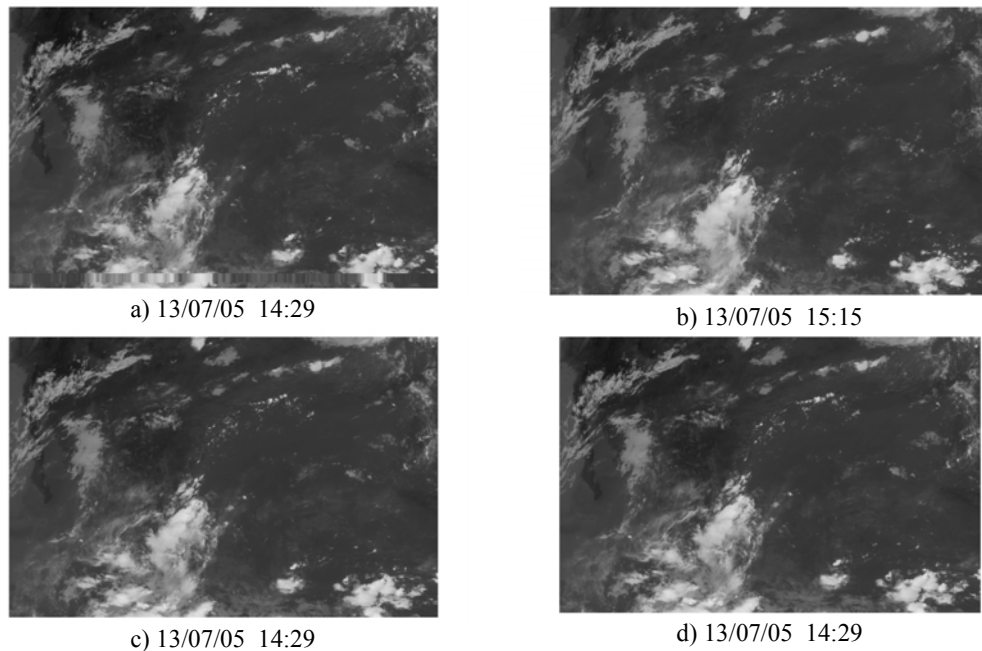


Figura 3.2.- Extracto de imágenes de satélite IR canal 4 del día 13 de julio del 2005

El formato de imagen de 8 bits almacena valores de pixeles en el rango de 0 a 254 que se denominan valores Modo-A, los cuales a su vez están asociados a temperaturas de brillo. De tal forma que la primera etapa del procesamiento consistió en realizar el mejoramiento de las imágenes aplicando la técnica de realce por color desarrollada por Weinreb et al. (1997) para NOAA-NESDIS (National Environmental Satellite, Data, and Information Service) específicamente para las imágenes IR de 8 bits obtenidas de satélites GOES. Esta técnica conocida como “*Curva Estándar de la NOAA*” permite la transformación de los valores de pixeles de las imágenes a valores de temperaturas. Esta curva muestra a las nubes y otros cuerpos fríos en tonos blancos en la imagen, por el contrario de los cuerpos calidos como el terreno que aparecen en tonos oscuros, logrando así que las imágenes IR se aprecien como imágenes en espectro visible.

Las ecuaciones de conversión de temperaturas de brillo en °K (tomadas por el satélite) a valores Modo-A, de la Curva Estándar de la NOAA, se presentan a continuación:

- Para $163 \text{ }^\circ\text{K} \leq T \leq 242 \text{ }^\circ\text{K}$, $X_a = 418 - T$ (nubes frías)
- Para $242 \text{ }^\circ\text{K} \leq T \leq 330 \text{ }^\circ\text{K}$, $X_a = 660 - 2T$ (nubes cálidas)

Donde T representa las temperaturas de brillo de $^\circ\text{K}$ y X_a corresponde a los valores Modo-A o valores de pixeles.

La recuperación de los valores de temperaturas de brillo se obtiene entonces mediante la inversión de las ecuaciones anteriores, resultando las expresiones siguientes:

- Para $255 \geq X_a \geq 176$, $T = 418 - X_a$; $T (^\circ\text{C}) = 144.85 - X_a$ (A)
- Para $176 \geq X_a \geq 0$, $T = 330 - X_a/2$; $T (^\circ\text{C}) = 56.85 - X_a/2$ (B)

Adicionalmente, tales condiciones están relacionadas con el criterio de Maddox (1980) sobre los parámetros de identificación de los sistemas de tormentas, entre los cuales estableció el umbral inicial de temperatura para nubes frías ($- 32^\circ \text{C}$), la expresión A corresponde al umbral de esta temperatura fría.

Aunque se utilizó el criterio de Maddox (1980) para la identificación de los sistemas nubosos por ser el más robusto, existen otros criterios orientados a la localización de estructuras nubosas más pequeñas, tales como los propuestos por Bartels et al. (1984), Fritsch (1986), Kane et al (1987) y Augustine et al. (1988) entre otros

En este contexto, el aprovechamiento de la información de temperatura de brillo de las imágenes IR para la estimación de lluvia requirió del siguiente procesamiento:

1. Descompresión, transformación de la proyección nativa de las imágenes a proyección geográfica con datum NAD27, y conversión de las imágenes al formato tipo raster. Para lo cual se empleó el sistema de información geográfica ArcGIS TM sobre el modulo ArcInfo 9.2 y el modulo Workstation 9.1. En la figura 3.3a se presenta un ejemplo de esta etapa de procesamiento.
2. Recuperación de los valores de temperaturas de brillo de los valores de pixeles de las imágenes IR para la extracción de las nubes frías. Se aplicó la ecuación A de la Curva Estándar de la NOAA. La figura 3.3a muestra un ejemplo de esta etapa de procesamiento.

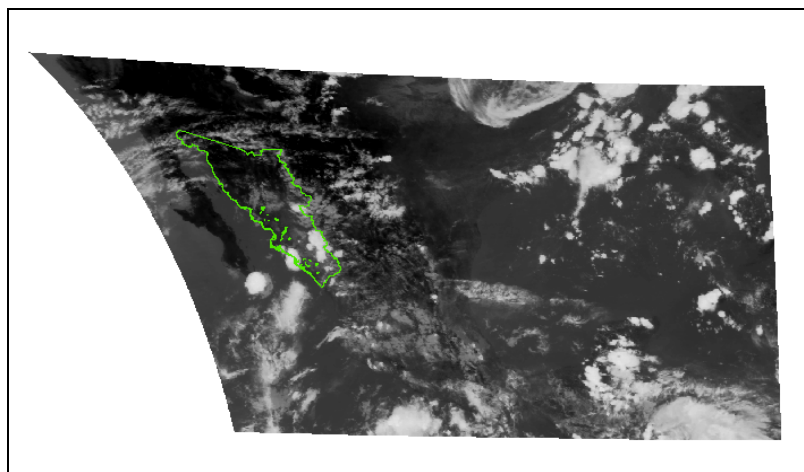
c. Caracterización de tormentas

En relación a la caracterización de los sistemas nubosos nuevamente se utilizó el criterio de Maddox (1980) para la identificación de tormentas, con el objetivo de mantener una consistencia en el procesamiento de las tormentas. Este criterio consiste en que la extensión de su cobertura nubosa superara en algún momento de su ciclo de vida los 100 Km en alguna dirección. La temperatura inferior de las nubes frías corresponde a $- 32^\circ\text{C}$.

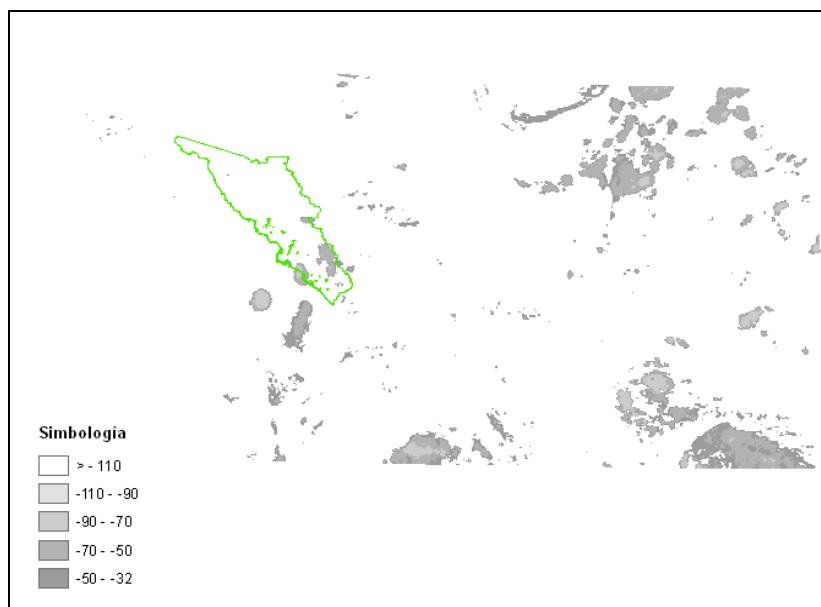
Para facilitar la identificación visual de las tormentas, se realizó un realce por colores indistintos a las nubes frías asociando un color a cada rango de temperaturas de brillo, como se observa en la figura 3.4. Este procesamiento fue realizado utilizando el modulo ArcInfo del sistema ArcGIS 9.2 y el modulo Workstation. La paleta de colores empleada y los rangos de temperaturas se listan en la tabla 3.9.

Tabla 3.9.- Paleta de colores empleada en el realce por colores de nubes frías.

Rango de temperatura	Color de identificación
- 32°C a - 50° C	Verde oscuro
- 50°C a - 70° C	Verde claro
- 70°C a - 90° C	Amarillo
- 90°C a - 110° C	Rojo
Menor - 110° C	Blanco



a) Imagen proyectada en NAD 27



b) Nubes frías extraídas, valores de temperaturas °C

Figura 3.3.- Ejemplos del procesamiento primario de las imágenes IR

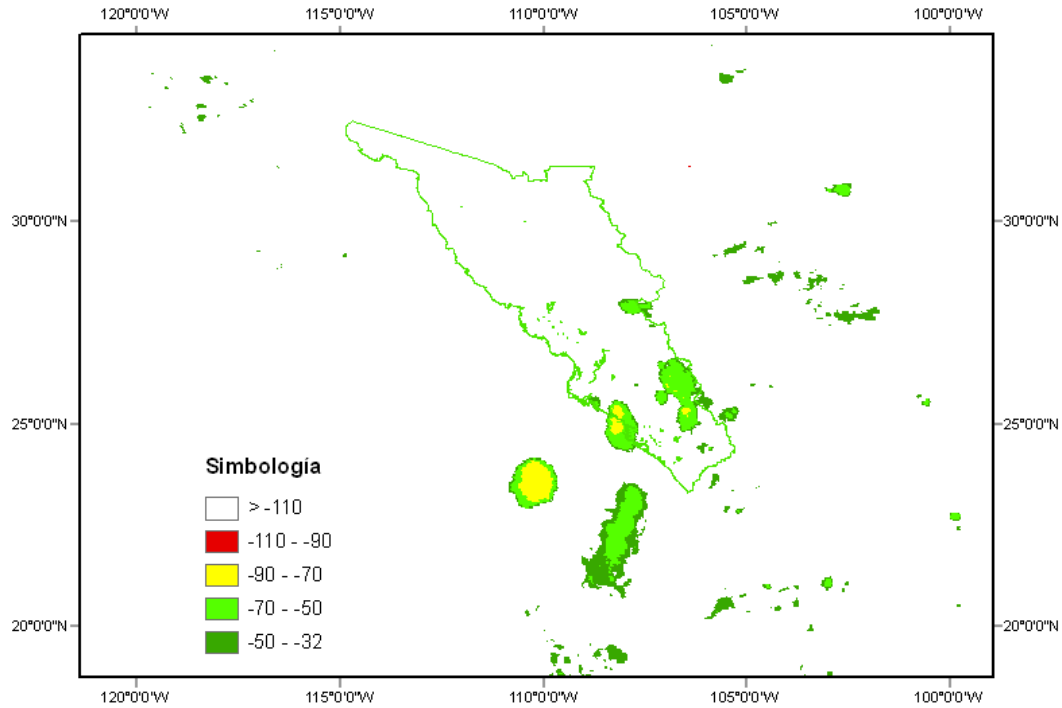


Figura 3.4.- Escenario de temperaturas por rangos (°C)

Una vez extraídas y resaltadas las nubes frías en cada imagen se procedió a la identificación de los parámetros relevantes e indicativos de la evolución de las tormentas desde su formación hasta su disipación. Los parámetros obtenidos para este estudio se tomaron del trabajo realizado por Riosalido et al. (1998) los cuales se mencionan a continuación: longitudes de los ejes mayor y menor de la cobertura de la nube en cuestión en kilómetros (denominados diagonales); así como las áreas en Km² correspondientes a los rangos de temperaturas utilizados en el relace de imágenes. Estas características permitieron la observación espacio-temporal del desarrollo de las tormentas.

La obtención de las longitudes de ejes y áreas mencionadas requirió del trazado de líneas transversales y longitudinales de cada tormenta, así como de la generación de polígonos (llamados elipses) alrededor de cada cobertura nubosa asociada a un rango de temperatura para la tormenta en cuestión. Tales procesamientos fueron realizados en ArcInfo del sistema ArcGIS 9.2.

En relación a lo anterior se consideraron ocho horas previas a la ocurrencia de precipitación y un mínimo de cuatro horas posteriores o hasta su disipación para cada evento seleccionado asegurando de esta manera la observación de la tormenta durante su desarrollo completo. Durante el procesamiento de imágenes y en los casos de la presencia de más de un polígono bajo la temperatura de -90° (núcleo convectivo) se tomaron en cuenta las siguientes condiciones relacionadas a las características de las tormentas:

- Dada la presencia de dos o más núcleos convectivos en etapa de desarrollo, se consideró como un solo sistema al haberse unido los núcleos, esto de manera subjetiva.

- En el caso contrario, es decir cuando ocurre la fragmentación del núcleo (fase de disipación), se dibujaron los sistemas nubosos divididos cuando resultaba evidente esta separación.

Con el propósito de observar la trayectoria de la tormenta, adicionalmente fueron posicionados y extraídos los puntos centrales de los núcleos convectivos en cada imagen.

A continuación se presenta un ejemplo de los resultados para la parametrización de una de las tormentas ocurridas dentro de la región de estudio.

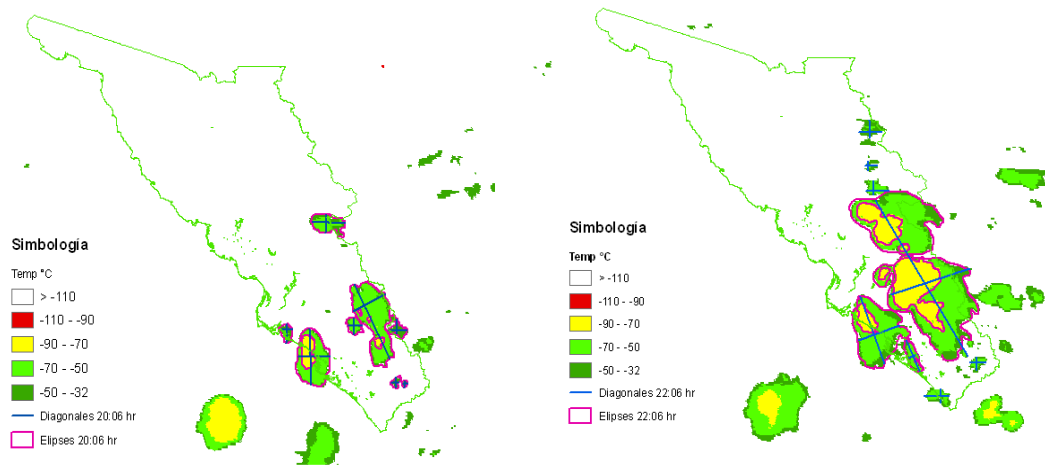
Tormenta 07/07/04

La tormenta en cuestión pertenece al grupo de tormentas ligeras y escasas registradas por la EMA Alamos. La interpretación del evento requirió del análisis de 61 imágenes satelitales disponibles a cada 15 min. en promedio y comprendidas entre las 19:47 hr del día 6 de julio hasta las 07:04 hr del siguiente día. La precipitación ocurrió en el periodo entre las 00:30 hr y 01:10 hr.

Para cada una de las imágenes anteriores se llevó a cabo la metodología descrita para la transformación a temperaturas de brillo de los píxeles, la extracción de las nubes frías, el trazado de elipses, diagonales y los puntos de localización relacionados con los núcleos convectivos. De acuerdo a la metodología fueron obtenidas las áreas y las distancias asociadas. Con estos resultados se conformó la base de datos respectiva a la evolución temporal de las diagonales y otra para las áreas de cobertura de la nube (superficies de las elipses).

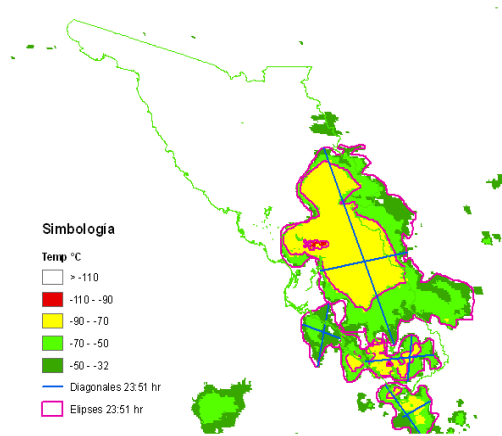
En la figura 3.5, se muestran las elipses y diagonales asociadas a los sistemas nubosos identificados durante el periodo de estudio de la tormenta en cuestión. Ambos elementos fueron resaltados en las imágenes presentadas. En la figura 3.6 se presentan el total de las diagonales y las elipses dibujadas para las imágenes de la tormenta en cuestión, así como los 3 sistemas convectivos identificados. Dos de las tormentas identificadas como 1 y 2 presentaron orientación noroeste, es decir que tuvieron una trayectoria longitudinal casi paralela a la Sierra Madre Occidental, a diferencia de las tormentas 3 y 5 que se desplazaron en dirección norte.

A partir del procesamiento se encontraron 4 sistemas convectivos principales, como ha sido mencionado previamente, en los cuales se presentaron fusiones de núcleos a lo largo de sus desarrollos, situación muy frecuente en la evolución de las tormentas. La tormenta objeto de este análisis es la denominada "Sistema 2". En las figuras 3.7 y 3.8 se presentan las curvas evolutivas correspondientes a las longitudes de los ejes y a las áreas de cobertura nubosa de la tormenta en cuestión. Las tablas de los valores asociadas a estas gráficas se encuentran en el anexo 4, en las tablas 1 y 2.



a) 20:06 hr. 06/07/04

b) 22:06 hr. 06/07/04



c) 23:51 hr. 06/07/04

Figura 3.5.- Muestra del procesamiento de imágenes de la tormenta 07/07/04

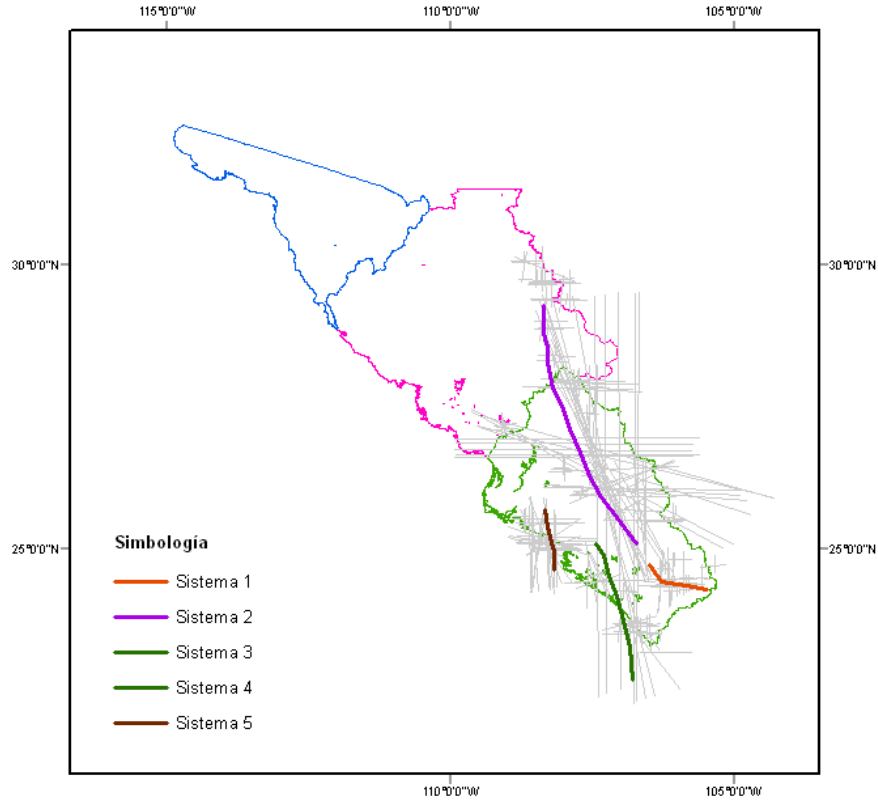


Figura 3.6.- Trayectoria de los sistemas nubosos, tormenta 07/07/04

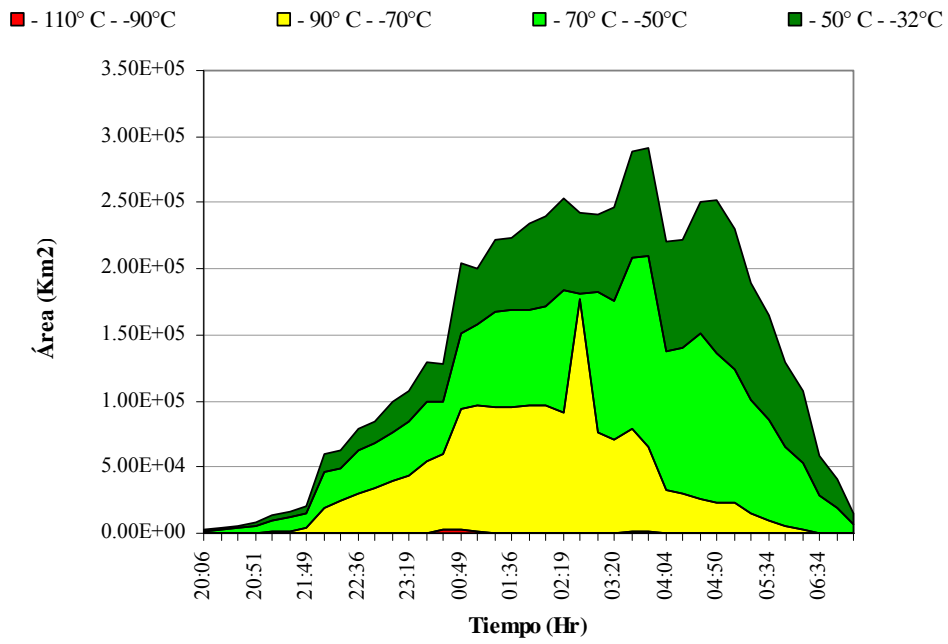


Figura 3.7.- Áreas de cobertura nubosa de la tormenta 07/07/04 de acuerdo a los rangos de temperatura empleados en el estudio.

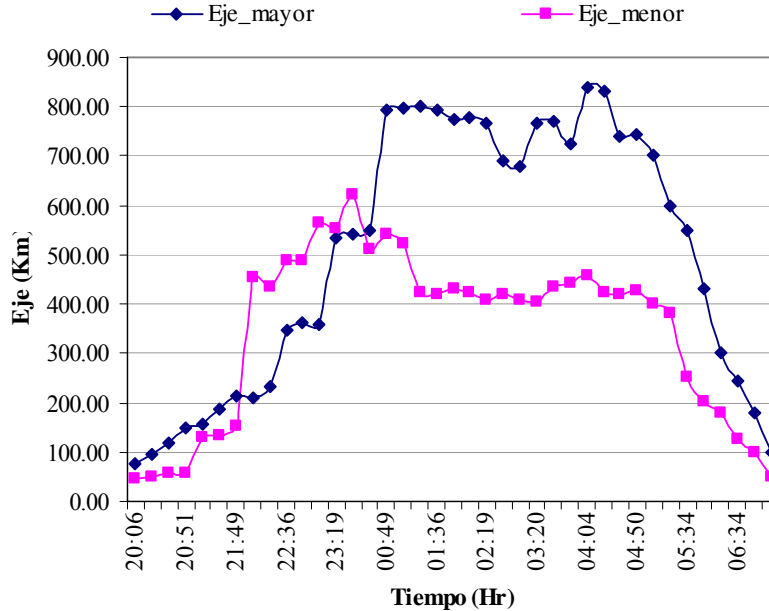


Figura 3.8.- Longitudes de los ejes mayor y menos trazados para la tormenta 07/07/04

La observación del desarrollo de la tormenta ocurrida en la fecha 07/07/04 comprendió el periodo entre las 20:06 hr del día 06/07/04 hasta las 07:04 hr del día 07/07/04. De acuerdo a la curva de evolución de la cobertura nubosa mostrada en la figura 3.6 se presenta una tendencia de crecimiento gradual para los distintos rangos de temperatura empleados, luego las pendientes sufren un incremento súbito en un corto tiempo, nuevamente continúa el crecimiento gradual pero con una tasa menor, se alcanza un máximo y finalmente sucede el decremento de la pendiente. Tal comportamiento se relaciona directamente con las fases de desarrollo de tormentas como son la fase inicial, madurez y disipación. Cuando la precipitación se presenta comienza la fase de disipación, sin embargo en este caso se formó un nuevo núcleo convectivo de menor intensidad ya que no derivó en lluvia como en el caso del primero. En la gráfica 3.7 es clara la amplia extensión de la cobertura nubosa que alcanza la tormenta, aunque el área correspondiente al rango de -100°C a -90°C es escasamente perceptible (área en color rojo), más sin embargo la precipitación ocurrió en una porción bajo esta extensión nubosa. La mayor cobertura alcanzó los $290,970.53 \text{ km}^2$ a las 03:49 hr y corresponde a la maduración del segundo núcleo convectivo, es decir a un notable incremento de la energía de la tormenta previo al instante mencionado.

En la figura 3.8 se muestra la evolución de la tormenta de acuerdo a los ejes mayor y menor respectivamente. De manera similar al parámetro anterior, en las curvas de estos ejes se observa un crecimiento gradual, un incremento súbito de la pendiente, sigue un crecimiento gradual más ligero, estabilización y descenso de la pendiente. Las curvas son muy similares, aunque el eje menor presenta un leve desfase en relación al eje mayor. Lo cual puede deberse muy probablemente a la forma irregular real de la cobertura nubosa.

El comportamiento de la tormenta se transmitió a los parámetros obtenidos de manera muy similar, hecho que demostraron las respectivas gráficas. Así mismo, estos parámetros también permitieron observar claramente la evolución espacio-temporal del evento, incluyendo la adición de un sistema menor. Sin desestimar la información que proporciona la curva de los ejes, la curva de las áreas de cobertura aporta mayor información por asociar área y rangos de temperaturas.

Se analizaron 4 tormentas adicionales ocurridas en la zona de estudio bajo el procedimiento descrito. Los resultados se presentan en el anexo 4, figuras 1 a 15.

3.4 Determinación de lámina de lluvia para un caso de estudio especial

Una vez realizada la caracterización de la tormenta como se describió es posible obtener la estimación de la lluvia por medio de la técnica del auto-estimador. A continuación se describe esta técnica y se presenta la aplicación para un caso especial de estudio.

Descripción de la técnica auto-estimador

Como se mencionó anteriormente, este algoritmo fue desarrollado por Vicente et. al (1998) para la estimación de la lluvia por medio de imágenes de satélite IR en la banda 10.7 μm (canal 4), provenientes de los satélites GOES-8 y GOES-9, y especialmente sobre eventos relacionados con convección profunda en la temporada de verano.

El algoritmo consiste en una ley de regresión de potencia derivada de la estadística realizada entre las estimaciones instantáneas de lluvia derivadas de radar en superficie y las temperaturas del tope de las nubes obtenidas por satélites, ambas estimaciones hechas para el mismo tiempo y espacio (mayo a junio de 1995, en la zona central de las grandes planicies de EUA). También dicha ecuación requiere ser afectada por los siguientes factores de corrección: por humedad, crecimiento de nubes y un gradiente de temperatura de tope de las nubes, para un mejor ajuste de los estimados, cuyos procedimientos pueden ser consultados en Vicente et al. (1998). La expresión es la que se muestra a continuación:

$$R = 1.1183 \times 10^{11} \exp(-3.6382 \times 10^{-2} T^{1.2}) \quad 3.1$$

Donde R es la razón de lluvia en milímetros por hora y T es la temperatura del tope de las nubes en grados Kelvin para el rango entre 195 y 260 °K.

La lluvia promedio en una hora (I, mm/hr) estimada a partir de imágenes IR en canal 4 se obtiene píxel por píxel entre las 3 imágenes consecutivas a cada media hora aplicando el concepto de media triple (trimean), contando con las imágenes previamente procesadas con la ecuación 3.1. Por lo tanto razón de lluvia para una hora esta dada por:

$$\text{Luvia (1 hora)} = (\text{Lluvia mínima} + 2 * \text{Lluvia media} + \text{Lluvia máxima}) / 4 \quad 3.2$$

De tenerse valores de lluvia iguales en 2 ó 3 de las imágenes, el resultado de la lluvia promedio de una hora se puede calcular como la media simple. Para periodos más largos de una hora simplemente se acumulan los resultados horarios de lluvia.

Este método también contempla la consideración de varias correcciones con base en información de radar, las cuales no fueron tomadas en cuenta en este estudio por la carencia de esta información. Este método se aplicó en forma simplificada.

Caso de estudio especial. Estimación de lluvia con base en imágenes de satélite (Arellano L. et al. 2010)

La tormenta analizada fue aquella ocurrida el 29 de septiembre del 2004 en la ciudad de Querétaro, la cual comenzó a las 01:50 a.m.

Una vez que fue generada la información de las nubes frías en mapas de temperaturas, fue posible la estimación de la lluvia con base en la técnica del auto-estimador. Los escenarios de temperaturas requeridos por método de auto estimador simplificado (lluvia mínima, lluvia media, y lluvia máxima) se crearon por medio del modulo ArcInfo del sistema ArcGIS 9.2. Posteriormente estos mapas fueron empleados para calcular el mapa de la razón de lluvia de una hora, el cual corresponde a la tormenta. Este último mapa fue utilizado para obtener la distribución espacial de la lluvia mediante el algoritmo de interpolación de Kriging, cuyas isoyetas generadas se muestran en la figura 3.9.

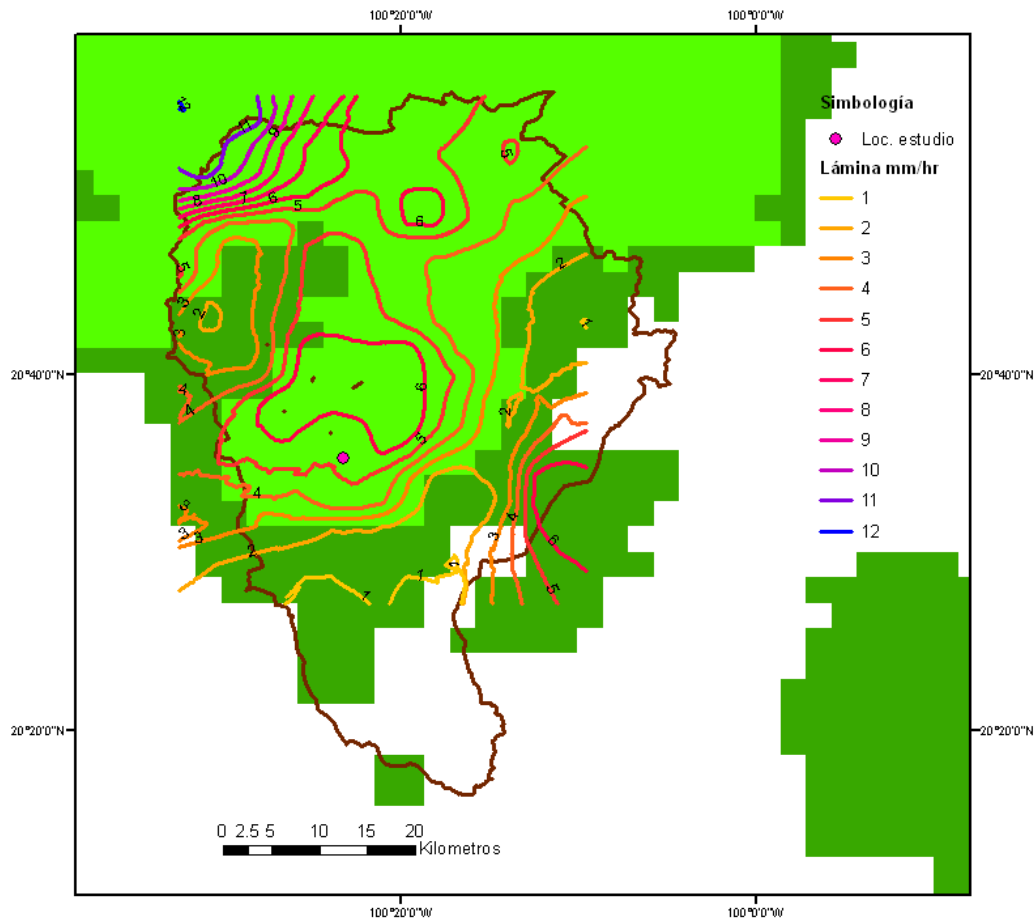


Figura 3.9.- Lluvia estimada entre el periodo de las 01:49 hr a 02:51 hr para la tormenta del 29 de septiembre del 2004 en Querétaro, Qro.

A partir del mapa obtenido es posible determinar la lluvia en cualquier punto dentro de la superficie cubierta por las isoyetas, por ejemplo la lluvia sobre un punto ubicado aproximadamente al centro de la cuenca de estudio, entre las isoyetas de 5 y 6 mm/hr, le corresponde un valor de razón de lluvia de 5.26 mm/hr, obtenido por interpolación. Por lo tanto, la lámina acumulada en este punto para la tormenta del día 29 de septiembre del 2004 a la 1:50 a.m. es de 5.26 mm. Tales resultados muestran una completa similitud de la medición de precipitación, sin embargo es un caso aislado, por lo cual debe considerarse con reserva, de manera demostrativa de la aplicación del método y a la vez de la utilidad que representan las imágenes de satélite en este aspecto.

Capitulo 4

Patrones climáticos antecedentes de tormentas

4.1 Antecedentes

Las condiciones geográficas y climatológicas del país dan lugar a la ocurrencia periódica de numerosas tormentas que son las causantes de severas inundaciones en distintas zonas del territorio nacional, así como daños a la población. Las regiones costeras en general son periódicamente las más afectadas por esta clase de fenómenos.

En este sentido, las tormentas de alta peligrosidad y frecuentes en México son originadas por los sistemas convectivos de mesoescala (SCM), que son un tipo especial de estructura nubosa de gran cobertura espacial (extensión de 100 Km o más en una sola dirección), sin embargo existen otras variedades de sistemas nubosos y por consecuencia otros tipos de precipitaciones. A esto se debe la gran importancia de realizar la identificación de estos fenómenos y asociarla a la modelación hidrológica clásica, para finalmente efectuar una estimación oportuna de las láminas de lluvia que producirán. Estas condiciones permitirán que las acciones preventivas y de mitigación a estos fenómenos sean más eficientes a las poblaciones.

Una estimación eficiente de la lluvia para el pronóstico de escurrimientos, requiere de la correcta medición de la distribución espacial y temporal de la lluvia. El empleo de datos de lluvia registrados únicamente por redes pluviométricas, radares meteorológicos o la combinación de ambos, no tiene la capacidad de observar por completo la evolución de las tormentas convectivas y en consecuencia la estimación con mayor precisión de lluvia, debido principalmente a la limitante relacionada a la cobertura espacial del fenómeno. Las alternativas empleadas para salvar esta condición han sido basadas directamente en el uso de imágenes de satélite directamente o en la combinación con datos de radar, superficie y modelos atmosféricos como son los trabajos: Moses y Barret, (1986), Clark y Morris, (1986), Creutin, Lacombe y Obled, (1986), Milford, McDougall y Dugale (1994), Carn (1994), Hubert y Toma (1994), Laurent (1994), Touré y Diaye (1994), Ravelo y Santa (2000), Freidas et al (2005), Sawunyama y Hughes (2008), Freidas et al (2008), y Gairola et al. (2005) entre otros. Sin embargo, estos métodos requieren equipo de procesamiento de cómputo altamente especializado así como de la intervención de un equipo de expertos meteorólogos.

En este trabajo se presenta una metodología para la estimación del potencial de tormentas basada en el empleo de patrones antecedentes de tormentas, sustentados con base en la combinación de datos medidos en superficie (EMAs) e información interpretada de imágenes de satélite. A partir de la gran relación identificada entre ambos datos analizados y la metodología expuesta, los registros meteorológicos en superficie pueden ser empleados de manera eficiente en la estimación del potencial de tormentas con una anticipación de 12 horas.

4.2 Caso de estudio

El espacio y tiempo que comprende este estudio corresponden a la zona noroeste de México, como ya se ha mencionado, así como al periodo de 1999 a 2006. La información disponible de las EMA's corresponde a este periodo.

La investigación se orientó hacia las tormentas ocurridas en la zona montañosa incluida en la zona_NAME, que se encuentra limitada entre la elevación de 1500 msnm y la frontera Este de zona_NAME, que se presenta en la figura 4.a. La razón fundamental de haber concentrado el estudio en la zona de montaña fue por que en esta zona se cuenta con un número mayor de EMAs en comparación con la zona_NAME completa. Lo cual implicaba contar con buena medición en superficie, dando lugar posteriormente a un análisis más robusto. Otra de las razones es el hecho que las tormentas en zonas montañosas se caracterizan por tener un mayor índice de severidad.

Por otro lado, la temporada del monzón mexicano está directamente asociada a la ocurrencia de tormentas severas producidas por la combinación de diversos factores, tales como las condiciones de inestabilidad atmosférica acarreadas por este fenómeno, las características del relieve debidas a la barrera orográfica creada por Sierra Madre Occidental, así como los distintos tipos de climas inmersos en zona_NAME. Lo cual da lugar a un significativo número de tormentas convectivas en la zona_NAME durante la estación del monzón, y de fuerte impacto en el noroeste del país. Debido a estas condiciones, este trabajo se basó en una muestra de estas tormentas monitoreadas al mismo tiempo tanto a nivel de superficie como por medio de imágenes de satélite.

El periodo de tiempo de información disponible de imágenes satelitales para el estudio fue del año 2004 al 2006, por lo tanto en este lapso fue realizado el acoplamiento de ambos tipos de datos. A continuación se describen los análisis mencionados además del estudio de acoplamiento de datos de tormentas entre estos.

4.3 Condiciones meteorológicas antecedentes

4.3.1 Análisis en superficie

Se crearon bases de datos a partir de los registros de variables meteorológicas medidos por las EMA's localizadas dentro de la zona montañosa perteneciente a Zona_NAME, con la finalidad de obtener las condiciones meteorológicas antecedentes a la ocurrencia de tormentas denominadas moderadas y fuertes, de acuerdo a los rangos de lámina de lluvia empleados por el SMN. De esta manera, la información de las bases de datos corresponden a las variables siguientes: dirección del viento (Dir), dirección de la rafaga de viento (WSMDir), velocidad del viento (WSK), velocidad de la rafaga de viento (WSMK), temperatura (Temp), humedad relativa (H.R), precipitación (Rain), presión barométrica (BP) y radiación solar (RS).

Las bases de datos de tormentas fueron organizadas conforme a los rangos mencionados de tormentas así como a los meses de la temporada de lluvias (junio, julio, y agosto, septiembre). Cada base de datos contiene un identificador para las estaciones, hora y fecha del registro, además de las variables meteorológicas. En total se construyeron 8 bases de datos, 4 de ellas corresponden al rango de tormentas moderadas y el resto a tormentas fuertes. Las estaciones de medición empleadas en el estudio se listan en la tabla 4.a y en el mapa de la figura 4.a están localizadas.

La construcción de las 8 bases de datos de tormentas requirió de la previa identificación de todas las tormentas registradas por cada una de las EMAS. Esta identificación fue descrita en el apartado anterior.

Tabla 4.a.- EMA's localizadas dentro de la zona de estudio.

ESTADO	NOMBRE	Fecha-Inicio	Latitud	Longitud	Altitud
Chihuahua	BASASEACHI	07-May-99	28°11'57"	108°12'32"	1973
	CHINATÚ	04-Jun-99	26°13'46"	106°46'14"	1982
	CHINIPAS	24-May-99	27°23'34"	108°32'11"	431
	GUACHOCHI	31-May-99	26°48'49"	107°04'23"	2390
	MAGUARICHI	10-Jun-99	27°51'30"	107°59'40"	1663
	URIQUE	15-Abr-99	27°12'56"	107°55'1"	577

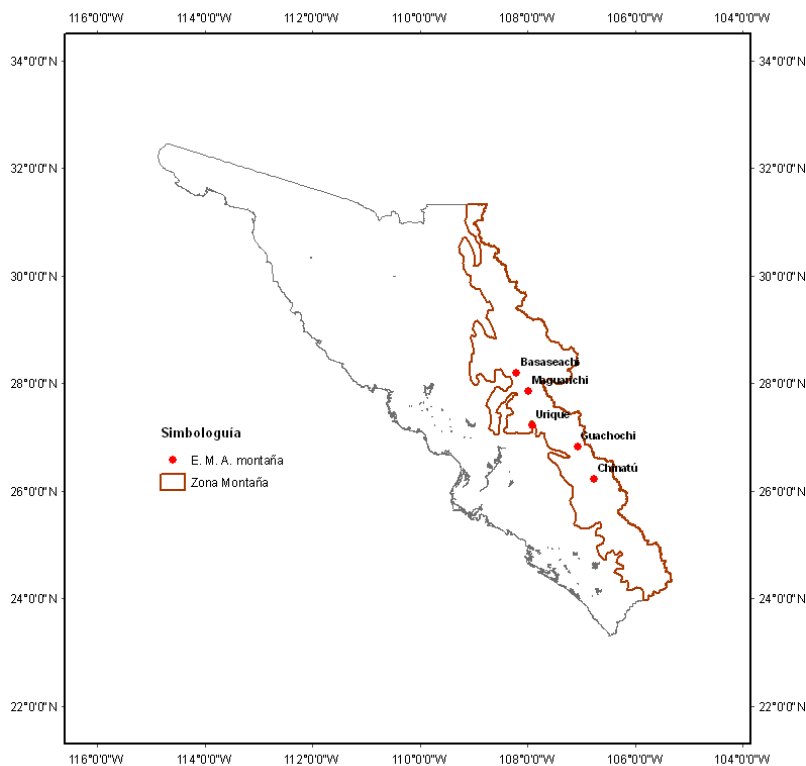


Figura 4.a.- Delimitación espacial de la zona montañosa de estudio.

Bases de datos de tormentas para el estudio

El periodo de estudio de tormentas seleccionado corresponde al de los meses de Julio entre 1999 y 2006, debido a que durante este mes se presenta la máxima señal de la temporada de lluvias en la región de estudio, lo cual ha sido evidenciado en varios estudios como en Gochis et al. (2006). Con el propósito de confirmar la validez de la elección del mes de Julio, se obtuvo la gráfica de la lluvia media mensual para esta región de estudio, la cual se presenta en la figura 4.1 del anexo 5.

A partir del total de tormentas previamente identificadas tal como se describió en el capítulo 3, se seleccionaron aquellas con láminas de lluvia correspondientes a los rangos moderado y fuerte de precipitación. Enseguida se extrajeron los datos de todas las variables medidas por la EMA de que se trata, correspondientes a 12 horas previas a la ocurrencia de la tormenta, los datos de la tormenta, así como los registros de 4 horas después del evento como mínimo. Se acumuló la información así generada, por rango de tormenta, por meses y por EMA. Se procesaron las 8 bases de datos para obtener la información en promedios horarios sobre las variables registradas excepto para la precipitación donde los registros fueron acumulados. Con la información así preparada se obtuvieron las curvas del comportamiento en el tiempo de cada variable asociada a los rangos de tormentas en cuestión, meses y sitio de estudio. Se emplearon 105 tormentas moderadas y 44 tormentas fuertes distribuidas de acuerdo a la tabla 4.1. Como muestra del proceso mencionado, se han incorporado en el anexo 5, las tablas 1 y 2 que contienen las listas de tormentas totales moderadas y fuertes registradas por el EMA Basesachi en el periodo de estudio.

Tabla 4.1. Tormentas de montaña empleadas para el análisis climático antecedente en superficie

EMA	Torm Moderadas	Torm Fuertes
Basesachi	19	10
Chinatu	21	9
Guachochi	23	10
Maguarichi	22	6
Urique	20	9
Total	105	44

A continuación, en las figuras 4.1 a 4.6 se presentan los principales resultados obtenidos para las variables meteorológicas antecedentes siguientes: Dir, WSK, Temp, H.R, BP y RS. Se emplearon las tormentas moderadas y fuertes ocurridas en los meses de julio. A partir de los resultados obtenidos se seleccionaron aquellas variables cuyos patrones resultaran más adecuados al estudio de las tormentas con información combinada, tales variables son la temperatura y la humedad relativa. Se evaluaron los coeficientes de correlación entre todas las variables mencionadas por rango de tormenta y los valores más altos concordaron con la correlación entre temperatura y humedad relativa de -0.996 y -0.988 respectivamente a tormentas moderadas y fuertes, como se muestra en las tablas 4.2 y 4.3. Se seleccionó la variable de temperatura promedio en superficie para efectuar el análisis de acoplamiento con las temperaturas interpretadas de imágenes de satélite, por tratarse del mismo tipo de variable, asegurando así mayor certeza.

Se observó además que la mayoría de las variables presentó diferencias sensibles entre los dos rangos de tormentas del estudio (moderadas y fuertes), excepto por la presión barométrica que no mostró variaciones.

Tabla 4.2. Coeficientes de correlación entre las variables meteorológicas medidas en superficie. Tormentas moderadas

	Dir_10	WSK_10	Tmont_10	RH_10	BP_10	SR_10
Dir_10	1	0.156	-0.158	0.214	-0.081	-0.409
WSK_10		1	0.758	-0.729	-0.854	0.517
Tmont_10			1	-0.996	-0.820	0.929
RH_10				1	0.820	-0.941
BP_10					1	-0.600
SR_10						1

Tabla 4.3. Coeficientes de correlación entre las variables meteorológicas medidas en superficie. Tormentas fuertes

	Dir_20	WSK_20	Tmont_20	RH_20	BP_20	SR_20
Dir_20	1	0.026	-0.143	0.192	-0.244	-0.454
WSK_20		1	0.700	-0.679	-0.836	0.493
Tmont_20			1	-0.988	-0.857	0.896
RH_20				1	0.839	-0.925
BP_20					1	-0.599
SR_20						1

La dirección del viento (Dir) no exhibió un patrón evidente antecedente a la ocurrencia de la lluvia en los casos mencionados, por lo contrario del resto de las variables. Con base los resultados comentados se continuó con el análisis de acoplamiento entre las temperaturas promedio en superficie y las temperaturas obtenidas de imágenes de satélite, entre los casos de estudio identificados previamente con este propósito.

La nomenclatura general empleada en la descripción de las gráficas es la siguiente:
Prom_TMONT_10/20= Valor promedio en superficie de la variable en cuestión, relacionado a tormentas moderadas/fuertes, en este ejemplo se trata de temperatura.
lim_sup_10/20= Limite superior de la variable asociada a tormentas moderadas/fuertes
lim_inf_10/20= Limite inferior de la variable asociada a tormentas moderadas/fuertes

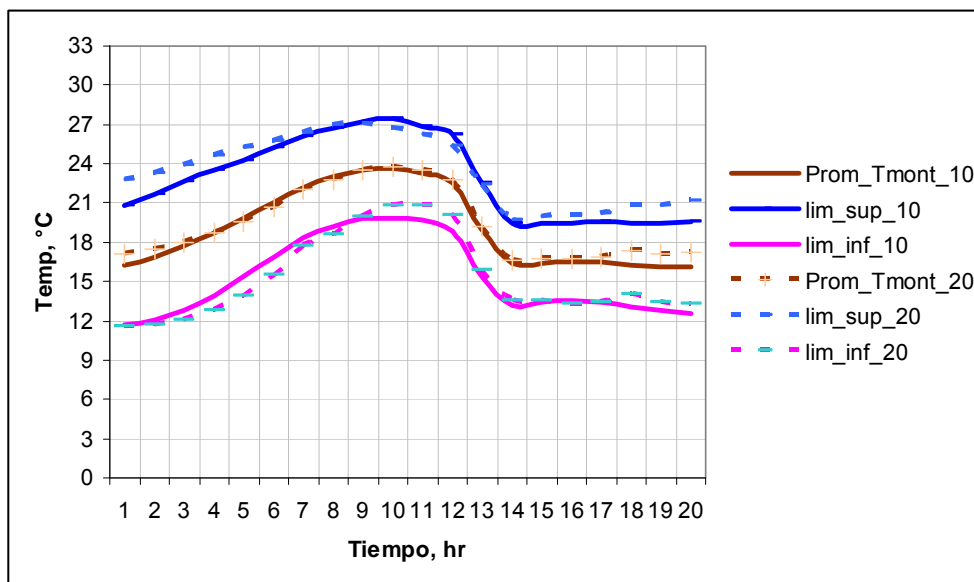


Figura 4.1.- Patrón de temperaturas promedio en la zona de montaña, tormentas moderadas y fuertes.

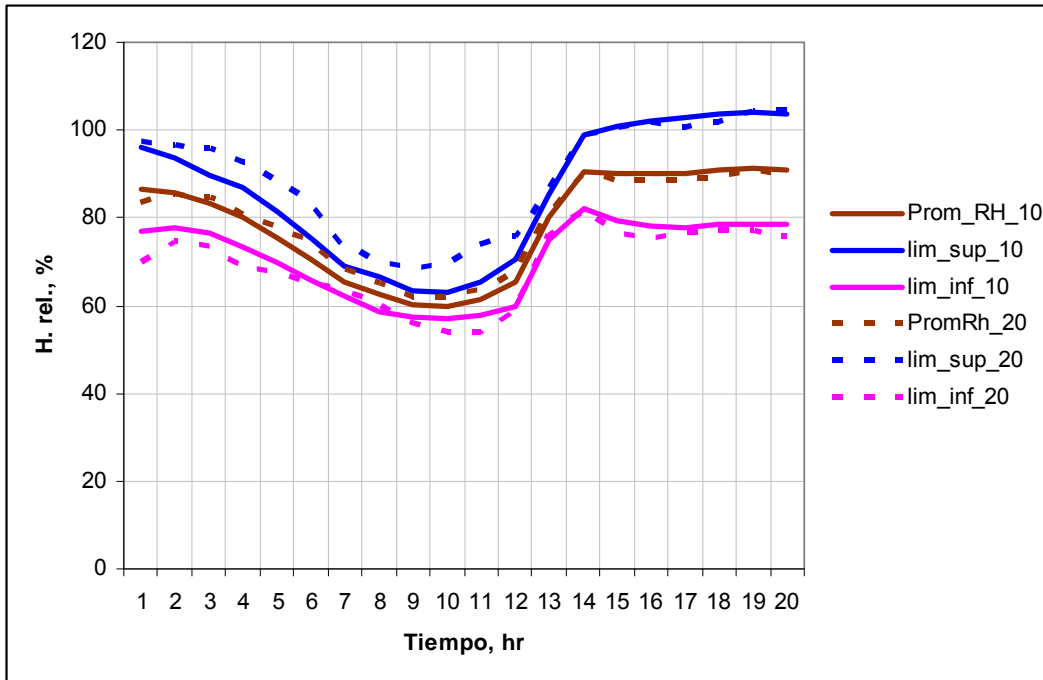


Figura 4.2.- Patrón de humedad relativa promedio en la zona de montaña, tormentas moderadas y fuertes.

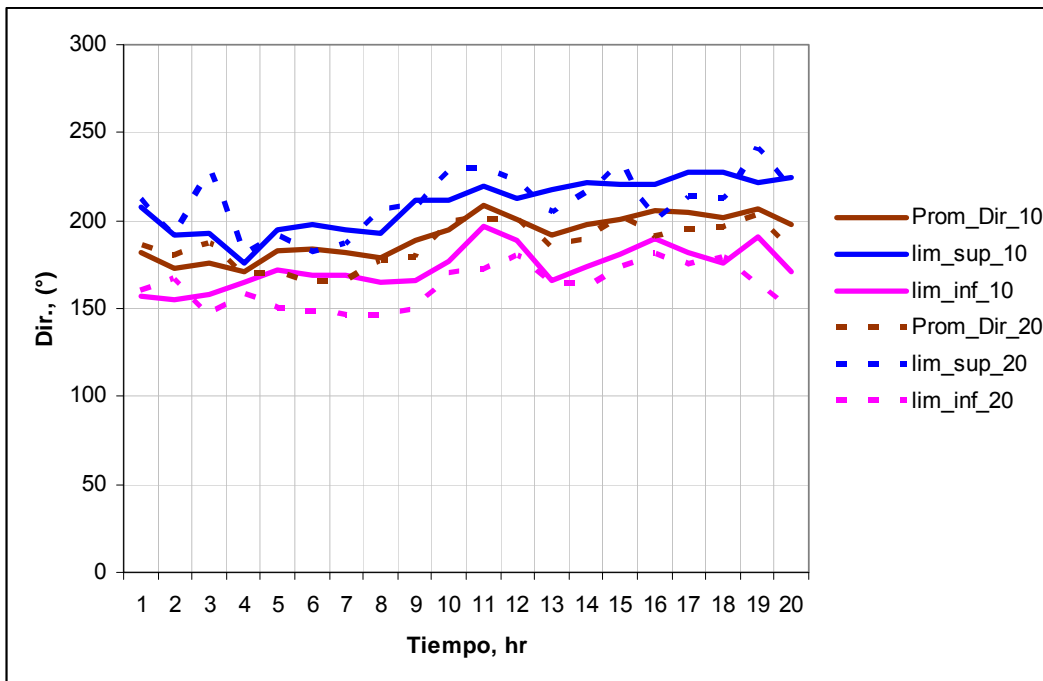


Figura 4.3.- Patrón de direcciones de viento promedio en la zona de montaña, tormentas moderadas y fuertes.

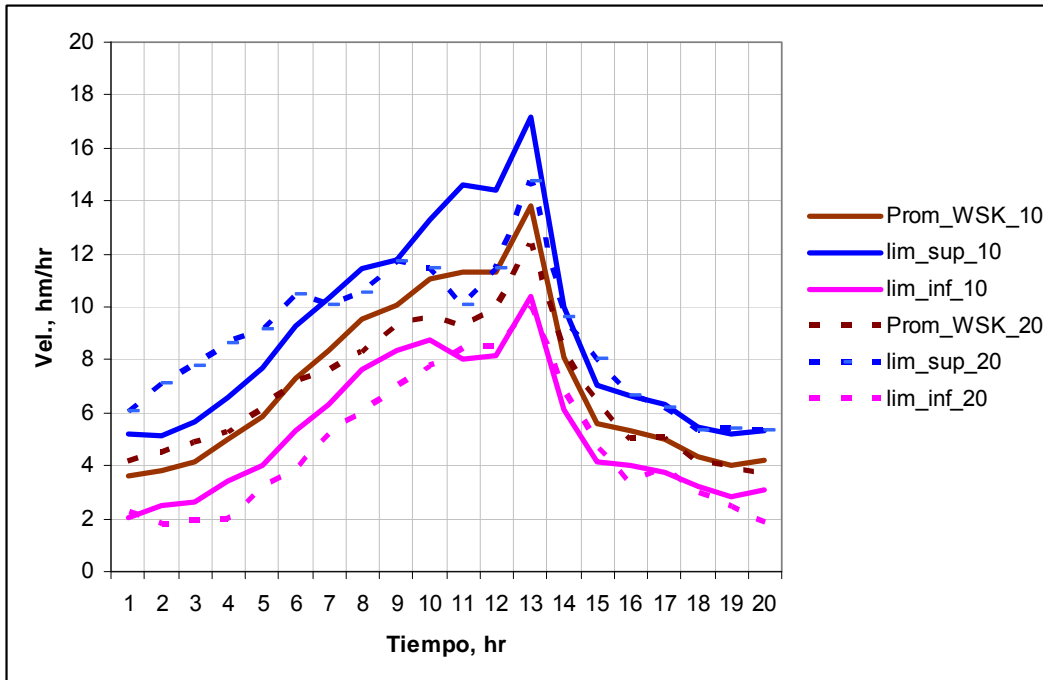


Figura 4.4.- Patrón de velocidades de viento promedio en la zona de montaña, tormentas moderadas y fuertes.

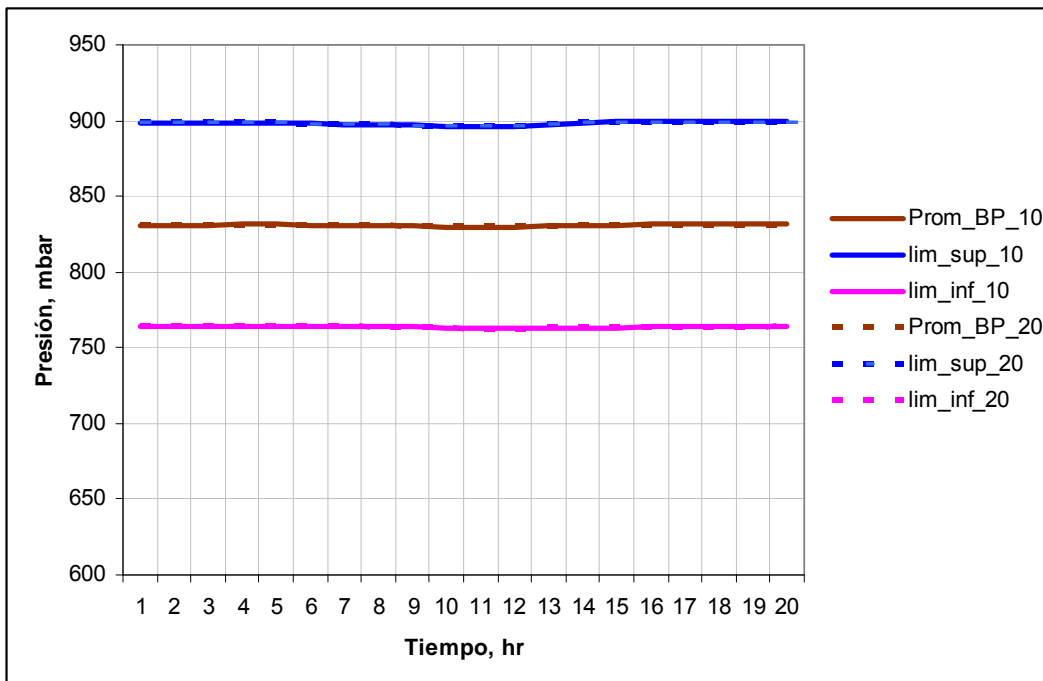


Figura 4.5.- Patrón de presiones barométricas promedio en la zona de montaña, tormentas moderadas y fuertes.

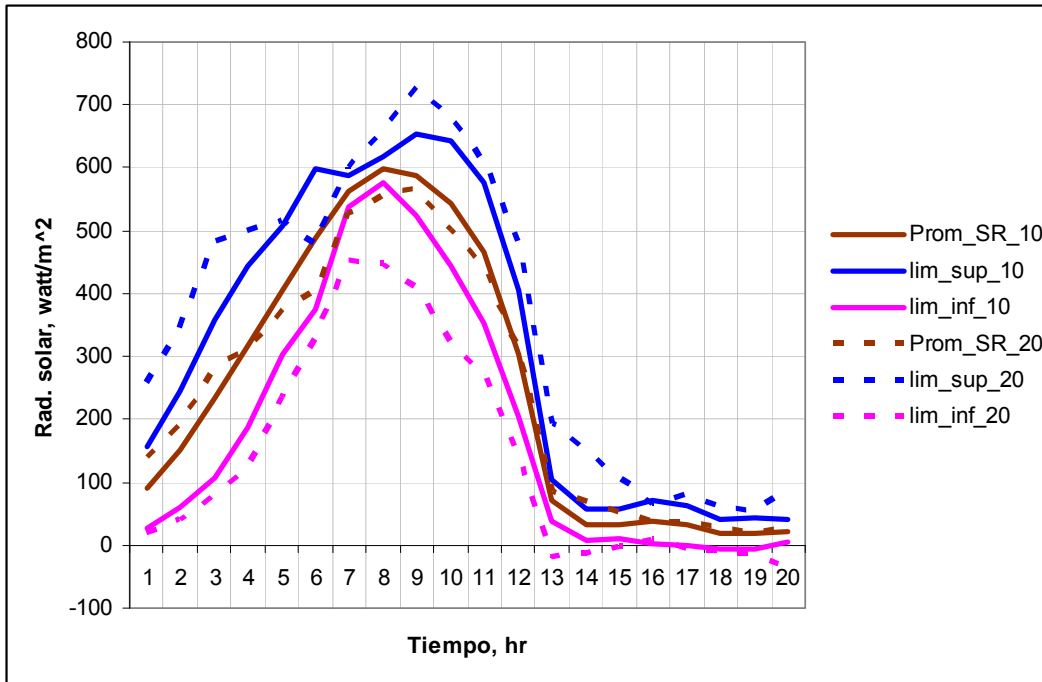


Figura 4.6.- Patrón de radiación solar promedio en la zona de montaña, tormentas moderadas y fuertes.

4.3.2 Análisis de tormentas a partir de imágenes de satélite.

Para este análisis de las tormentas a través de las temperaturas de brillo, obtenidas de las imágenes de satélite, fueron identificadas aquellas tormentas registradas en superficie comprendidas dentro del periodo 2004-2006.

Tal como fue descrito anteriormente, el procesamiento de las imágenes IR consistió en la transformación los valores de píxeles de las imágenes (0 a 255) a temperaturas de brillo en °C. La formulación utilizada en esta investigación para la estimación de las temperaturas de nubes frías fue la correspondiente a la Curva Estándar de la NOAA (NOAA,1975; Weinreb et al., 1997) desarrollada propiamente para imágenes IR en formato de 8 bits provenientes de los satélites GOES (NASA, 2005).

Las temperaturas de brillo obtenidas bajo éste u otros procedimientos son empleadas en la inferencia de precipitación a través de diversas técnicas indirectas relacionadas con datos infrarrojos. Como se mencionó en el capítulo anterior estas técnicas han sido clasificadas en: índice de nube, historia de vida, métodos bi-espectrales, y en técnicas de modelos de nubes.

Las ecuaciones de conversión de temperaturas de brillo de la NOAA consideran como umbral inicial de temperatura para nubes frías a los - 32° C. Estas conversiones hacen que las nubes y otros cuerpos fríos aparezcan en tonos blancos en una imagen, por el contrario de los cuerpos calidos como el terreno se muestra en tonos oscuros. De esta manera las imágenes en canales IR son transformadas a imágenes en canales visibles. Las expresiones para la transformación de valor de píxel a temperatura de brillo son las siguientes:

- Nubes frías : si $B > 176$ entonces $T = 418 - B$
- Nubes tibias : si $B \leq 176$ entonces $T = 330 - (B/2)$

Donde B es el valor de píxel.

De acuerdo a la literatura, se han establecido diferentes umbrales para las temperaturas de nubes frías relacionados a diferentes latitudes y tipos de satélites, por lo tanto las ecuaciones de transformación a temperaturas de brillo presentan variaciones. La zona_NAME está localizada dentro de la región de América del Norte, hecho que permitió la aplicación de las formulaciones mencionadas sin modificaciones. En este contexto se utilizaron los conjuntos de imágenes a cada 15 minutos, conformados por 12 horas previas y 4 horas posteriores la ocurrencia de la lluvia para el rango de tormentas moderadas y fuertes. En las tablas 4.4 y 4.5 se listan las tormentas moderadas y fuertes nombradas por una clave compuesta por la fecha, hora de inicio y hora de término de la lluvia.

Tabla 4.4. Lista de tormentas moderadas para análisis

No.	cve Tormentas	Lámina
1	01/07/2004 23:10 - 23:50	10.66
2	07/07/2004 21:00 - 21:30	11.42
3	08/07/2005 21:30 - 22:00	18.04
4	08/07/2006 00:00 - 00:30	14.48
5	08/07/2006 20:50 - 21:20	12.2
6	14/07/2006 00:00 - 00:40	19.55
7	22/07/2005 17:50 - 18:30	15.49
8	24/07/2004 00:10 - 01:00	11.68
9	24/07/2005 01:20 - 02:10	19.3
10	28/07/2004 23:10 - 23:50	11.94

Tabla 4.5. Lista de tormentas fuertes para análisis

No.	cve Tormentas	Lámina
1	02/07/2004 22:00 - 22:50	32.76
2	03/07/2005 21:00 - 21:40	20.07
3	04/07/2004 20:10 - 21:30	20.05
4	04/07/2006 22:20 - 23:20	23.11
5	05/07/2006 02:20 - 03:00	22.86
6	09/07/2006 01:20 - 02:00	26.66
7	20/07/2004 20:20 - 20:50	21.33
8	22/07/2004 04:00 - 04:40	20.58
9	22/07/2004 21:40 - 22:10	21.33
10	27/07/2005 22:10 - 22:50	22.11

La extensión superficial de todas las imágenes IR analizadas corresponde exactamente con la zona montañosa en superficie. Así con este propósito se extrajeron de cada una de las imágenes IR los datos pertenecientes al área de estudio mencionada. Se procesaron las imágenes IR satelitales desde su formato nativo comprimido (valores de brillantez por píxeles en formato .PCX) hasta la transformación en formato espacial

raster (mapas térmicos) con valores de temperaturas en °C. Y para facilitar el manejo de las imágenes, a cada una le fue asignado el sistema de coordenadas NAD 27. Posteriormente, los mapas térmicos que originalmente se tenían en intervalos de 15 minutos fueron condensados a intervalos horarios que permitieran el acoplamiento con la información en superficie analizada por horas.

La naturaleza de los datos en superficie, es decir, las series horarias de temperaturas, determinaron la discretización de los mapas térmicos en datos concretos estadísticos, es decir, series de valores promedios, máximos y mínimos de temperaturas horarias sobre la zona de estudio, las cuales son denominadas series de satélite. Una vez unificadas las series de tiempo de temperaturas en superficie y satelitales fue realizada la comparación entre ambos datos basada en la evolución temporal de los patrones promedios y la correlación entre ambas variables, tanto para el rango de tormentas moderadas como fuertes. Así fueron obtenidos los coeficientes de correlación entre los datos en superficie y las series paramétricas de satélite sobre ambos rangos de tormentas. La evolución temporal de las series paramétricas satelitales así como la serie de temperaturas en superficie para cada rango de tormentas analizadas se muestran en las figuras 4.7 y 4.8.

En ambos tipos de tormentas los coeficientes de correlación más altos correspondieron a las temperaturas de satélite máximas obtenidas a partir de los mapas térmicos. Este hecho es evidente en las curvas respectivas mostradas en las figuras siguientes, por rango de tormentas. Los resultados de los coeficientes de correlación se presentan en la tabla 4.6 siguiente.

Tabla 4. 6. Coeficientes de correlación entre superficie y satélite, 12 hr previas a la precipitación

<u>Temp sat</u>	<u>tor moderadas</u>	<u>tor fuertes</u>
Min	-0.652	-0.530
Med	0.178	-0.542
Max	0.984	0.989

La diferencia entre los patrones de las clases de temperaturas por tipo de tormentas es apenas perceptible debido a la extensa cobertura espacial del análisis correspondiente a la zona montañosa completa. Sin embargo la gran correlación identificada entre los valores de temperaturas en superficie y de satélite en las 12 horas previas a la ocurrencia de lluvia sustentó la realización posterior de este mismo análisis de acoplamiento de temperaturas en las regiones circundantes de influencia a las estaciones meteorológicas automáticas localizadas en la zona de montaña como son: Basesachi, Chinatú, Guachochi, Maguarichi e Urique. Los resultados se presentan en el siguiente apartado.

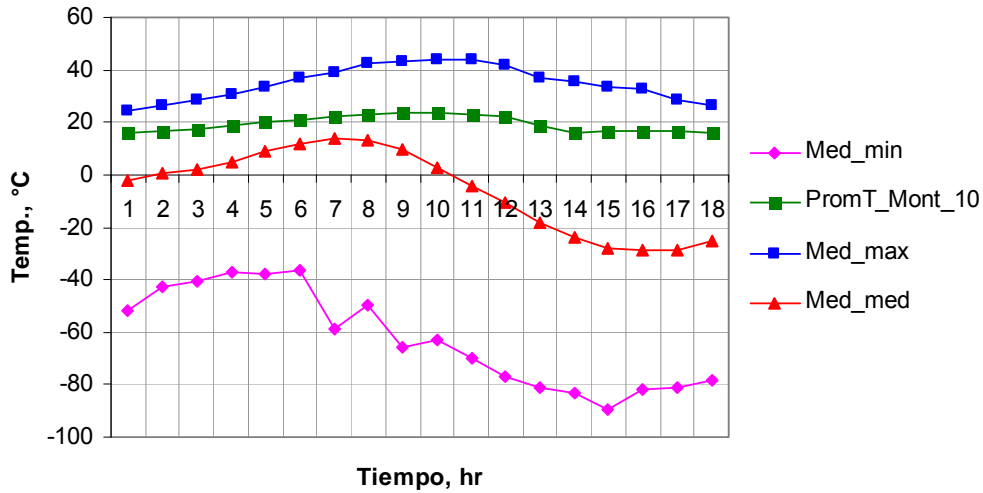


Figura 4.7.- Curvas de temperaturas promedio, tormentas moderadas

Donde: PromT_Mont_10= Temperatura promedio en superficie, tormentas moderadas
 Med_min/max/med= Temperaturas promedio de brillo mínimas, máximas y promedios asociadas a tormentas moderadas.

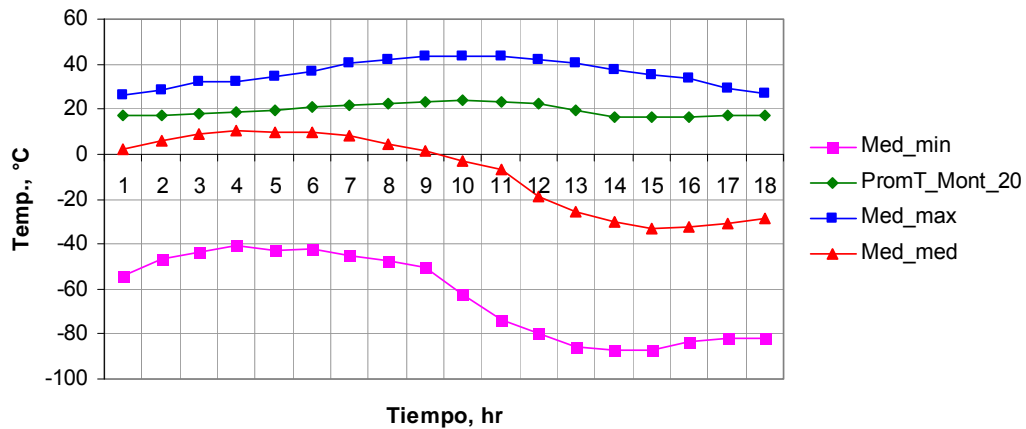


Figura 4.8.- Curvas de temperaturas promedio, tormentas fuertes

Donde: PromT_Mont_20= Temperatura promedio en superficie, tormentas fuertes
 Med_min/max/med= Temperaturas promedio de brillo mínimas, máximas y promedios asociadas a tormentas fuertes.

4.4 Resultados

Con base en los resultados anteriores se realizó la extracción de información sobre imágenes IR para los mismos grupos de tormentas en estudio (moderadas y fuertes), esto de acuerdo a cada una de las regiones influenciadas por las EMA's localizadas en la zona montañosa. La delimitación de estas regiones parciales se llevo a cabo de acuerdo a los siguientes criterios: las fronteras oriente y poniente de cada una de las regiones parciales corresponden a los bordes oriente y poniente de la zona montañosa,

las divisiones transversales entre cada EMA son líneas aproximadamente perpendiculares al litoral trazadas a las distancias centrales entre EMA's.

En los casos de las estaciones en los extremos (Baseeachi y Chinatú) los límites externos regionales y transversales a la zona montañosa se encuentran en sus respectivas distancias medias interiores. Estas condiciones son indiscriminadas ya que la finalidad de este segundo ensayo fue obtener resultados con menor dispersión entre clases de temperaturas, sujetos a áreas de influencia asociadas a las estaciones en superficie. La distribución de las regiones de muestra en el mapa de la figura 4.9.

En este contexto se procedió a llevar a cabo el procedimiento descrito del análisis en la zona de montaña para la obtención de los conjuntos de mapas térmicos parciales montañosos asociados a los casos de estudio de tormentas medidas en superficie. Las condiciones en superficie para cada una de las estaciones también se llevaron a cabo. Enseguida se presentan los resultados de los análisis de acoplamientos efectuados entre los datos registrados en superficie y los de imágenes de satélite.

4.4.1 Observaciones generales: Tormentas fuertes (rango 20-50), zona montañosa.

A partir del análisis de los coeficientes de correlación sobre las series de temperaturas en superficie y las series de temperaturas de brillo (máximas, mínimas y promedio) de las respectivas imágenes infrarrojas, ambas asociadas a la muestra de tormentas fuertes obtenidas 12 horas previas a la ocurrencia de lluvia en la zona de montaña, se encontró lo siguiente:

1.- Los coeficientes de correlación correspondientes a temperaturas de brillo mínimas (más frías) y temperaturas promedio en superficie, únicamente cuatro de las tormentas presentaron valores entre ± 0.6 y 1.0 es decir que solamente el 40% de la muestra guarda estrecha relación entre estas temperaturas pero no es significativa para el análisis, como se observa en la figura 4.10,a. El valor promedio de correlación para las cuatro tormentas es de -0.821 .

2.- Con respecto a los coeficientes r entre temperaturas de brillo máximas (más cálidas) y temperaturas promedio en superficie se observó que el 80% de tormentas de la muestra tuvo valores entre ± 0.6 y 1 . Este comportamiento resulta muy importante e implica una fuerte relación entre tales valores, como se observa en la figura 4.10,b. El valor promedio de correlación para las ocho tormentas es de 0.835 .

3.- El 40% de las tormentas de la muestra presentó valores entre temperaturas de brillo medias y temperaturas promedio en superficie oscilando en el rango ± 0.6 y 1 . Lo cual significa que no hay buena relación entre tales variables, como se observa en la figura 4.10,c. El valor promedio de correlación para las cuatro tormentas es de -0.772 .

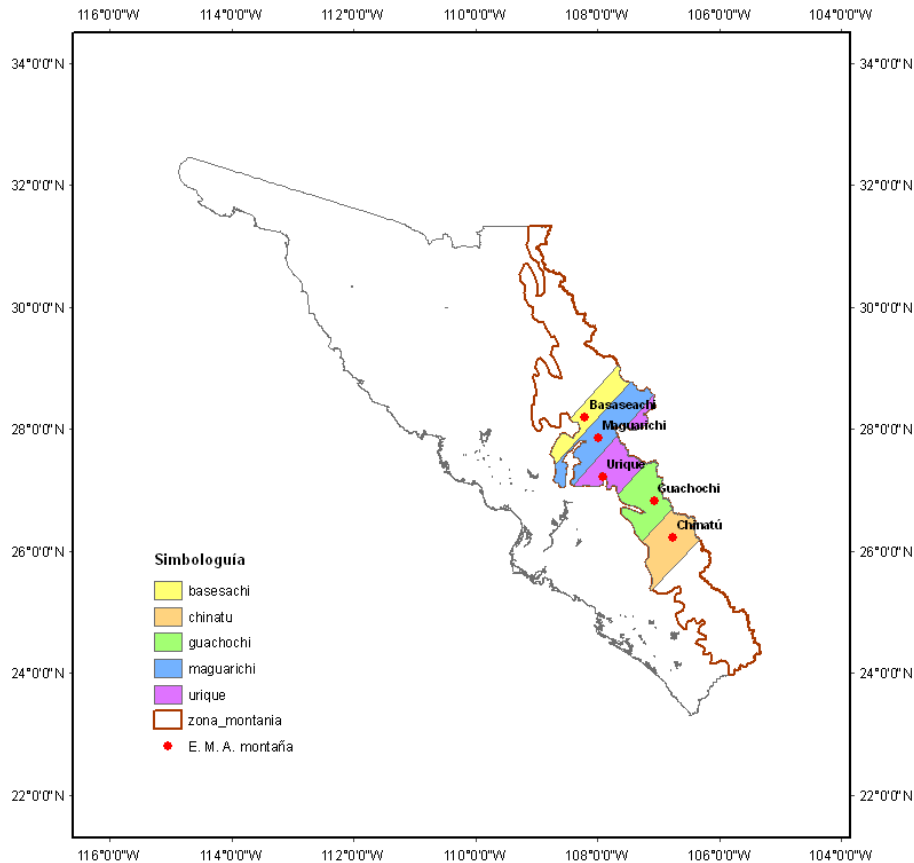


Figura 4.9. Cobertura de las regiones parciales dentro de la zona de montaña

A partir de estos resultados, la relación más representativa para las tormentas de la muestra se dio entre las temperaturas promedio en superficie y las temperaturas de brillo máximas correspondientes. Sin embargo no se obtuvo una marcada diferencia entre los coeficientes r obtenidos en la zona de montaña extensa y aquellos para las regiones parciales relativas a las EMA's.

Con el objetivo de evaluar en mayor detalle la relación encontrada entre temperaturas de superficie y temperaturas de brillo máximas fueron determinados los siguientes parámetros: diferencias entre temperaturas de superficie y satélite Δ_{ssi} , gradientes de evolución entre estas diferencias δ_{ssi} , gradiente interno de evolución entre las temperaturas de satélite δ_{sat_i} y gradiente interno de evolución entre las temperaturas de superficie δ_{sup_i} . Estos parámetros se obtuvieron a partir de las respectivas series horarias tanto para la zona de montaña como para las zonas de influencia de las estaciones automáticas comprendidas dentro de ella y utilizando las series de temperaturas de brillo máximas correspondientes.

Las curvas de δ_{ssi} para cada región parcial del estudio mostraron valores menores en las ordenadas que aquellas correspondientes a la curva de Δ_{ssi} (figura 4.11), es decir que la reducción de áreas de influencia interviene claramente en la reducción de las diferencias de ambos tipos de temperaturas. Esto se evidenció al obtener una disminución desde los -15.14°C promedio en la zona de montaña, a -6.92°C promedio en las zonas parciales de montaña. Además, las curvas δ_{ssi} mostraron que en las 3 horas previas a la ocurrencia

de la lluvia los valores Δs_{si} (diferencias entre las temperaturas de sat y sup) son insignificantes. Es decir que los resultados entre las curvas Δs_{si} y las series de δs_{si} fueron consistentes. En conjunto, estos parámetros evaluados demostraron la mejoría en las dispersiones entre ambas mediciones de temperaturas al considerar las áreas parciales para cada una de las estaciones en lugar de la zona extensa de montaña.

Con base en los valores Δs_{si} (diferencias de temperaturas de brillo máximas y temperaturas medias en superficie) medidas por cada una de las áreas parciales inscritas en la zona de montaña en un periodo de 12 horas previas a la ocurrencia de la lluvia fueron determinadas las dispersiones con respecto a las mediciones obtenidas sobre la zona de montaña completa. Se encontró que efectivamente al reducir espacialmente las áreas de estudio se obtienen importantes disminuciones entre ambos tipos de temperaturas, sin embargo aunque las reducciones no son constantes a lo largo del tiempo estas comienzan en 20% aproximadamente y a partir del instante 10, en todos los casos de regiones parciales, las diferencias en la aproximación a la hora de lluvia disminuyen en promedio un 80% lo cual se presenta en la figura 4.12. Es decir que las temperaturas son idénticas en alto grado en este lapso. Se concluye por lo tanto que relacionando el área de influencia a la estación de medición se obtiene gran disminución sobre las dispersiones entre clases de temperaturas y por ende el empleo de las mediciones meteorológicas en superficie es significativamente más confiable.

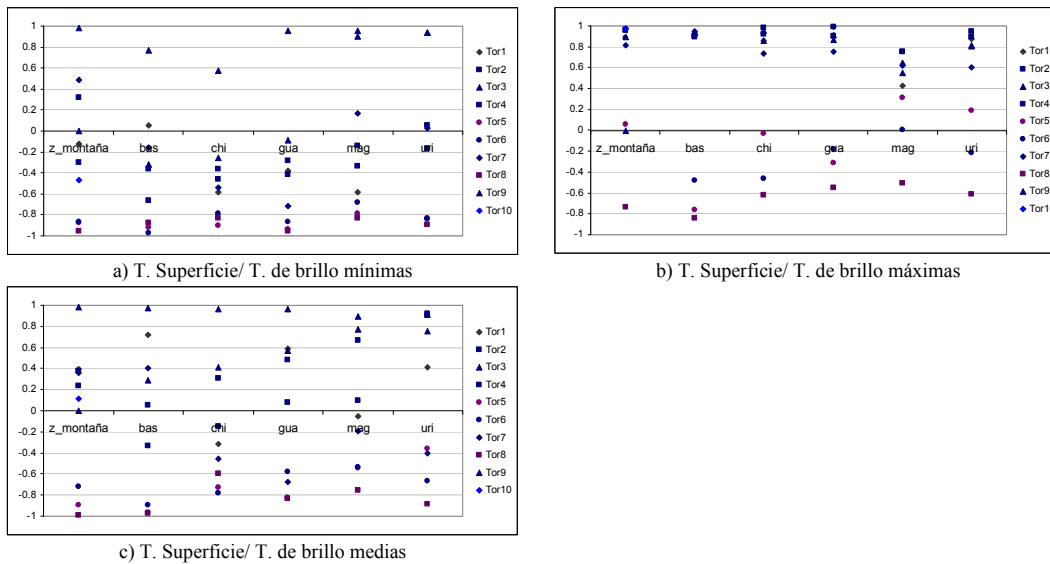


Figura 4.10. Coeficientes de correlación temperaturas sup-satélite en zona montaña y zonas parciales, tormentas fuertes.

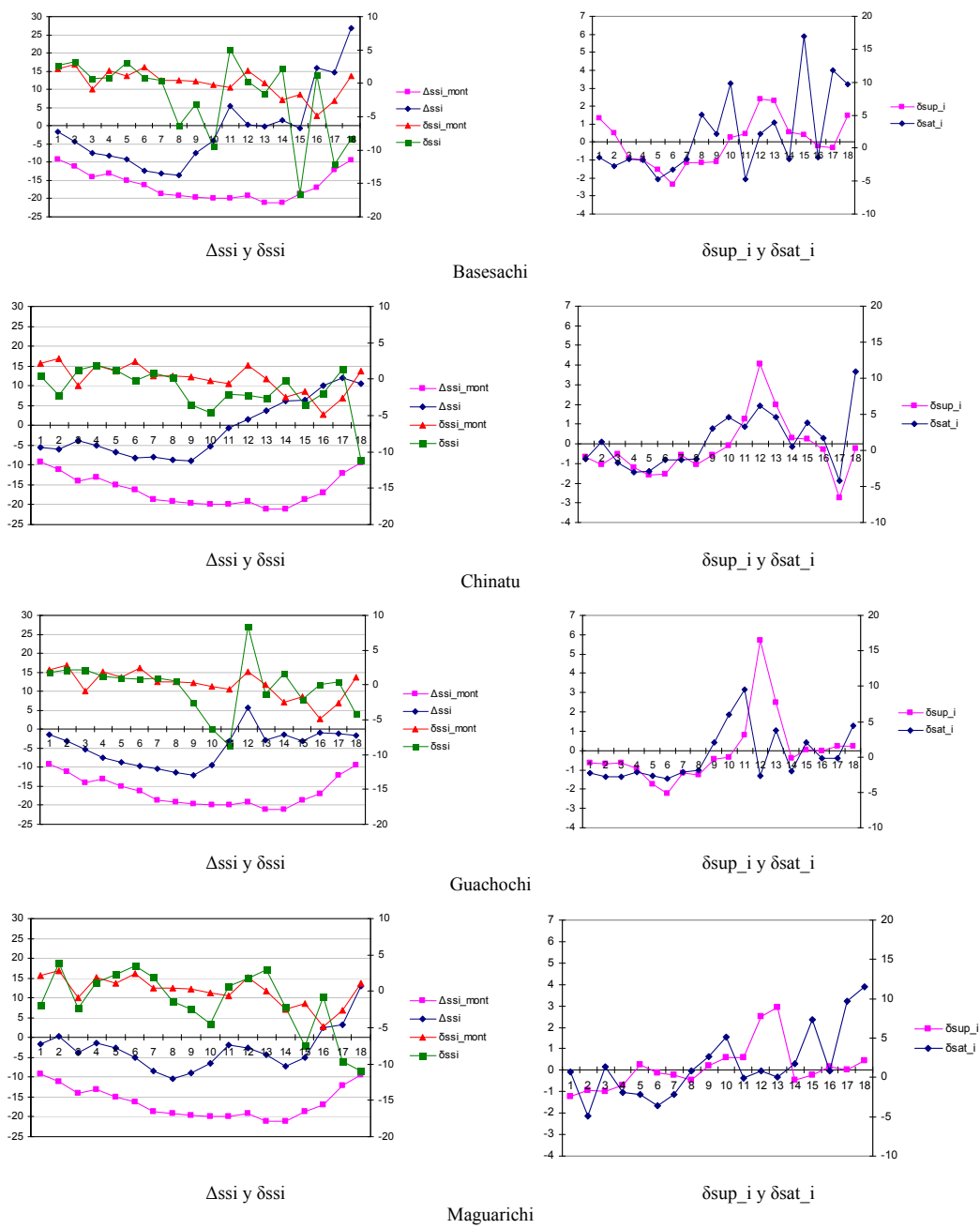


Figura 4.11. Curvas Δssi (diferencias de temp entre sup y sat) y curvas δssi (cambios propios de las diferencias en el tiempo), tormentas fuertes. Curvas δsat_i (evolución de los cambios de temperaturas en sat) y curvas δsup_i (evolución de los cambios de temperaturas en sup), zona montaña y zonas parciales, tormentas fuertes.

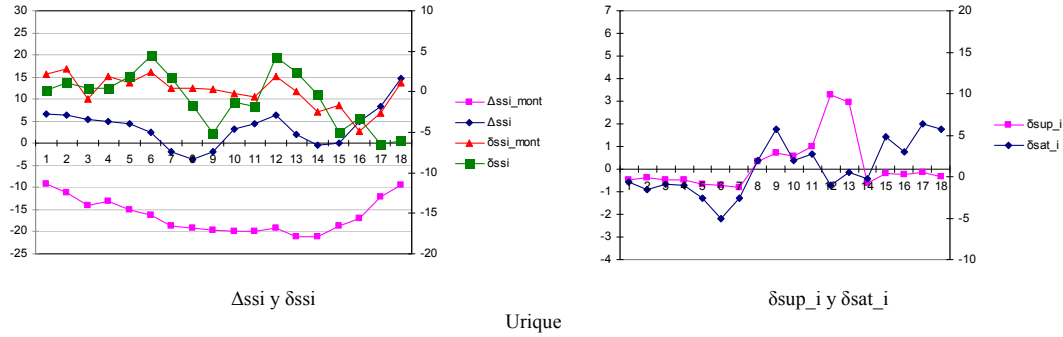


Figura 4.11. Curvas Δ ssi (diferencias de temp entre sup y sat) y curvas δ ssi (cambios propios de las diferencias en el tiempo), tormentas fuertes. Curvas δ sat_i (evolución de los cambios de temperaturas en sat) y curvas δ sup_i (evolución de los cambios de temperaturas en sup), zona montaña y zonas parciales, tormentas fuertes. Continuación

4.4.2 Observaciones generales: Tormentas moderadas (rango 10-20), zona montañosa.

Se llevaron a cabo los análisis entre los mismos pares de temperaturas registradas en superficie y por satélite, tal como en el caso anterior pero en esta ocasión sobre las tormentas moderadas. A continuación se presentan los hallazgos:

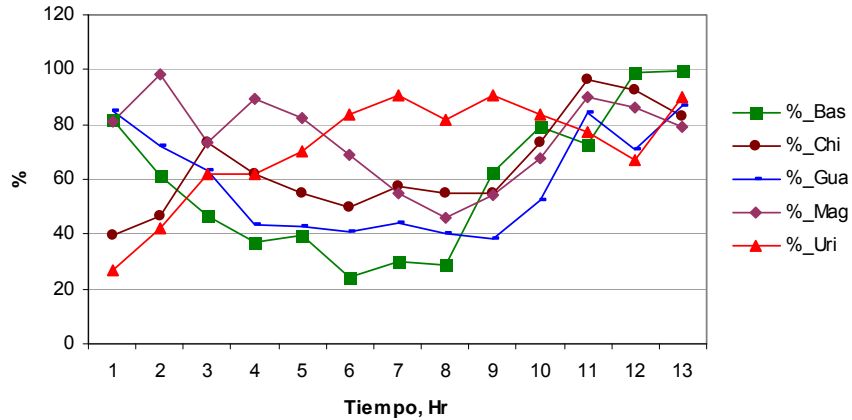


Figura 4.12. Curvas de porcentajes de reducción entre temp sup y sat, zona montaña y zonas parciales. (Zona montaña, pivote), tormentas fuertes.

1.- Los coeficientes de correlación correspondientes a temperaturas de brillo mínimas (más frías) y temperaturas promedio en superficie, únicamente cuatro de las tormentas presentaron valores entre ± 0.6 y 1.0 , es decir que solamente el 40% de la muestra guarda estrecha relación entre estas temperaturas pero no es significativa para el análisis. Lo cual se muestra en la figura 4.13 a. El valor promedio de correlación para las cuatro tormentas es de -0.722 .

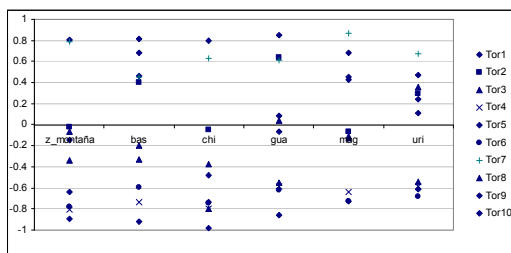
2.- Con respecto a los coeficientes r entre temperaturas de brillo máximas (más cálidas) y temperaturas promedio en superficie se observó que el 80% de tormentas de la muestra tuvo valores entre ± 0.6 y 1 . Este comportamiento resulta muy importante e

implica una fuerte relación entre los valores, lo cual se muestra en la figura 4.13 b. El valor promedio de correlación para las ocho tormentas es de -0.812.

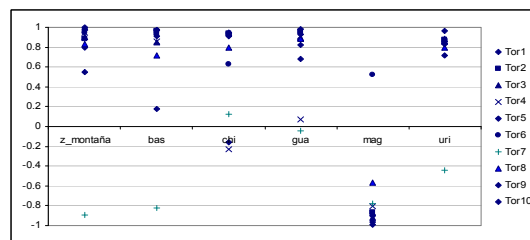
3.- El 40% de las tormentas de la muestra presentó valores de correlación oscilando en el rango ± 0.6 y 1 entre temperaturas de brillo medias y temperaturas promedio en superficie. Lo cual significa que no hay buena relación entre tales variables y se muestra en la figura 4.13 c. El valor promedio de correlación para las cuatro tormentas es de 0.724.

Se observó que los mejores coeficientes de correlación entre los grupos de variables descritas nuevamente correspondieron a la relación entre temperaturas promedio en superficie y temperaturas de brillo máximas, hecho consistente con el caso de estudio anterior para tormentas fuertes. Por lo tanto se procedió con el análisis específico de los parámetros internos del grupo de series en cuestión, al igual que se hizo para las tormentas fuertes.

A partir de los parámetros obtenidos se observa que se cumple la mejoría de aproximación entre los dos tipos de temperaturas al reducir la zona de estudio en zonas de influencia parciales para cada estación meteorológica automática ya que se obtuvo una disminución desde -14.05°C promedio en la zona de montaña, a -5.82°C promedio en las zonas parciales de montaña como se observa en la figura 4.15. Sin embargo a diferencia del caso de tormentas fuertes, las primeras tres horas previas a la lluvia las temperaturas en superficie y las de satélite aún difieren alrededor de cinco grados de temperatura ente si, donde para los instantes similares en tormentas fuertes las diferencias fueron casi insignificantes. Por otro lado, en relación a los valores de las curvas Δssi (series de diferencias entre temperaturas sup y sat) para la zona de montaña (figura 4.15), se encontró que en promedio los valores Δssi correspondientes a las zonas parciales alcanzaron una mejoría del 70% promedio aproximadamente, que se presenta en la figura 4.16. Se debe precisar que las disminuciones instante a instante presentan variaciones a lo largo de las 12 horas de estudio. Este comportamiento también muestra que las condiciones atmosféricas previas a la lluvia, correspondiente a las tormentas fuertes, presentan ligeramente mejores patrones entre ambas mediciones (superficie y satélite), la mejoría promedio encontrada es del 10% aproximadamente.

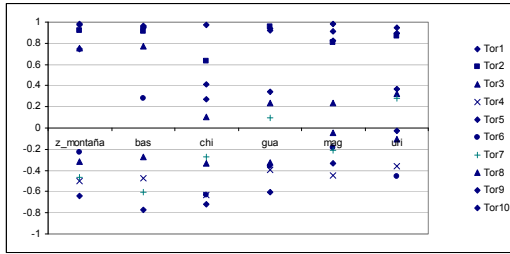


T. Superficie/ T. de brillo mínimas



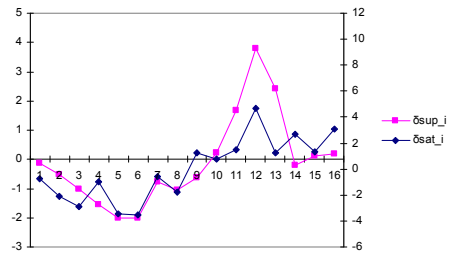
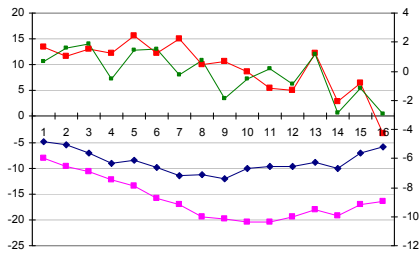
T. Superficie/ T. de brillo máximas

Figura 4.13. Coeficientes de correlación temperaturas sup-satélite en zona montaña y zonas parciales, tormentas moderadas.

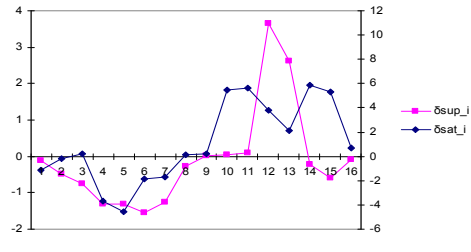
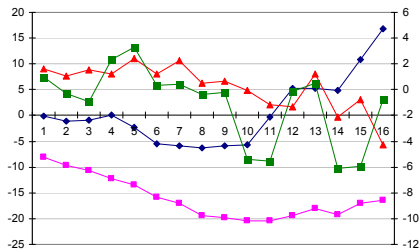


T. Superficie/ T. de brillo medias

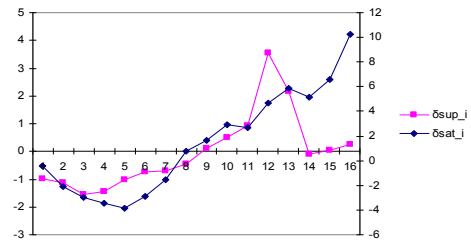
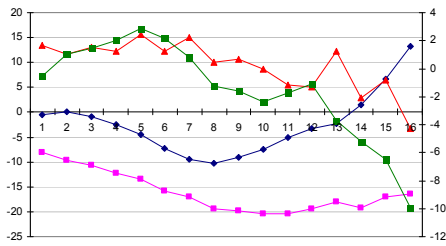
Figura 4.13. Coeficientes de correlación temperaturas sup-satélite en zona montaña y zonas parciales, tormentas moderadas. Continuación



Basesachi

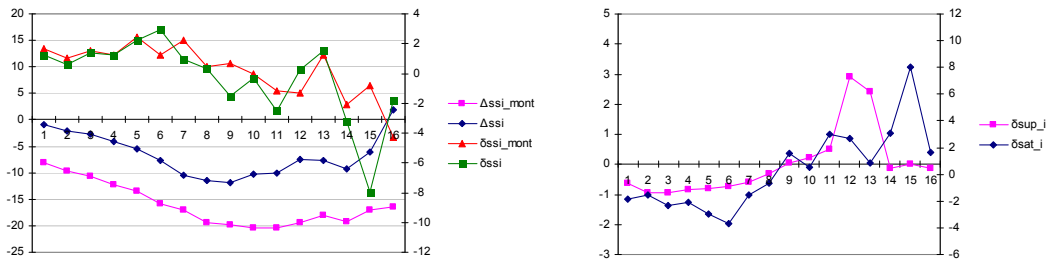


Chinatu

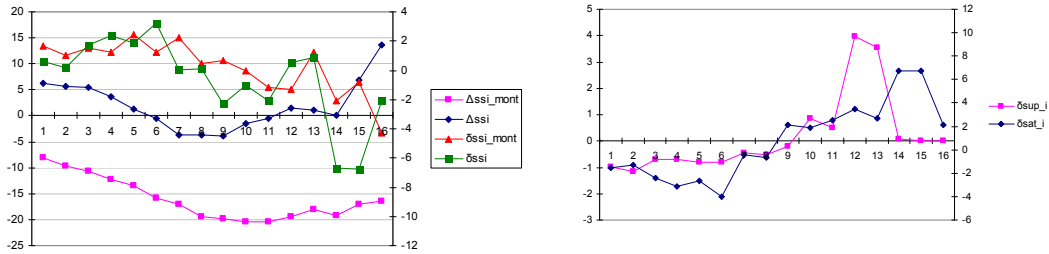


Guachochi

Figura 4.14. Curvas Δssi (diferencias de temp entre sup y sat) y curvas δssi (cambios propios de las diferencias en el tiempo), tormentas fuertes. Curvas δsat_i (evolución de los cambios de temperaturas en sat) y curvas δsup_i (evolución de los cambios de temperaturas en sup), zona montaña y zonas parciales, tormentas moderadas.



Maguarichi



Urique

Figura 4.14. Curvas Δssi (diferencias de temp entre sup y sat) y curvas δssi (cambios propios de las diferencias en el tiempo), tormentas fuertes. Curvas δsat_i (evolución de los cambios de temperaturas en sat) y curvas δsup_i (evolución de los cambios de temperaturas en sup), zona montaña y zonas parciales, tormentas moderadas. Continuación

También fueron realizados análisis sobre las tendencias δsup_i (cambios en el tiempo de las series de datos en superficie) así como δsat_i (cambios en el tiempo de las series de datos obtenidas de satélite, temperaturas de brillo máximas). Con respecto a las tormentas fuertes de la figura 4.11, las curvas δsup_i y δsat_i para cada una de las zonas parciales y la zona de montaña mostraron alineamientos muy similares, en especial para las primeras 9 horas de las series.

En el caso de tormentas moderadas de la figura 4.16, la gran concordancia se presentó en las primeras 10 horas de las series. En este contexto, los C_v calculados sobre las series de temperaturas en superficie y satélite en tormentas fuertes obtenidas en las zonas parciales guardan una diferencia de -0.066 unidades en promedio, una desviación de 0.042 y con un factor de proporción 2 entre C_v de aproximadamente para ambas mediciones. En relación a las tormentas moderadas, estos C_v calculados mostraron una diferencia promedio de -0.078 unidades, 0.064 de desviación estándar y un factor de proporción entre C_v de aproximadamente 1.76. Valores calculados para las zonas parciales.

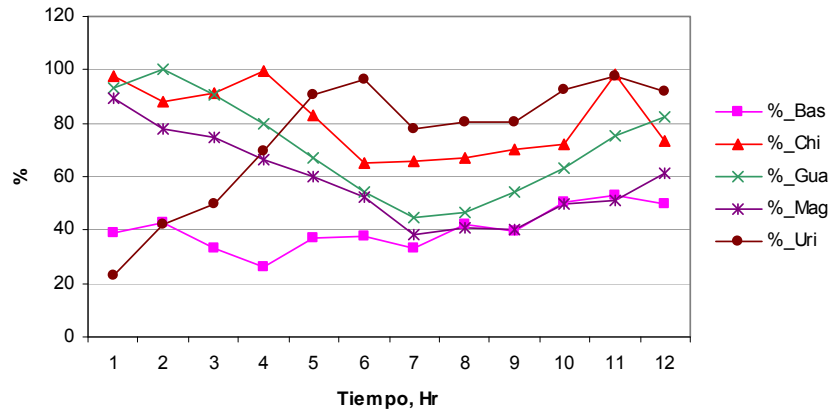


Figura 4.15. Curvas de porcentajes de reducción entre temp sup y sat, zona montaña y zonas parciales. (Zona montaña, pivote), tormentas moderadas.

De acuerdo a estos datos, las variaciones en el tiempo de δ_{sup_i} y δ_{sat_i} poseen tendencias con gran similitud para los dos tipos de tormentas analizadas, Cv con alta aproximación entre las series como se demostró. No obstante las curvas δ_{sup_i} y δ_{sat_i} para las tormentas moderadas se aproximan mejor entre ellas, debido a que la inestabilidad en las condiciones atmosféricas es menor que el estado de la dinámica atmosférica relacionado con tormentas fuertes. En ambos casos, alrededor de la hora número 10 los valores de las curvas δ_{sup_i} y δ_{sat_i} son drásticos a diferencia del comportamiento gradual en las horas anteriores, lo cual se debe a la cercana ocurrencia de la precipitación.

Los altos coeficientes de correlación encontrados entre las series de temperaturas medidas en superficie y las series de temperaturas máximas de brillo tanto para los rangos de tormentas fuertes y moderadas focalizadas sobre las áreas parciales de montaña, las diferencias de entre los cambios internos en las series (δ_{sup_i} y δ_{sat_i}), y las diferencias entre ambas series de temperaturas (Δ_{ssi}), tales resultados en conjunto representan la señal de lluvia a través de diferentes dispositivos de medición, y con un margen muy cercano entre ambos tipos de datos tal como se demostró. Este especial comportamiento permite el empleo de uno u otro sistema de medición para la observación y estimación de la ocurrencia del fenómeno, obteniendo alta certidumbre.

En este sentido, la disponibilidad de mediciones meteorológicas en superficie es en mayor grado accesible que las mediciones indirectas a partir de imágenes de satélite, en tiempo real. Por lo cual los patrones de 12 horas de temperaturas promedio previas a la ocurrencia de lluvia, cobertura nubosa de parcial a completa, y las ecuaciones de las tendencias de humedad relativa, relacionadas a cada una de las EMA's empleadas en este estudio son herramientas que pueden emplearse exitosamente en la estimación de la ocurrencia de tormentas fuertes y moderadas en los meses de julio dentro de las zonas parciales montañosas. La correlación entre temperaturas y humedades relativas es 0.996 y 0.989 respectivamente a las tormentas moderadas y fuertes. Estas ecuaciones se presentan en las figuras 4.16 y 4.17.

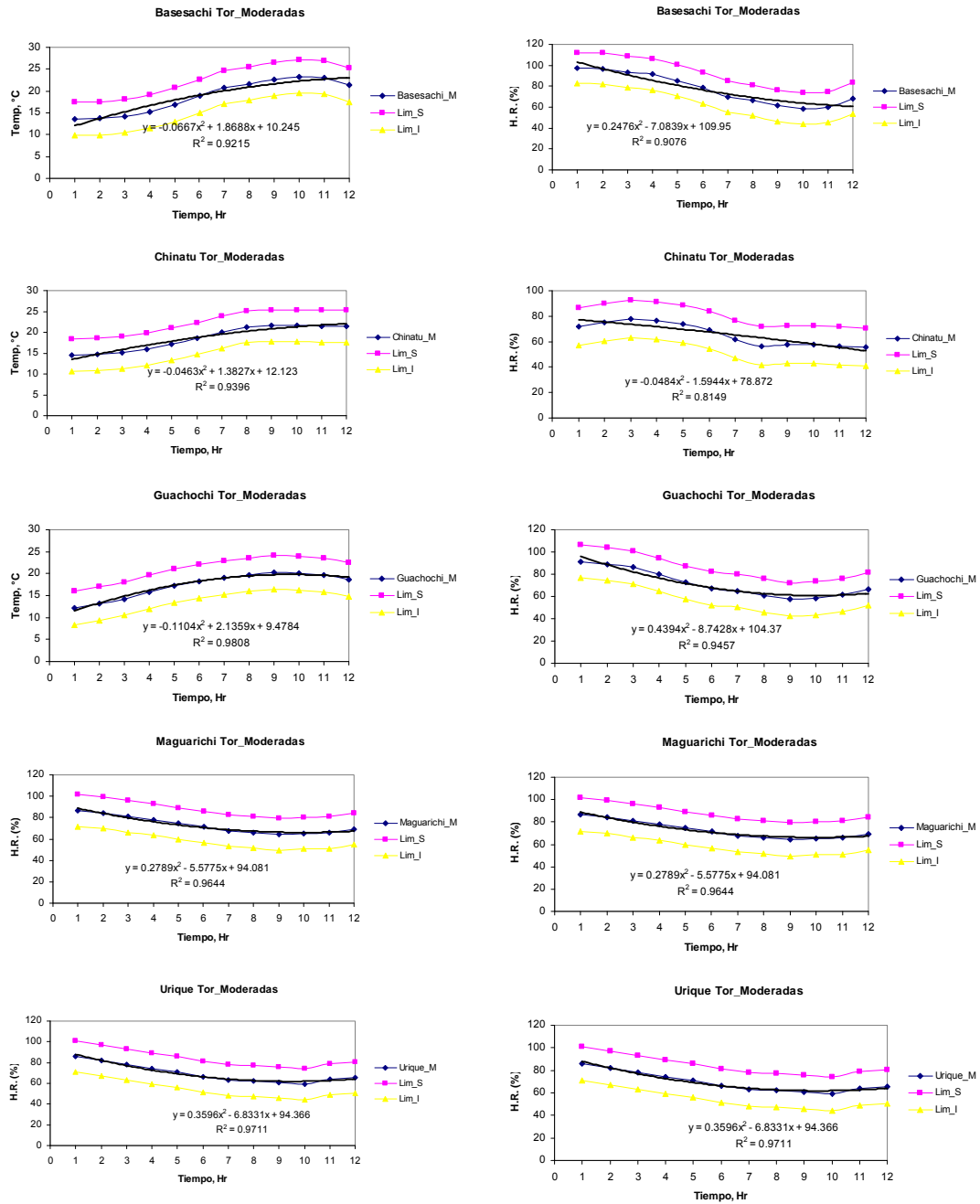


Figura 4.16. Ecuaciones de los patrones de temperaturas y de humedades relativas en superficie, 12 horas previas. Tormentas moderadas.

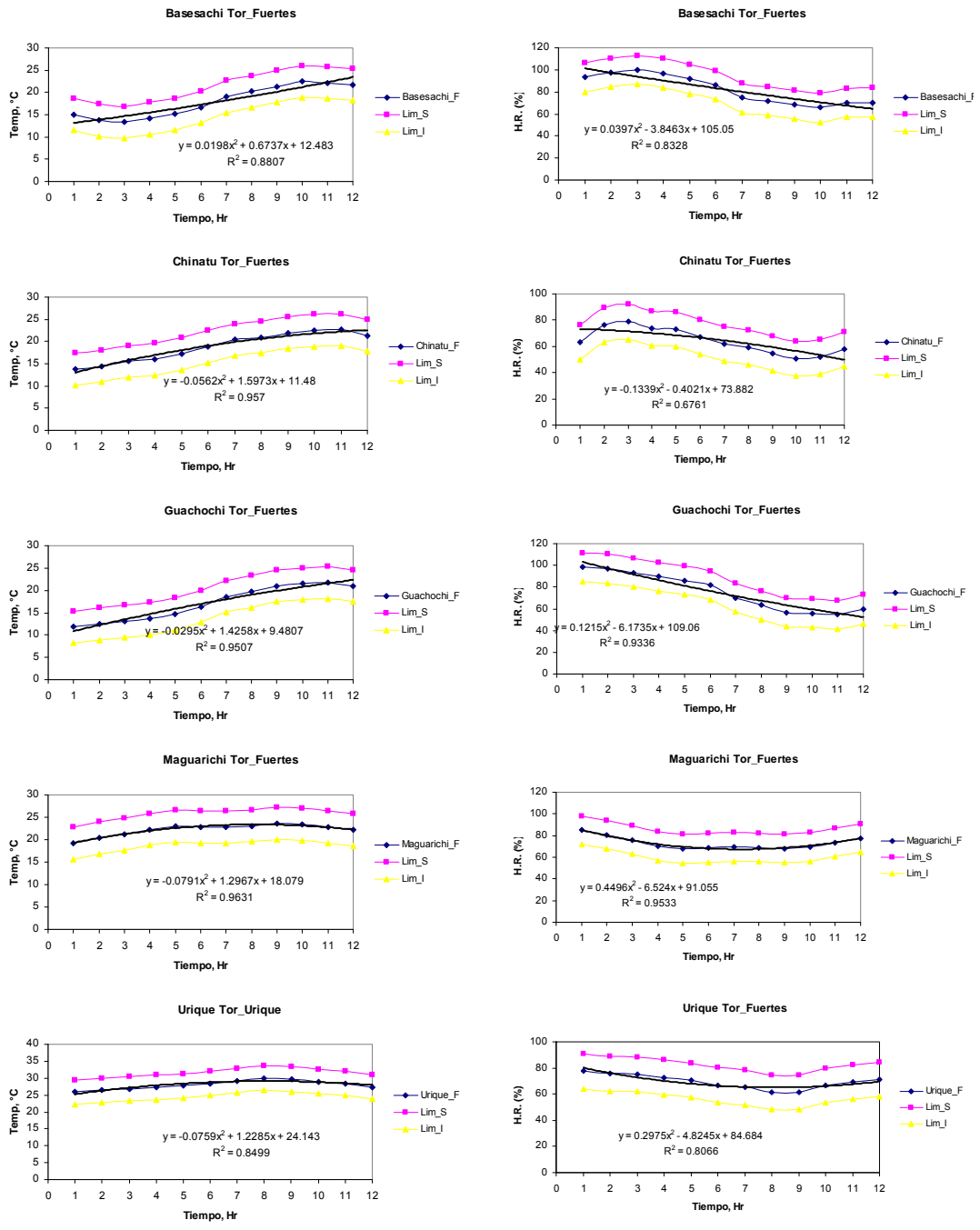


Figura 4.17. Ecuaciones de los patrones de temperaturas y de humedades relativas en superficie, 12 horas previas. Tormentas fuertes.

4.4.3 Aplicación de patrones de temperaturas en la estimación del rango de lámina de lluvia

Con el propósito de mostrar el ajuste de los patrones de temperaturas y humedades relativas antecedentes obtenidos para la estimación del rango de precipitación en las diferentes regiones de estudio fueron seleccionadas tormentas que no fueron incluidas en el análisis con imágenes de satélite, que además estén conformadas dentro de la muestra de tormentas registradas por las EMAS. De esta manera se extrajeron los registros de 2 tormentas registradas por la EMA Basesachi, y se graficaron los valores de temperaturas de 12 horas previas a los eventos de lluvia sobre las curvas de tendencia promedio y límites estimados de temperaturas de Basesachi. Se procedió de la misma manera con los datos de humedades relativas. Los valores de la tormenta 05/07/2000 ajustaron en un 90% a las tendencias antecedentes en cuestión. En el caso de la tormenta 22/07/2001 el ajuste fue de 75%.

Tabla 4.7. Tormentas de prueba de tendencias antecedentes

Tormenta	Lamina, mm
05/07/2000 22:40 - 23:20	37.58
22/07/2001 00:20 - 01:20	27.92
04/07/2004 20:10 - 21:30	20.05

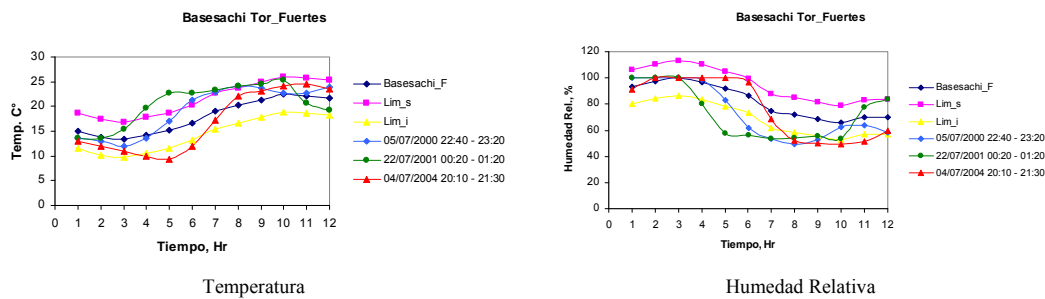


Figura 4.18. Curvas de los patrones de temperaturas y de humedades relativas en superficie, tormentas de prueba

Los ajustes encontrados son aceptables dentro del contexto de una primera aproximación del estudio realizado. Estos resultados indican que las variables de temperatura y humedad relativa de estas tormentas efectivamente presentan patrones de comportamiento correspondientes a eventos de lluvia en el rango de tormentas fuertes de 20 mm a 50 mm, obtenidos de una manera sencilla, con base en registros en superficie, con antelación de 12 horas.

Por otro lado, se seleccionó una tercera tormenta con la finalidad, adicional a la mencionada anteriormente, para realizar una comparación entre la estimación de la precipitación basada en imágenes IR con la estimación indirecta a través de las tendencias antecedentes. Esta tormenta se denominó 04/07/2004. Sus variables Temp y HR se graficaron sobre las curvas de las tendencias y el ajuste observado es del 75%.

La estimación de lluvia basada en imágenes IR para esta misma tormenta se realizó de acuerdo al procedimiento descrito en Arellano L. et al. (2010), correspondiente a una adecuación-simplificación del método auto estimador (Vicente et. al,1998). En la figura

4.19 se presenta la lluvia estimada para la zona-montaña y el detalle de la distribución espacial de lluvia en la sección de Basesachi.

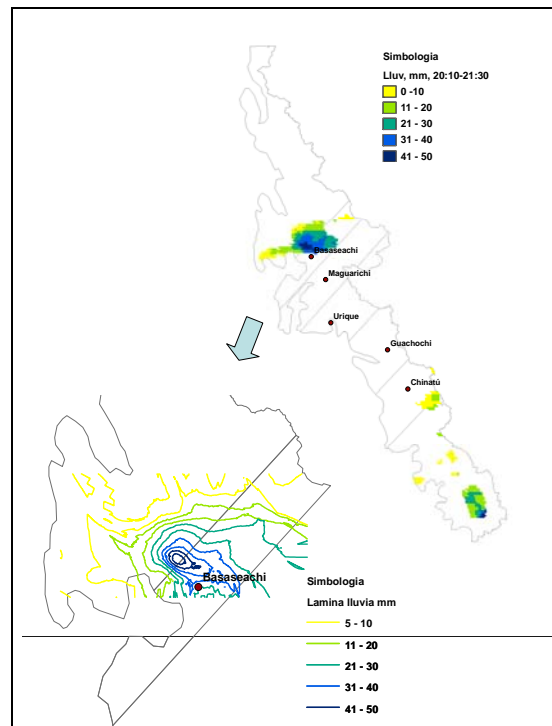


Figura 4.19. Distribución espacial de lluvia estimada para la tormenta 04/07/2004

Capitulo 5

Conclusiones

5.1. Conclusiones del apartado “Aspectos básicos sobre los mecanismos generadores de lluvia”

La distribución temporal y espacial de las precipitaciones constituyen datos básicos y de gran importancia en problemas de la hidrología, en consecuencia, el conocimiento de la génesis y características de la misma también son determinantes.

Los principales tipos de precipitación debidos a los diferentes mecanismos de enfriamiento de las masas de aire (convectivo, frontal y orográfico) son capaces de originar desde fenómenos ligeros de lluvia (llovizna) hasta fuertes tormentas, de los cuales dependerán las respuestas de las cuencas.

La ubicación muy cercana de México a la zona intertropical de convergencia, así como la presencia de las cadenas montañosas en toda su longitud, favorecen la formación de los distintos tipos de precipitación y su distribución, por ejemplo en verano y principios de otoño las lluvias se deben comúnmente a la convección, fenómenos que dejan a su paso fuertes escurrimientos en ambos litorales del país, mientras que a finales de otoño y en invierno adquieren mayor importancia las lluvias de tipo frontal las cuales afectan en mayor medida la zona norte-centro. Esto refuerza la necesidad de identificar el tipo

de precipitación, así como, los mecanismos que la originan en general (también responsables de las características de los eventos), para aumentar la confiabilidad de las aplicaciones hidrológicas.

En este contexto, la investigación se enfocó al estudio de la precipitación debida a los sistemas convectivos de mesoescala, fenómenos generadores del mayor volumen de lluvias en el país.

5.2 Conclusiones del apartado “Conformación de regiones de precipitación homogéneas con base en el análisis multivariado”

En esta etapa de la investigación se realizó un estudio regional multivariado llevado a cabo sobre el noroeste de México, en la zona conformada por las regiones hidrológicas No. 8, No. 9 y No. 10, que representa la zona de estudio. Dentro de esta región tiene lugar el monzón mexicano, fenómeno de gran variabilidad espacial así como de relevancia para esta porción del país. En el estudio fueron empleadas 424 estaciones de medición distribuidas a lo largo de la región con 42 años registros. En este trabajo el área de influencia es ampliada, así como el número de los casos de estudio de las investigaciones previas, las cuales fueron enfocadas a la determinación de regiones hidrológicamente homogéneas sobre la región hidrológica No10 ubicada en el noroeste de México (Escalante, 1998; Brito-Castillo et al., 2002; 2003; Gutiérrez et al., 2004; Gochis et al., 2005). También se propone una nueva metodología alternativa basada en la aplicación de técnicas multivariadas (orientadas a las variables) y estadísticas, las cuales en conjunto representan un beneficio tangible en la delimitación de las regiones de precipitación homogéneas a lo largo de la zona de estudio caracterizada por su alta variabilidad climática espacial y temporal, que además considera el factor orográfico.

Las principales aportaciones de este trabajo se mencionan a continuación:

- El empleo indiscriminado de un gran conjunto de variables no asegura un resultado robusto en las agrupaciones de los casos. En este estudio se demostró que la selección de variables a priori con base estadística permite resultados de agrupaciones con tendencia a la estabilidad.
- Se presentó la matriz de variables relevantes basadas en información de precipitación y adicionada con datos cartográficos, aplicada a un análisis CJA permitió la obtención de regiones de precipitación homogéneas que preservan la relación meteorológica y orográfica (representación física) efectivamente.
- El análisis multivariado ACJ basado en las variables resultantes de la optimización de aquellas correspondientes a los coeficientes de variación convencionales, es decir las variables asociadas a los coeficientes de variación lineales (escenario Análisis Final) no requirió de la reducción de variables mediante ACP. Esto debido a las propiedades inherentes del los Cv lineales.
- La simulación ACJ realizada con el escenario L-Cv condujo al posicionamiento estable de las unidades de medición (estaciones climatológicas), es decir que las estaciones que durante el resto de las simulaciones previas pasaban de una región adyacente a otra finalmente quedaron en su posición adecuada, sin

cambio. Geográficamente estas estaciones se localizaron en zonas muy cercanas a las fronteras donde tuvieron lugar cambios bruscos en el relieve, lo cual se comprobó mediante la superposición gráfica de los grupos de estaciones con el relieve de la región de estudio.

5.3 Conclusiones del apartado “Estudio de sistemas de tormentas con base en imágenes satelitales”

La identificación de tormentas con base en imágenes de satélite proporciona un horizonte completo para la realización del análisis espacio-temporal del fenómeno, lo cual a su vez, al ser aplicado sobre la modelación hidrológica implica la optimización de los resultados. Esto es debido al mejor conocimiento del proceso en sí mismo.

Por otro lado, la identificación de las tormentas, su desarrollo y la precipitación que llegase a generar, calculada por una o varias de las técnicas mencionadas, representan entonces datos invaluable que permiten aumentar la misma confiabilidad de los pronósticos de lluvia y control de inundaciones.

La metodología descrita utilizada en la caracterización de las tormentas basada en imágenes de satélite, a través del procesamiento basado en la aplicación de la Curva Estandar de la NOAA, el realce de colores de las nubes frías, así como la parametrización de las tormentas, constituyó una técnica sencilla de implementar sistemáticamente. La cual proporcionó resultados valiosos en cuanto al desarrollo de las tormentas.

La muestra de tormentas parametrizadas presentó fusiones de núcleos convectivos durante los respectivos desarrollos de estos fenómenos. El ejemplo presentado para la tormenta 07/07/04 mostró este comportamiento a través de los saltos bruscos en las gráficas. Las fusiones de tormentas de menor intensidad a una tormenta establecida le proporcionan mayor energía a la tormenta prolongando su tiempo de vida.

Los parámetros obtenidos a lo largo del desarrollo de la tormenta ejemplo (áreas de cobertura nubosa y ejes mayores y menores) permitieron el reconocimiento de las etapas de desarrollo del fenómeno en la curva de evolución de la cobertura nubosa asociada con las temperaturas de las nubes frías, hecho de gran relevancia en el estudio de estos fenómenos y con gran potencial de ser migrado hacia la prevención de inundaciones. Fueron observadas las siguientes características en la curva: una pendiente gradual inicial, crecimiento súbito de la pendiente, un nuevo periodo de crecimiento gradual y el descenso de la pendiente en esta curva. Tales propiedades fueron preservadas también en la curva del desarrollo de los ejes (mayor y menor) de la cobertura nubosa. En este sentido, ambos parámetros demostraron ser robustos en la caracterización de la tormenta.

La aplicación de la técnica auto estimador (simplificada) para la determinación de lluvia con base en imágenes de satélite a la tormenta del caso de estudio, además de resultar relativamente sencilla de utilizar, expuso una muy buena aproximación de la estimación lluvia comparada con la medición en superficie.

En relación a lo anterior se alcanzaron los propósitos primordiales de esta sección de la investigación, que son presentar una metodología encaminada hacia la caracterización de tormentas basada en imágenes de satélite, obtener información de las temperaturas de brillo de las coberturas nubosas, lo cual constituyó el insumo para el desarrollo de la siguiente fase en la investigación. Finalmente también se comparó en una primera aproximación la certeza de la estimación de lluvia a partir de imágenes de satélite.

5.4 Conclusiones del apartado “Patrones climáticos antecedentes de tormentas”

La amplia extensión de zona_NAME implica importantes variaciones del relieve tanto en sentido longitudinal como transversal. Este comportamiento se vio reflejado en la comparación de los acoplamientos entre patrones meteorológicos antecedentes a tormentas basados en temperaturas superficiales promedio y temperaturas máximas de nubes frías obtenidas de imágenes de satélites, para 10 tormentas fuertes y 10 moderadas respectivamente. De acuerdo a que los mejores Cv entre tales series mencionadas fueron los más precisos resultando de 0.835 y -0.812 respectivamente a eventos fuertes y moderados. Para el acoplamiento fueron utilizadas las series de temperaturas promedio en superficie debido a que presentaron un alto coeficiente de correlación con los registros de humedades relativas de -0.996 y -0.989 mutuamente a tormentas moderadas y fuertes, así como también a que la variable obtenida de las mediciones satelitales era temperatura.

Se encontró que el Cv de variación promedio entre ambas tipos de series de tiempo fue de 0.835 para tormentas fuertes y de -0.812 sobre tormentas moderadas, despreciando extensiones superficiales. Sin embargo el empleo de las zonas de influencia para las estaciones meteorológicas en lugar de la zona de montaña, disminuyó notablemente las dispersiones entre las tendencias de estas temperaturas desde un 20% hasta un 80% cerca de la hora número 10 de las series de tiempo en tormentas fuertes, y hasta un 70% para el caso de tormentas moderadas. Lo cual se traduce en reducciones desde -15.14°C promedio a -6.92°C promedio para tormentas fuertes, aplicado a zona de montaña y a zonas parciales. En cuanto a tormentas moderadas las reducciones fueron de -14.05°C promedio a -5.82°C promedio también sobre la zona de montaña y zonas parciales respectivamente. Es decir que el acoplamiento de mediciones aplicado a las zonas de influencia derivó en una mejoría en las relaciones entre tales series. Estos resultados se observan en las curvas Δ_{ssi} y curvas δ_{ssi} , para tormentas fuertes y moderadas.

Otros parámetros empleados para evaluar el acoplamiento entre ambos tipos de temperaturas antecedentes fueron los valores de las curvas δ_{sup_i} y δ_{sat_i} donde la evolución de los cambios de temperaturas internas a cada una de las series mostró tendencias bastante semejantes en las primeras 9 horas de las series correspondientes a las tormentas fuertes y en las 10 horas iniciales a las respectivas series de tormentas moderadas. De esta manera la diferencia entre las series Cv de series de temperaturas promedio en superficie y series de temperaturas máximas de satélite es de 0.066 ± 0.04 promedio para tormentas fuertes y -0.078 ± 0.064 para tormentas moderadas.

De esta manera, demostrada la alta relación mostrada entre las series de temperaturas superficiales y de satélite antecedentes a la ocurrencia de lluvia, para eventos de tormentas fuertes como moderadas permite la aplicación de las tendencias en el tiempo

de temperaturas superficiales en combinación con las respectivas curvas de humedades relativas, también asociadas a las zonas de influencia de las EMA's, la estimación del potencial de lámina de precipitación durante los meses de julio aunado a un sistema de alerta en tiempo real con un horizonte de 12 horas de previsión. Estas ecuaciones se presentan de las curvas de la figura 5.17.

5.5 Conclusiones generales

En ésta investigación se desarrolló una metodología para la estimación del potencial de tormentas en la región del noroeste de México, con un tiempo de anticipación de 12 horas.

Se requirió obtener la delimitación de regiones homogéneas de precipitación para lo cual fue aplicada la combinación de las técnicas multivariadas de análisis de componentes principales y agrupación jerárquica ascendente.

Se obtuvieron tres regiones homogéneas de precipitación como son costa, media y montaña, la cuales están claramente asociadas a los patrones de precipitación y al relieve del terreno. Se encontró también que solamente el empleo de las variables de precipitación obtenidas con base en los coeficientes de variación de los momentos L, latitud, longitud y altitud permite generar eficientemente estas regiones de precipitación.

El potencial de tormentas se obtuvo mediante el acoplamiento de información meteorológica de superficie con datos interpretados a partir de imágenes de satélite (infrarrojas). Se seleccionó una muestra de tormentas ocurridas en la zona homogénea de montaña, muestra comprendida por tormentas tanto fuertes como moderadas, correspondientes a los meses de julio del periodo de estudio comprendido de 2004 al 2006. El acoplamiento de la información de 12 horas previas a la ocurrencia de lluvia mostró una importante relación relacionada con los patrones de temperaturas provenientes de los dos tipos de datos empleados, dando lugar al gran potencial de aplicación de las relaciones de patrones climatológicos antecedentes basados únicamente en información de superficie. Estas ecuaciones fueron obtenidas para las regiones parciales asociadas a los sitios de medición en superficie.

Tales resultados presentan la ventaja de poder ser implementados como parte de un sistema de control de inundaciones en la zona de estudio, y con bajo costo.

Adicionalmente la metodología descrita puede ser migrada a cualquier otra región en México, especialmente en aquellas zonas donde no se tenga acceso a la información proveniente de satélite y donde la ocurrencia de tormentas represente una situación de alta peligrosidad para la población.

Bibliografía y referencias

- Adamowsky, K. (2000)**, Regional análisis of annual maximum and partial duration flood data by nonparametric and L-moment methods, *Journal of hydrology*, vol. 229, pp. 219-231.
- Adler, R. F., y A. J. Negri (1988)**. A satellite infrared technique to estimate tropical convective and stratiform rainfall. *J. Appl. Meteor.*, 27, 30, 30-51.
- Arellano L., F. (2006)**, Sistematización del método de la Avenida Indice y su aplicación en cuencas de la Región Lerma-Santiago, Tesis de Maestría en Ingeniería, UNAM.
- Arellano, L. F., Gutiérrez, L., M. A., Arellano, L., H.H. (2010)**, Comportamiento de tormentas extremas de Querétaro en base a imágenes de satélite. Casos de estudio., Extensión Nuevos Tiempos, Universidad Autónoma de Querétaro, No. 17, ene-feb 2010, 39-46
- Arkin, P. A. (1979)**, The relationship between fractional coverage of high cloud and rainfall accumulations during GATE over the B-scale array. *Mon. Wea. Rev.*, 107, 1382-1387.
- ASCE (1996)**, *American society of civil engineers, Task committee on hydrology handbook*, 2nd Edition, ASCE Manuals and reports on engineer practice 28, New York, U. S. A.
- Augustine J.A. and Howard K.W., (1988)**, Mesoscale convective complexes over the United States during 1985. *Monthly Weather Rev.*, Vol 116, pp. 685-701.
- Austin, P. M., y Houze, R., (1972)**, Analysis of structure of precipitation patterns in New England, *J. of Applied Meteorology*, vol. 11, pp. 926-935
- Badder, M. J., Forbes, G. S., Grant, J. R., Lilley, R. B.E, y Waters, A. J. (1995)**, Images in weather forecasting: A practical guide for interpreting satellite and radar imagery, Cambridge University Press, N.Y.
- Barret, E. C. (1970)**, The estimation of monthly rainfall from satellite data. *Mon. Wea. Rev.*, 98, 322-327.
- Barret, E. C., D. W., Martin (1981)**, The use of satellite data in rainfall monitoring, Academic Press, N.Y.
- Bartels, D.L., J.M. Skradski, and R.D. Menard, (1984)**, Mesoscale convective systems: A satellite data-based climatology. NOAA Tech. Memo. ERL ESG 8, Dept. Of Commerce, Boulder, CO, 63 pp. [NTIS PB-85-187904]
- Battán, L., J., (1962)**, Cloud physics, A popular introduction to applied meteorology, Dover publication, Inc., Mineola, New York, U.S.A.
- Brito-Castillo, L., Leyva-Contreras, A., Douglas, A.V., Lluch-Belda, D.,(2002)**. Pacific-decadal oscillation and the filled capacity of dams on the Rivers of the gulf of California continental watershed. *Atmosfera* 11, 27-42.
- Brito-Castillo, L., Leyva-Contreras, A., Douglas, A.V., Lluch-Belda, D.,(2003)**. The effect of large-scale circulation on precipitation and streamflow in the gulf of California continental watershed. *Int. J. Climatology* 23, 751-768.
- Burn, D. (1988)**, Delineation of groups for regional flood frequency analysis, *Journal of hydrology*, Vol. 104, pp. 345-361
- Burroughs, W. J., Crowder, B., Robertson, T., Vallier-Talbot, E., Whitaker, R., (1998)**, Observar el tiempo, Ed. Planeta, Barcelona, España.
- Byers, H., R., y Braham, Jr., (1949)**, The thunderstorm. Supt. of documents, U.S.A. Government Printing office, Washington, D.C., U.S.A.

- Campos A., D. F. (1999)**, Hacia el enfoque global en el análisis de frecuencias, *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. XIV, núm 1, pp. 23-42
- Carn M. (1994)**, Apport de la télédétection satellitaire á la pluviométrie de bassin d'un flueve sahélien :le Sénégal, Validation problems of rainfall estimation methods by satellite in intertropical Africa, Bernard Guillot editor.
- Carrera-Hernandez, J. y Gaskin, S. (2007)**, Spatio temporal analysis of daily precipitation and temperature in the Basin of Mexico, *Journal of Hydrology* (2007) 336, 231– 249
Ch. 3, McGraw-Hill.
- Chen, W., y Li, C., (2002)** Rain retrievals using TRMM and geostationary meteorological satellite 5 and data obtained during the SCSMEX, *Int. J. remote sensing*, vol. 23, 12, pp. 2425-2448
- Chockmani, K., y Ouarda, T. (2004)**, Physiographical space-based kriging for regional flood frequency estimation at ungauged sites, *Water resources research*, Vol. 40, pp. W12514
- Clark, D., y Morris, D., (1986)**, The NOAA Satellite precipitation estimate program – with preliminary results of an operational test using estimates in a hydrologic river forecast model, *Hydrologic Application Space Technology (Proceedings of the Cocoa Beach Workshop, Florida, August, 1985. IAHS Publ., no. 160, 41- 46.*
- Comrie, A. C., Glen, E.C., (1998)**, Principal components-based regionalization of precipitation regimes across the southwest United States and northern Mexico, with an application to monsoon precipitation variability, *Climate Res.* 10, 201-215.
- Creutin, J. D., Lacomba, P., y Obled Ch., (1986)**, Spatial relationship between cloud-cover and rainfall fields: a statistical approach combining satellite and ground data, *Hydrologic Application Space Technology (Proceedings of the Cocoa Beach Workshop, Florida, August, 1985. IAHS Publ., no. 160, 81-90.*
- Cunnane C. (1988)**, Methods and merits of regional flood frequency analysis. *Journal of hydrology*, Vol. 100, pp. 269-290
- Descroix, L., Nouvelot, J.F., Vauclin, M., (2002)a**, Evaluation of an antecedent precipitation index to model runoff yield in the western sierra madre (Northwest Mexico), *J. of Hydrol.*, 263, 114-130.
- Descroix, L., Gonzalez Barrios, J.L., Vandervaere, J.P., Viramontes, D., Bollery, A., (2002)b**. Variability of hydrodynamic behaviour on soils and hillslopes in a subtropical mountainous environment (Western Sierra Madre, Mexico). *Journal of Hydrology* 266, 1–14.
- Dittberner, G. J., and Vonder Haar, T.H. (1973)**, Large scale precipitation estimates using satellite data; application to the Indian Monsoon, *Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. B.*, 21, 317-334.
- Dittberner, G. J., y T. H. Vonder Haar (1973)**, Large scale precipitation estimates using satellite data; application to the Indian Monsoon. *Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. B*, 21, 317-334.
- Doswell, C.A. III, (1982)**, The operational Meteorology of Convective Weather Vol. I, Operational Mesoanalysis. NOAA Technical Memorandum NWS NSSFC-5.
- Douglas, M., Maddox, R. A., y Howard, K., Reyes, S., (1993)**, The Mexican monsoon, *J. Climate*, 6, 1665-1677.
- ERIC III (2003), Extracción rápida de información climatológica, Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) e Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
- Erickson, J. (1991)**, Las tormentas, de las antiguas creencias a la moderna meteorología, Ed. McGraw Hill, Madrid, España.

- Escalante S., C. (1994)**, Análisis regional de eventos extremos, *XIII Congreso Nacional de Hidráulica*, pp. 1-6
- Escalante S., C., y Domínguez, J., (2001)**, Análisis regional de precipitación con base en una distribución bivariada ajustada por máxima entropía, *Ingeniería hidráulica en México*, vol. XVI, num. 3, pp. 91-102
- Escalante S., C., y Reyes C., L., (1998)** Identificación y análisis de sequías en la Región Hidrológica Número 10, Sinaloa, *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. XIII, núm 2, pp. 23-43
- Escalante S., C., y Reyes C., L., (2000)**, Estimación regional de avenidas de diseño, *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. XV, núm. 2, pp. 47-61
- Escalante, S. C. (1998)**, Multivariate extreme value distribution with mixed gumbel marginals, *Journal of the American water resources association*, Vol. 34, No.2, 321-333
- Fattorelli, S., Casale, R., Borga, M., y Ros, D., (1996)**, Integración de técnicas de radar y sensores remotos para la estimación de lluvias en aplicaciones hidrológicas y mitigación de riesgos de inundación, Comisión Europea, Dirección general XII, Ciencia, investigación y desarrollo, Bruselas, Bélgica.
- Feidas, H, Kokolatos, G., Negri, A., Manyin, M., Chrysoulakis, N., and Kamarianakis, Y. (2008)**, Validation of an infrared-based satellite algorithm to estimate accumulated rainfall over the Mediterranean basin, *Theor. Appl. Climatol.*
- Florentino, M., Versace, P., Rossi, F. (1985)**, Regional flood frequency estimation using the two-component extreme value distribution, *Hydrological Sciences*, vol. 30, num. 1, pp. 51-64
- Follansbee, W., y V. J., Oliver (1975)**, Estimation of average daily rainfall from satellite cloud photographs. NOAA Tech Memo, NESS 44, Washington, DC, 39P.
- Freidas, H., Lagouvardos, K., Kotroni, V., and Cartalis, C. (2005)**, Application of three satellite techniques in support of precipitation forecasts of a NWP model, *International Journal of remote sensing*, Vol. 26, No. 24, 5393-5417
- Fritsch, J. M., R. J. Kane, and C. R. Chelius, (1986)**, The contribution of mesoscale convective systems to the warm season precipitation in the United States. *J. Appl. Meteor.*, **25**, 1333–1345.
- Gaal, L., Kysely, J., y Szolgay, J., (2007)**, Region-of-influence approach to a frequency analysis of heavy precipitation in Slovakia, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **4**, 2361–2401, 2007.
- Gairola, R. M., S. Pokhrel, A. K. Varma, and V. K. Agarwal (2005)**, A combined passive-active microwave retrieval of quantitative rainfall from Topex/Poseidon radar altimeter and Topex microwave radiometer, *Int. J. Remote Sens.*, **26**(8), 1729–1753, doi:10.1080/01431160512331326585
- Gingras, D., y Adamowsky, K., (1993)**, Homogeneous region delineation based on annual flood generation mechanisms, *Hydrological Sciences*, vol. 37, num. 2.
- Gochis, D., Brito-Castillo, L, y Shuttleworth, J. (2006)**, Hydroclimatology of the North American Monsoon region in northwest Mexico, *Journal of hydrology*, **316**, p. 53-70.
- Gochis, D., Brito-Castillo, L. and Shuttleworth, W. (2005)**, Hydroclimatology of the North American Monsoon region in northwest Mexico, *Journal of Hydrology*, **316**, 53-70.
- Gómez M, J. F. (2003)**, *Modelos regionales de gastos máximos para la vertiente del Golfo de México*, Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, DEPMI
- Gonzalez, J., y Valdez, J. (2008)**, A regional monthly precipitation simulation model based on an L moment smoothed statistical regionalization approach, *Journal of Hydro.*, **348**, 27-39.

- Goovaerts, P., (2000)**, Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *J. Hdrol.* 228, 113–129.
- GREHYS (1996a)**, (Groupe de Recherche en Hydrologie Statistique) Inter-comparison of regional flood frequency procedures for Canadian rivers, *Journal of hydrology*, Vol. 186, num. 1-4, pp. 85-103.
- GREHYS (1996b)**, (Groupe de Recherche en Hydrologie Statistique). Presentation and review of some methods for regional flood frequency analysis, *Journal of hydrology*, Vol. 186, núm. 1-4, pp. 63-84.
- Griffith, C. G., W. L. Woodley, S. Browner, J. Teijeiro, M. D. W. Martin, J. Stout, y D. N. Sikdar (1976)**, Rainfall estimation from Geosynchronous satellite imagery during daylight hours. NOAA Tech. Rep. ERL 356-WMPO 7, Boulder, CO, 106 pp.
- Gruber, A. (1973a)**, An examination of tropical cloud clusters using simultaneously observed brightness and high resolution infrared data from satellites. NOAA Tech. Memo. Ness 50, Washington, DC, 22 pp.
- Gutiérrez L., A., T. Lebel, y L. Descroix. (2004)**. Reflexiones sobre el concepto de cuencas hidrológicamente homogéneas. *In: XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Sao Paulo, Brasil. 10 p.
- Gutiérrez L., M. A. (1996)**, Identificación de regiones hidrológicamente homogéneas con base en las curvas de Andrews, *XVII Congreso latinoamericano de hidráulica*, Guayaquil, Ecuador, Vol. 2.
- Gutiérrez L., M. A., Lebel T., y Descroix L., (2004)**, Reflexiones sobre el concepto de cuencas hidrologicamente homogéneas, *XXI Congreso latinoamericano de hidráulica*
- Gutierrez-Ruacho, O., Brito-Castillo, L., Diaz-Castro, S., and Watts, C., (2010)**, Trends in rainfall an extreme temperaturas in Northwestern Mexico, *Climate research*, vol. 42, 133-142.
- Guttman, N. (1993) a**, On the sensivity of sample L moments to sample size, *Journal of climate*, 7, 1026-1029.
- Guttman, N. (1993) a**, The use of l-moments in the determination of regional precipitation climates, *Journal of climate*, 6, 2039-2325.
- Hayward, D. and Clarke, R. T.(1996)**, Relationship between rainfall, altitude and distance from the sea in the Freetown Peninsula, Sierra Leone, *Hydrol. Sci.*, 41, 377–384.
- Hirose, M., y Nakamura, K., (2003)** Spatio temporal variation of the vertical gradient of rainfall rate observed by the TRMM PR, *Journal of climate*, vol. 17
- Higgins, R. W., and W. Shi, and NAME Science Working Group, (2003)**, The North American Monsoon Experiment (NAME). Science and Implementation Plan for NAME, 91 pp. [Available from Climate Prediction Center, 5200 Auth Road, Camp Springs, MD 20746 or online at <http://www.joss.ucar.edu/name>.]
- Hosking, J.R.M., Wallis, J.R., (1997)**, Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments. Cambridge University Press, NY, USA.
- Houze, R. (1993)**, Cloud dynamics, Acedemic press, San Diego, Ca., U. S. A.
- Houze, R. Smull, B., Dodge, P., (1990)**, Mesoscale organization springtime rainstorms in Oklahoma, *Mon. Wea. Rev.* Vol. 118, pp. 613-654.
- Hubert P., Toma C. A. (1994)**, Étude des cumulus de pluie sahéliens, Validation problems of rainfall estimation methods by satellite in intertropical Africa, Bernard Guillot editor.
- Inzunza, B., J., (2003)**, Meteorología descriptiva, Cap. 6, Nubes y precipitación, Concepción, Chile. Disponible en World wide web: www.udec.cl/~jinzunza/meteo/meteo.htm

Kane, R. B., Jr., C. R. Chelius, and J. M. Fritsch, (1987), Precipitation characteristics of mesoscale weather systems. *J. Climate Appl. Meteor.*, **26**, 1345–1357.

Kilonsky, B. J., y Ramage, C. S. (1976), A technique for estimating tropical open-ocean rainfall from satellite observation, *J. Appl. Meteor.*, **15**, 972-975.

Kite, G., (1988), *Frequency and risk analysis in hydrology*, Water resources publications, 4th Ed., Littleton, Colorado, U.S.A.

Klepp, C., Bakan, S., Grabl, H., (2003) Improvements of satellite-derived cyclonic rainfall over the north Atlantic, American meteorological society, pp. 657-669

Kyselý J., Pícek J., Huth R., (2007), [Formation of homogeneous regions for regional frequency analysis of extreme precipitation events in the Czech Republic](#). *Studia Geophysica et Geodaetica*, **51**, 327-344. © 2007 StudiaGeo s.r.o., published by Springer Verlag

Laurent H. (1994), Valitaion des estimations de précipitation á grande échelle, Validation problems of rainfall estimation methods by satellite in intertropical Africa, Bernard Guillot editor.

Lemon, L., R., (1980), Severe thunderstorm radar identification techniques and warning criteria. NOAA Tec. Memo NWS NSSFC-3, Kansas City, U. S. A.

Lin G., y Chen L. (2003), A reliability-based selective index for regional flood frequency analysis methods, *Hydrological Processes*, Vol. 17, pp. 2653-2663

Lovejoy, S., G. L. Austin (1979a), The delineation of rain areas from visible and IR satellite data for GATE and mid-latitudes. *Atmosphere-Ocean*, **17**, 77-92.

Maddox, R. (1980), An objective technique for separating macroscale and mesoscale features in meteorological data, *Monthly weather review*, American meteorological society, vol. 108

Maderey R., L., E., (2005), Principios de hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico, Serie de textos universitarios, Num. 1, Instituto de Geografía, UNAM. Disponible en World wide web: www.igeograf.unam.mx/instituto/publicaciones/libros/hidrogeografia

Magaña, J., y Ramírez O., A. I. (2000), Parámetros regionales de ajuste de la distribución Gumbel doble en la cuenca Lerma-Balsas, *XVI Congreso Nacional de Hidráulica*, pp. 137-142

Magaña, V., Conde, C., Sanchez, O., y Gay, C. (1997) Assessment of current and future regional climate scenarios for Mexico, *Climate Research*, vol. 9, pg 107-114.

Martín, L., F., y Riosalido, A., R., (1999), Modelos conceptuales:Radar, Servicio de técnicas de análisis y predicción. Disponible en World wide web:<http://www.inm.es/web/sup/ciencia/divulga/tempoweb/indice.html>

Milford J. R., Doudale G., McDougall V.D. (1994), Rainfall estimation from cold cloud duration : experience of the TAMSAT group in West Africa, Validation problems of rainfall estimation methods by satellite in intertropical Africa, Bernard Guillot editor.

Moses J. F., y Barret E. C. (1986), Interactive procederes for estimating precipitation from satellite imagery, Hydrologic Application Space Technology (Proceedings of the Cocoa Beach Workshop, Florida, August, 1985. IAHS Publ., no. 160, 25-39.

Nagle, R. E., y Serebreny, S. M. (1962), Radar precipitation echo and satellite cloud observations of maritimecyclone, *J. Appli. Meteor.*, **1**, 279-295.

NAME Science working group, (2004), North American monsoon experiment (NAME), Science and implementation plan (Available online at <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/NAME.html>).

NAME Science Working Group, cited (2004): North American Monsoon Experiment (NAME) Science and implementation plan. (Available online at <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/monsoon/NAME.html>)

- NASA (2005)**, National Aeronautics and Space Administration, The importance of understanding clouds. Disponible en World wide web: <http://icp.giss.nasa.gov/education/cloudintro/>
- Nesbitt, S., Zipser, E., Cecil, D., (2000)** A census of precipitation features in the tropics using TRMM:radar, ice scattering, and lightning observations, *Journal of climate*, pp. 4087-4106
- NOAA (1975)**, Central processing and analysis of geostationary satellite data," NOAA Tech. Memo. NESS 64, U.S. Dep't. Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Washington, DC, 155 pp.
- Nouh M. (1987)**, A comparison of three methods for regional flood frequency analysis in Saudi Arabia, *Water resources research*, Vol. 10, pp. 212-219
- Ouarda, T., Bâ, K., Diaz-Delgado, C., Cârstenau, A., Chockmani, K., Gingras, H., Quentin, E., Trujillo, E., Bobée, B., (2008)**, Intercomparison of regional flood frequency estimation methods at ungauged sites for a Mexican case study, *Journal of Hydrology* (2008) 348, 40– 58.
- Ouarda, T., Girard, C., Cavadias, G., y Bobee, B. (2001)**, Regional flood frequency estimation with canonical correlation analysis, *Journal of hydrology*, Vol. 254, num. 1-4, pp. 157-173.
- Pandey, G., y Nguyen, V. (1999)**, A comparative study of regression based methods in regional flood frequency analysis, *Journal of hydrology*, Vol. 225, num. 1-2, pp. 92-101
- R. M. Gairola, R. M., Pokhrel, Varma, A.K., Agarwal, V. K. (2005)** A combined passive-active microwave retrieval of quantitivy rainfall from Topex/Poseidon radar altimeter and Topex microwave radiometer, *International Journal of remote sensing*, Vol. 26, No. 8, 1729–1753
- Ravelo, A.C. y J.A. Santa (2000)**, Estimación de las precipitaciones utilizando información satelital y terrestre en la provincia de Córdoba (Argentina), *AGRISCIENTIA*, 2000, VOL. XVII: 21-27
- Riosalido, A., R., Elizaga, R., F., Martín, L., F., Carretero, P., O.,(1998)**, Sistemas convectivos de mesoescala. Generalidades, Modelos conceptuales a mesoescala. Disponible en World wide web: <http://www.inm.es/web/sup/ciencia/divulga/tempoweb/scm/scm.htm>
- Robinson, J., y Sivapalan, M., (1997)**, An investigation into the physical causes of scaling and heterogeneity of regional flood frequency, *Water resources research*, vol. 33, num. 5, pp. 1045-1059.
- Rogers, R. R. y Yau, M., K. (1989)**, A short course in cloud physics, International series in Natural philosophy, vol.113, Butterworth-Heinemann, U.S.A., Third edition.
- Rosbjerg D., y Madsen H. (1995)**, Uncertainty measures of regional flood frequency estimators, *Journal of hydrology*, Vol. 167, num., pp. 209-224
- Salas, R. y Fernandez, Y.,(2006)**, Maximum rainfall intensity analysis using l-moments in Spain, *Proceedings of the 7th International Conference on HydroScience and Engineering* Philadelphia, USA, September 10-13.
- Sawunyama, T., and Hughes, DA, (2008)**, Application of satellite-derived rainfall estimates to extend water resource simulation modelling in South Africa, *Water SA*, Vol. 34 No. P. 1-9.
- Schiesser, H.H., Houze Jr, R.A. and Huntresier H., (1995)**, The mesoscale structure of severe precipitation systems in Switzerland. *Mon. Wea. Rev.*, 123:2070-2097.
- Schumacher, C., y Houze Jr., R. (2003)** Stratiform rain in the tropics as seen by the TRMM P, *American meteorological society, Journal Of Climate*, Vol 16, pg 1739-1756

- SCM (2007)**, Sistemas convectivos de mesoescala, Instituto Nacional de Meteorología, España. Disponible en World wide web: www.inm.es/web/sup/ciencia/divulga/tempoweb/scm/scm.htm
- Scotfield, R. A., and V.J. Oliver (1977)**. A scheme for estimating convective rainfall from satellite imagery. NOAA Tech. Memo. NESS 86, Washington, DC, 47 pp.
- Skaugen, T., y Vaeringstad, T., (2005)**, A methodology for regional flood frequency estimation based on scaling properties, *Hydrological processes*, vol. 19, pp. 1481-1495
- Smith, J.A. (1993)**, Precipitation. In: Maidment, D.R. (ed), Handbook of Hydrology,
- Smithers, J. C., y Schulze, R. E. (2001)**, A methodology for the estimation of short duration design storms in south Africa using a regional approach based on L-moments, *Journal of hydrology*, vol. 241, pp. 42-52.
- St. Hilaire A., Ouarda T., Lachance M., Bobbe B., Barbet M., y Bruneau P. (2003)**, La régionalisation des précipitations. : une revue bibliographique des développements récents, *Revue des sciences de l'eau*, Vol. 16, pp. 27-54
- StatSoft Inc., (1995)**. STATISTICA for Windows [Computer program manual]. Tulsa, OK.
- Stedinger, J.(1983)**, Estimating a regional flood frequency distribution, *Water resources research*, Vol. 19, num. 2, pp. 503-510
- Stout, J. E., D. W. Martin, y D.N. Sikdar (1979)**, Estimating GATE rainfall with geosynchronous satellite images, *Mon. wea. Rev.*, 107, 585-598.
- Touré A., N'Diaye N. (1994)**, Estimation des pluies au Sénégal par l'approche TAMSAT, Validation problems of rainfall estimation methods by satellite in intertropical Africa, Bernard Guillot editor.
- Triplet, J. P. & Roche, G. (1986)**, Météorologie générale. Météo-France, 3^{ème} édition, Trappes, 317 p.
- Troutman, B., y Karlinger, M. (2001)**, Regional flood probabilities, *Water resources research*, Vol. 39, num. 4, pp. 1095
- Tsonis, A. A., y G. A. Isaac (1985)**. On a new approach for instantaneous rain area delineation in the midlatitudes using GOES data. *J. Climate Appl. Meteor.*, 24, 1208-1218.
- Valdés, M., Cortéz, M. y Pastrana, J. (2005)**, Un estudio explorativo de los sistemas convectivos de mesoescala de México, *Investigaciones geográficas*, num. 56, pp. 26-42
- Vicente, G. V., Scofield, R. A.; Menzel, W. P. (1998)**, The operational GOES infrared rainfall estimation technique. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 1883-1898.
- Viessman, W., Knapp, J., Lewis, G. y Harbaug, T. (1989)**, *Introduction to hydrology*, Harper & Row Publishers, 3a ed., New York, pp. 201-224.
- Viramontes, D., Descroix, L., (2003)**, Changes in the surface water hydrological characteristics of an endoreic basin of northern Mexico from 1970 to 1998, *Hyd. Proc.*, 17, 1291-1306.
- Wallace, J., Hobbs, P., V., (2006)**, Atmospheric science, An introductory survey, 2^{dn} edition, Elsevier, Canada
- Weinreb, M.P., M. Jamieson, N. Fulton, Y. Chen, J.X. Johnson, J. Bremer, C. Smith, and J. Baucom, (1997)**, "Operational calibration of Geostationary Operational Environmental Satellite-8 and -9 imagers and sounders," *Applied Optics*, 36, pp. 6895-6904.
- Wilcox, E., y Donner, L., (2007)** The frequency of extreme rain events in satellite rain-rate estimates and an atmospheric general circulation model, *Journal of climate*, pp. 53-69

- Wiltshire, S. (1985)**, Grouping basins for regional flood frequency analysis, *Hydrological Sciences*, vol. 30, num. 1, pp. 151-159
- Wylie, D. P. (1979)**. An application of a geostationary satellite rain estimation technique to an extratropical area, *J. Appl. Meteor.*, 18, 1640-1648.
- Yurekli, K. y Modarres, R., (2007)**, Regionalization of Maximum Daily Rainfall data over Tokat Province, Turkey, *International Journal of Natural and Engineering Sciences* 1 (2), 1-7.
- Zhang, J., Howard, K., Gourley, J., (2005)** Constructing three-dimensional multiple-radar reflectivity mosaics: examples of convective storms and stratiform rain echoes, *J. of Atmos. and oceanic tech.*, vol. 22.

Anexos

Anexo 1. Catalogo de estaciones climatológicas

Tabla 1. Estaciones climatológicas de la Base_CLICOM

Cve_est	AnioMax	AnioMin	% años	HpMaxM	HpMinM	HpPromD	AcumM
8003	1985	1957	82.14	120.2	0	3.7851	115.496751
8012	1974	1972	66.67	40	0	1.839562	56.476667
8015	1985	1969	100.00	86	0	2.699712	82.537
8016	1985	1969	93.75	92	0	2.228435	67.195745
8022	1985	1961	95.83	90.5	0	3.160049	96.77758
8028	1999	1904	81.05	90	0	1.325398	40.490291
8034	1987	1966	95.24	61	0	1.887713	57.680247
8036	1973	1961	91.67	80	0	3.026485	92.771429
8038	1998	1928	64.29	134	0	2.032439	62.00864
8041	1985	1961	100.00	87.4	0	2.958154	90.59
8042	1971	1962	77.78	100	0	2.332625	71.346154
8043	1985	1969	100.00	88.8	0	1.837824	56.206186
8055	1987	1961	92.31	112	0	3.112495	95.101706
8061	2001	1961	72.50	123.8	0	2.09654	64.139888
8071	1998	1953	88.89	90	0	2.116242	64.595688
8073	1985	1961	100.00	131.4	0	3.181541	97.304811
8074	1998	1961	89.19	77	0	1.744553	53.274384
8075	1990	1983	57.14	92.4	0	2.118023	64.833962
8076	1984	1964	95.00	96.5	0	1.344929	41.197479
8090	1999	1922	84.42	75	0	1.299964	39.317722
8097	2000	1922	67.95	80	0	1.815636	55.161381
8103	1993	1957	91.67	112.5	0	2.038185	62.136118
8106	1998	1961	70.27	68	0	1.761976	53.923292
8117	1986	1969	94.12	107	0	2.636968	80.670466
8124	1985	1966	100.00	82	0	1.75576	53.814348
8125	1987	1961	96.15	94	0	2.107846	64.41196
8128	1983	1970	61.54	67	0	2.129227	64.733333
8134	1975	1972	66.67	74.5	0	2.661041	80.096
8138	1988	1943	82.22	100	0	1.646965	50.218243
8141	1999	1947	92.31	112	0	1.495497	45.591952
8142	1999	1982	82.35	65	0	1.31364	39.758824
8144	1987	1969	94.44	96	0	1.282757	39.056075
8145	1972	1961	100.00	98	0	2.458253	74.644697
8146	1987	1961	92.31	108	0	2.708798	82.826756
8148	1985	1961	100.00	84.3	0	2.108109	64.543836
8149	1987	1972	86.67	70	0	2.188221	66.944242
8160	1985	1969	93.75	80	0	2.223752	67.992021
8161	1997	1944	98.11	255	0	1.816665	55.332909
8166	1972	1965	100.00	71.8	0	1.488651	45.526136
8167	1998	1948	86.00	526	0	2.641527	80.85619
8172	1998	1928	62.86	131.4	0	3.303013	100.644195
8175	1972	1966	33.33	81.5	0	1.287179	39.409091
8182	1999	1972	66.67	71	0	1.964108	60.092342
8190	1984	1972	100.00	127	0	3.02642	88.911486
8191	1985	1967	94.44	98	0	2.335913	71.544811
Cve_est	AnioMax	AnioMin	% años	HpMaxM	HpMinM	HpPromD	AcumM

8192	1987	1969	94.44	98	0	2.251273	68.743128
8214	1987	1970	70.59	93	0	2.170565	66.222581
8219	1999	1972	88.89	65.5	0	1.687694	51.219655
8224	1968	1961	71.43	41.5	0	1.13953	34.940845
8230	1968	1961	85.71	52	0	1.453993	44.508434
8243	1984	1973	90.91	67.2	0	1.350473	41.134884
8246	2000	1974	84.62	114	0	1.299054	39.363019
8259	1984	1974	100.00	120	0	2.299164	70.26063
8266	1984	1975	100.00	57	0	2.273329	68.948246
8267	1984	1975	100.00	55	0	2.103279	63.161345
8269	1984	1976	100.00	202.6	0	3.907881	119.743878
8271	1987	1976	90.91	78	0	2.010755	61.40625
8272	1984	1975	100.00	68	0	1.916246	58.427966
8277	1993	1975	94.44	99	0	2.820637	86.236792
8297	1984	1976	100.00	68.5	0	2.119514	63.969072
8299	1984	1977	100.00	100	0	1.331359	39.022472
8301	1983	1977	100.00	125	0	3.680035	112.469444
8302	1983	1977	100.00	60	0	1.40884	43.13375
8315	1984	1979	100.00	49	0	1.356402	41.420313
8319	1984	1978	100.00	63.5	0	1.709581	52.337037
8321	1989	1980	66.67	62.5	0	2.51201	73.8
8322	1998	1980	77.78	80	0	2.400722	73.275
8325	1983	1979	75.00	77	0	2.186966	66.418605
8326	1999	1981	55.56	63.5	0	1.261808	38.5392
8334	1984	1982	100.00	75	0	1.063468	32.28
8339	1988	1982	33.33	71	0	2.098061	64.258824
8342	1998	1982	62.50	67.8	0	1.939385	59.312698
10003	1998	1960	76.32	189.5	0	3.752938	114.93125
10018	1998	1953	88.89	206	0	4.038503	122.928866
10026	2002	1964	100.00	120	0	2.464027	75.175488
10031	1998	1966	78.13	85	0	2.286196	69.867105
10037	1998	1969	93.10	146	0	2.209917	66.986567
10042	1985	1962	100.00	151	0	3.366691	103.034409
10050	1998	1964	73.53	302	0	4.203744	128.386408
10064	1985	1961	95.83	282.1	0	2.435681	74.461232
10071	2002	1961	70.73	110.7	0	2.333676	71.208333
10079	1983	1963	90.00	200.2	0	3.178832	97.238288
10082	1998	1947	94.12	172.4	0	2.859013	87.4026
10086	1985	1947	94.74	280.6	0	3.364484	103.01445
10087	1998	1967	96.77	216	0	3.80156	116.256873
10091	1988	1967	90.48	163.5	0	2.736388	83.348936
10094	1983	1966	41.18	69	0	1.743502	53.304444
10122	1983	1973	80.00	80	0	2.506057	76.082
10125	1983	1975	100.00	64	0	1.832688	55.752
10153	1983	1981	100.00	95.5	0	3.78462	115.938462
10154	1983	1981	100.00	56	0	2.973098	90.909375
10160	1998	1981	64.71	86.9	0	3.181617	96.957343
25001	2001	1961	92.50	217.4	0	2.174326	66.529736
25002	1990	1960	66.67	124.1	0	1.984476	59.736735
25003	2002	1962	92.50	161	0	0.695988	21.291689
25004	1974	1970	75.00	99	0	1.112579	33.8225
Cve_est	AnioMax	AnioMin	% años	HpMaxM	HpMinM	HpPromD	AcumM
25005	1981	1962	94.74	190.2	0	2.237901	68.637946
25006	1981	1961	85.00	155	0	2.899324	88.686124
25007	1985	1953	96.88	203	0	2.022096	61.410026
25009	1994	1961	96.97	105	0	1.254485	38.448782

25010	1974	1970	75.00	80	0	1.440951	44.093023
25012	1988	1908	28.75	174	0	2.583607	77.432042
25013	1985	1969	100.00	167	0	0.990056	30.309091
25015	2002	1961	97.56	175.2	0	1.663154	50.948554
25016	1978	1967	90.91	141	0	1.839053	54.266154
25017	1998	1961	89.19	135	0	2.149877	65.635176
25018	1972	1969	33.33	72	0	2.07929	63.225
25019	2000	1961	94.87	150.8	0	2.039943	62.266264
25020	1975	1970	60.00	65.5	0	1.484941	45.577273
25021	2001	1962	82.05	325	0	1.445998	44.376359
25022	1999	1969	96.67	117.4	0	0.947824	28.939377
25023	1999	1955	97.73	330	0	1.719118	52.666667
25024	1993	1961	90.63	238	0	2.163739	66.324294
25025	1998	1961	100.00	114.5	0	1.703935	52.26982
25027	1985	1962	95.65	208	0	1.248317	38.235055
25028	1993	1961	90.63	228.5	0	1.921124	58.817183
25030	2001	1962	97.44	231	0	1.386037	42.377174
25031	1990	1961	93.10	236	0	1.891844	57.996418
25032	1999	1969	96.67	156	0	1.480572	45.421714
25033	2001	1961	100.00	403	0	2.50504	76.380903
25035	1983	1970	84.62	101	0	1.018317	31.235556
25036	2002	1961	31.71	192	0	3.677729	112.17362
25037	1998	1953	91.11	181	0	1.660181	50.9024
25038	2001	1969	75.00	243	0	1.323457	39.660751
25039	2002	1970	18.75	58.5	0	0.363413	11.126579
25040	1974	1970	50.00	20	0	0.368895	11.227586
25041	2001	1964	100.00	174	0	2.77737	85.013586
25042	1985	1962	95.65	297	0	0.924705	28.341091
25044	2000	1961	97.44	181	0	2.280216	69.888596
25045	2001	1961	100.00	243	0	2.153642	66.042029
25046	2001	1942	98.31	248.6	0	2.437061	74.656919
25047	1988	1972	87.50	200	0	2.782559	85.23648
25048	1982	1969	100.00	201	0	1.048214	32.091304
25050	2002	1969	57.58	160	0	1.12809	34.555404
25051	1978	1972	16.67	150	0	2.094982	60.34
25053	1985	1961	100.00	198	0	1.744952	53.399654
25054	1983	1961	100.00	146.5	0	2.245387	68.886792
25055	1999	1961	97.37	122.4	0	1.598678	48.623146
25056	1994	1970	87.50	100.5	0	1.329114	40.236782
25057	1974	1970	75.00	147	0	1.499963	45.962791
25059	1990	1970	80.00	91	0	1.409544	43.238071
25060	1981	1970	45.45	126	0	0.838385	25.723188
25061	1985	1971	100.00	104	0	1.441349	44.147953
25063	1998	1922	71.05	306.1	0	1.917957	57.933587
25064	2001	1969	87.50	250	0	1.997496	57.702017
25065	1998	1963	74.29	118.5	0	0.805214	24.628483
25066	1990	1961	93.10	118	0	1.679211	51.492284
Cve_est	AnioMax	AnioMin	% años	HpMaxM	HpMinM	HpPromD	AcumM
25068	1985	1961	95.83	136.5	0	2.610575	80.10662
25069	1988	1961	100.00	350	0	2.253175	62.972086
25071	2001	1961	95.00	323	0	1.900326	57.889507
25076	1988	1962	92.31	183.5	0	1.302666	39.649147
25077	1991	1969	95.45	300	0	1.998066	61.131621
25080	1999	1962	94.59	231.5	0	0.823656	25.189505
25081	2001	1944	96.49	224.3	0	2.408149	73.204697
25082	1999	1961	97.37	221	0	1.405727	43.096421

25083	1974	1961	92.31	79.8	0	1.890107	57.870548
25084	1987	1976	90.91	140	0	2.297656	70.585938
25085	1990	1961	86.21	140	0	2.57359	78.761794
25086	1985	1964	100.00	143.5	0	1.056444	32.38189
25087	2001	1961	97.50	196.5	0	2.078794	63.033612
25088	1985	1961	100.00	144	0	1.085622	33.301375
25089	1976	1972	75.00	110	0	1.402771	42.897436
25090	1978	1961	76.47	124	0	1.378874	42.124528
25092	1990	1961	86.21	140	0	2.282944	69.95814
25093	1985	1961	100.00	324	0	3.361856	102.720521
25094	1987	1969	83.33	292	0	2.370654	72.524111
25096	1969	1969	0.00	33	0	0.785276	24.2
25097	1990	1961	93.10	131	0	2.816147	86.22485
25098	1999	1963	83.33	220	0	0.840879	25.71897
25099	1977	1964	92.31	146	0	0.814819	24.943933
25100	1998	1961	91.89	134.6	0	2.385339	72.639808
25101	1983	1961	90.91	236.5	0	2.30551	70.709583
25110	2001	1921	87.50	335	0	2.527718	77.251899
25111	1977	1970	57.14	113.5	0	1.389028	42.582143
25113	1974	1970	25.00	57.5	0	1.556249	47.817647
25114	1974	1972	100.00	68.6	0	1.276077	39.175862
25115	2002	1961	65.85	123	0	1.43783	44.021009
25116	1998	1961	81.08	211	0	0.97795	29.890305
25117	1985	1961	100.00	130	0	1.62375	49.848451
25118	1990	1961	93.10	215	0	2.548426	78.197305
25122	1979	1961	50.00	94.3	0	1.337532	41.047321
25148	1979	1973	100.00	87	0	1.899215	57.639744
25151	1983	1975	100.00	92.5	0	0.924474	28.375238
25159	1981	1978	66.67	181.3	0	1.674301	51.408
25160	1983	1978	40.00	104	0	1.159469	35.546875
25161	1983	1970	53.85	116.1	0	0.568535	17.436136
25162	1983	1978	40.00	143	0	1.272753	38.953571
25163	1983	1978	40.00	87	0	2.505711	76.75
25164	1980	1978	50.00	123	0	1.476676	45.134783
25165	1983	1978	40.00	140	0	1.683266	51.49375
25166	1983	1978	40.00	145	0	1.836821	56.523333
25167	1981	1978	66.67	135	0	1.576968	48.496
25168	1981	1978	66.67	75	0	1.370072	41.916667
25169	1981	1978	66.67	96	0	1.626065	49.728
25170	1981	1978	66.67	110	0	1.818753	55.8
25171	2001	1978	26.09	80.5	0	1.305839	39.981944
25172	2002	1978	91.67	260	0	1.928099	57.464491
25177	1990	1979	81.82	250	0	2.569284	75.692174
Cve_est	AnioMax	AnioMin	% años	HpMaxM	HpMinM	HpPromD	AcumM
25178	2002	1979	69.57	230.5	0	1.68952	51.817949
25181	2002	1981	66.67	200.8	0	2.664659	81.629096
25183	2001	1981	85.00	176	0	2.713202	83.011538
25184	1985	1982	100.00	207	0	1.920146	58.67
25185	1985	1982	100.00	116	0	1.190801	36.523256
25187	1983	1982	0.00	80	0	4.179032	129.55
26001	2004	1961	90.70	66	0	0.952359	29.048981
26002	1984	1961	86.96	152	0	1.847227	56.725203
26003	1986	1969	94.12	138.5	0	1.175875	35.934848
26004	2003	1961	66.67	120	0	1.493397	44.610723
26005	2004	1961	69.77	87.5	0	1.153458	35.308541
26006	2004	1963	90.24	93.2	0	1.319092	40.089011

26007	2003	1964	97.44	127.1	0	1.528616	41.764163
26008	2004	1961	97.67	112.1	0	1.242488	38.046429
26009	2004	1962	88.10	168	0	1.512366	46.233554
26010	2004	1969	77.14	210	0	1.016239	27.073313
26011	1984	1961	60.87	75	0	1.159535	35.413559
26012	2004	1961	74.42	77	0	1.171443	34.750382
26013	1986	1961	80.00	88	0	1.465336	44.88664
26015	1974	1965	88.89	110.5	0	1.570366	47.749038
26016	2004	1960	97.73	150	0	0.996626	28.967308
26017	1985	1969	100.00	145	0	1.759707	54.043878
26018	2004	1961	100.00	204	0	1.026307	31.423881
26019	2004	1967	94.59	176	0	1.112184	33.953012
26020	2002	1983	31.58	116	0	1.04519	32.006098
26021	2004	1969	97.14	180	0	1.231227	37.370602
26022	2004	1964	87.50	101	0	0.926124	28.155425
26023	2000	1964	91.67	85.5	0	0.934222	27.930326
26024	2004	1955	95.92	150.5	0	1.542736	46.967155
26025	2004	1967	94.59	139	0	1.411329	42.982075
26026	1986	1954	84.38	68	0	0.47032	13.857622
26027	1976	1966	100.00	69	0	0.501043	15.21
26028	2001	1954	87.23	110.1	0	0.463469	13.96334
26029	1993	1965	92.86	160	0	1.734602	53.058696
26030	1972	1966	50.00	44	0	0.264342	8.068182
26031	1993	1958	97.14	150	0	1.602903	48.881356
26032	2004	1941	96.83	200	0	1.048992	31.177986
26033	1974	1966	100.00	96.5	0	0.82169	25.161856
26034	1997	1942	94.55	407	0	0.865309	26.502464
26035	2004	1960	79.55	91	0	0.830649	25.281659
26036	1983	1961	68.18	69	0	0.899296	27.47027
26037	1983	1971	100.00	73	0	0.153092	4.657143
26038	1999	1927	86.11	175	0	1.024631	31.268556
26041	1986	1969	94.12	90	0	0.668453	20.413131
26042	1973	1965	75.00	134	0	1.377747	42.228916
26043	2004	1960	90.91	240	0	1.099987	33.712577
26045	2004	1938	87.88	133.2	0	1.225631	37.381754
26046	1988	1960	100.00	90	0	0.991471	29.460831
26047	1985	1946	94.87	95	0	1.470312	45.01543
26048	2004	1964	97.50	140	0	1.771852	53.999156
26049	1990	1957	93.94	76	0	1.672128	51.192876
Cve_est	AnioMax	AnioMin	% años	HpMaxM	HpMinM	HpPromD	AcumM
26050	2004	1960	97.73	138.5	0	2.005891	61.454598
26051	1991	1970	90.48	218	0	0.932041	26.522594
26053	2004	1940	81.25	180	0	1.763746	53.462484
26053	2004	1927	84.42	180	0	1.788722	54.202605
26054	1989	1943	78.26	90	0	1.287975	39.223657
26055	2004	1943	93.44	120	0	1.220294	36.833237
26058	1983	1961	54.55	82.5	0	0.94421	28.876316
26059	2003	1943	73.33	92	0	1.475272	44.280695
26060	1991	1970	95.24	216	0	1.156122	29.598381
26061	2004	1922	71.95	211	0	1.091937	33.374655
26062	2004	1963	58.54	152	0	1.373842	41.046021
26063	1982	1944	94.74	125	0	1.791657	54.801841
26064	1983	1944	97.44	140.8	0	1.319185	40.341667
26065	2000	1962	71.05	90	0	1.191875	36.358967
26066	2003	1963	85.00	96	0	0.649485	16.358924
26067	1993	1957	94.44	85.5	0	1.509294	46.24747

26068	2004	1949	100.00	137.5	0	0.984685	30.20463
26069	2001	1932	89.86	103.8	0	1.0649	32.581058
26070	1986	1969	70.59	106	0	0.705807	20.870748
26071	2000	1966	79.41	87.6	0	0.30738	9.164048
26072	1979	1952	70.37	162	0	1.119033	15.847863
26073	2002	1957	91.11	139.5	0	0.792853	24.187034
26074	2003	1958	75.56	119	0	0.889777	26.928924
26075	1998	1927	84.51	161	0	1.779626	54.290846
26077	2003	1942	96.72	112	0	1.263679	38.606356
26078	1993	1959	94.12	89.2	0	1.509536	46.255297
26080	2004	1942	87.10	160	0	1.934692	59.199232
26081	2002	1970	6.25	27	0	0.261226	7.939667
26082	2003	1956	91.49	143.7	0	0.47962	14.482816
26083	1997	1943	94.44	135	0	1.98494	60.713107
26085	1986	1966	95.00	138	0	0.486444	14.697807
26088	1993	1959	97.06	96	0	1.390295	42.66206
26089	2002	1966	72.22	91.5	0	0.948276	28.984026
26090	1987	1966	100.00	80	0	0.782166	23.963566
26091	2002	1966	63.89	120	0	1.070446	32.825161
26092	2001	1951	48.00	72.5	0	0.958898	29.397099
26093	2003	1952	56.86	83.2	0	0.672383	20.614633
26094	2002	1957	68.89	112	0	2.509784	72.818933
26095	1970	1966	50.00	28.8	0	0.548375	16.392593
26096	2003	1948	50.91	62.9	0	0.506647	15.474586
26097	1972	1966	100.00	46	0	0.493479	15.102632
26098	2002	1950	48.08	255	0	1.238657	37.966129
26099	2004	1961	97.67	200	0	2.090611	64.050781
26100	2002	1966	58.33	122	0	1.785759	54.728906
26101	1998	1945	94.34	210	0	1.752355	53.122735
26102	2004	1942	96.77	153	0	1.534654	46.883434
26103	2002	1966	97.22	151	0	0.798271	24.218868
26105	1977	1921	67.86	140	0	1.265883	38.83413
26106	1987	1966	95.24	87	0	1.736789	52.769583
26107	2004	1938	60.61	193.1	0	0.867254	26.55767
26108	1971	1966	80.00	120.6	0	0.407719	12.458491
Cve_est	AnioMax	AnioMin	% años	HpMaxM	HpMinM	HpPromD	AcumM
26109	2004	1944	96.67	120	0	3.153362	95.894692
26110	1983	1967	93.75	70	0	1.126107	34.105946
26115	2004	1969	94.29	133.2	0	1.255556	38.370352
26116	1992	1967	84.00	95	0	1.043978	31.922835
26117	1987	1966	100.00	140	0	1.506104	45.682031
26118	1979	1966	84.62	174	0	0.294793	8.906294
26121	2002	1966	77.78	105	0	1.157656	34.920649
26122	2002	1964	63.16	175.1	0	0.742615	22.756424
26123	1993	1967	80.77	140	0	2.47971	75.964479
26125	1998	1943	63.64	140	0	1.291497	39.580952
26126	1978	1940	52.63	144	0	1.73022	49.717314
26127	1978	1940	52.63	60	0	0.574374	15.307054
26128	1978	1969	55.56	105	0	0.8684	22.598592
26131	1993	1940	54.72	254	0	1.076294	31.073669
26134	1983	1945	50.00	100	0	1.091395	26.582845
26135	1978	1969	55.56	250	0	0.634141	16.811475
26136	1978	1969	55.56	86	0	1.297629	34.213846
26138	2003	1973	96.67	148	0	1.023759	27.582521
26139	2002	1961	90.24	152.6	0	0.973107	29.691111
26140	1978	1973	100.00	40	0	0.618295	15.926471

26141	1969	1963	50.00	29.1	0	0.321856	9.847609
26145	2004	1961	55.81	123	0	1.415757	41.675168
26150	1978	1969	55.56	53	0	0.624553	16.364789
26151	1978	1975	100.00	109	0	1.882074	48.9375
26152	2004	1969	54.29	119	0	0.791842	23.594372
26154	1978	1969	55.56	58	0	0.269644	6.834921
26157	1978	1969	55.56	60	0	0.772526	22.854412
26158	1978	1969	55.56	51	0	0.508937	13.076923
26160	2000	1969	77.42	120	0	1.090331	32.511644
26161	1978	1969	55.56	110	0	0.746181	19.409836
26162	1978	1969	44.44	35	0	0.305449	7.903509
26163	1978	1969	44.44	220	0	0.793695	20.508475
26164	2000	1969	54.84	100	0	1.676768	44.807656
26165	2003	1969	73.53	126	0	0.911906	27.386601
26166	1978	1969	44.44	51	0	0.667058	17.681481
26169	1979	1969	30.00	7.8	0	0.059193	1.827895
26172	1970	1970	100.00	13.4	0	1.03871	32.2
26175	1983	1973	70.00	58	0	1.171705	34.537778
26176	1983	1973	100.00	73	0	1.005002	30.76281
26177	2004	1973	22.58	180	0	0.459843	14.002105
26178	2004	1974	76.67	152	0	1.481029	45.274729
26180	2004	1974	100.00	146.2	0	1.372407	36.588798
26181	2002	1974	89.29	140	0	1.382015	42.061311
26182	2004	1974	86.67	168	0	1.047217	31.368421
26183	1998	1966	68.75	174	0	1.96576	59.983835
26184	1987	1974	92.31	91.2	0	1.632227	49.942105
26185	1993	1975	83.33	82	0	1.533236	46.70663
26186	2004	1976	89.29	111	0	1.392458	42.389869
26188	1981	1975	50.00	80	0	0.876276	26.595349
26189	1984	1975	77.78	57.2	0	0.290901	8.936047
26190	1983	1976	71.43	65	0	1.28515	39.282857
Cve_est	AnioMax	AnioMin	% años	HpMaxM	HpMinM	HpPromD	AcumM
26192	2004	1975	68.97	85	0	0.895885	26.883871
26194	1988	1975	84.62	157	0	0.897987	27.051128
26196	2002	1975	85.19	106.5	0	0.498335	15.19894
26197	2004	1976	78.57	146	0	1.347503	41.178545
26198	2004	1976	78.57	126	0	1.547011	47.106415
26199	2002	1977	40.00	117	0	1.824671	46.832231
26201	2002	1977	68.00	187.3	0	1.651204	49.561033
26202	2002	1977	48.00	65.2	0	1.580997	48.447973
26205	2004	1978	80.77	82.5	0	1.267067	37.217717
26206	1967	1961	100.00	86.5	0	0.875556	26.657317
26210	1983	1979	100.00	81.6	0	1.944545	54.608163
26212	2002	1978	50.00	74	0	0.288604	8.830201
26213	1986	1979	85.71	67.5	0	1.296324	36.776316
26214	2004	1979	88.00	120	0	1.394739	42.732482
26215	1983	1979	100.00	74	0	1.091911	33.333333
26219	1982	1980	0.00	1.5	0	0.020161	0.625
26222	2004	1980	41.67	81	0	1.381907	41.697692
26223	2002	1980	86.36	315	0	1.200116	36.732353
26224	1987	1981	66.67	51	0	1.341637	39.318
26228	2004	1982	72.73	110	0	2.579067	77.431282
26229	2001	1979	72.73	105	0	1.473578	44.9805
26230	1988	1982	100.00	117	0	3.171317	70.340278
26231	1983	1982	100.00	72.5	0	1.962878	59.695652
26232	2004	1980	91.67	94.5	0	1.249493	37.348889

26233	1990	1982	50.00	74	0	1.918579	58.275472
26235	2004	1980	95.83	103	0	1.315553	34.483755
26236	2004	1980	91.67	77	0	1.288922	39.390706
26237	2004	1982	72.73	106.5	0	0.953094	29.173249
26238	1983	1982	100.00	36	0	1.045642	32.141667
26239	2002	1982	30.00	70	0	1.420351	43.343243
26240	2004	1979	60.00	105	0	1.72396	52.42381
26241	2004	1980	70.83	104	0	1.498157	44.657843
26242	1986	1982	100.00	76	0	1.899447	57.651786
26243	1993	1982	90.91	111	0	1.745	46.0952
26244	2000	1982	88.89	103	0	1.270527	38.916062
26245	2002	1979	78.26	100	0	1.769237	54.157269
26248	2004	1979	88.00	106	0	1.122007	34.321402
26249	2002	1982	95.00	119	0	0.901908	27.027234
26250	1987	1983	50.00	47.5	0	1.256215	36.219231
26251	2001	1982	100.00	101	0	1.508776	46.193991
26252	1983	1982	100.00	46	0	1.298823	39.259091
26254	1987	1982	100.00	80	0	2.365924	72.514516
26255	2004	1981	73.91	102.5	0	1.169472	35.724519
26256	1997	1981	81.25	130	0	1.700732	49.581481
26257	2004	1982	22.73	71.4	0	1.50611	42.246032
26258	1994	1982	41.67	92	0	2.660154	80.574194
26259	2004	1981	82.61	125	0	1.572605	47.676496
26260	2004	1982	81.82	194	0	1.189569	36.251389
26261	1987	1982	100.00	86.5	0	1.026737	31.356667
26262	2004	1981	95.65	130	0	1.527019	41.877941
26263	2004	1982	81.82	86.5	0	2.303643	61.651613
Cve_est	AnioMax	AnioMin	% años	HpMaxM	HpMinM	HpPromD	AcumM
26264	2004	1982	63.64	167	0	1.146324	35.054598
26265	2004	1982	95.45	153	0	1.600874	48.981423
26266	1987	1982	60.00	85	0	2.006234	52.330435
26267	1983	1982	0.00	66.5	0	1.189646	36.05
26268	2002	1981	71.43	76	0	2.485763	41.91828
26269	2001	1982	73.68	96.2	0	2.555848	74.570787
26270	2003	1982	66.67	97.5	0	1.142413	31.60625
26271	2002	1982	70.00	150	0	1.565948	46.444048
26272	2002	1982	30.00	85	0	1.218128	37.371429
26273	1983	1982	100.00	88.2	0	3.038383	92.761905
26274	2004	1981	95.65	212	0	1.225344	37.556981
26275	1983	1982	100.00	79.5	0	1.9343	55.2625
26276	1986	1982	100.00	68.6	0	1.319658	40.303922
26277	2002	1982	10.00	65	0	1.085462	32.4875
26278	1999	1982	23.53	61	0	2.462279	72.531481
26279	1993	1983	80.00	115	0	1.941098	44.260204
26281	1991	1982	44.44	74	0	1.136674	34.82963
26282	1988	1983	100.00	53.7	0	0.652912	19.619672
26283	1998	1983	66.67	119.5	0	1.414535	42.653659
26284	1998	1983	66.67	122	0	1.972371	59.254918
26285	2004	1982	36.36	67	0	2.469851	74.064486
26400	1987	1984	100.00	85.3	0	1.795346	51.310256

Anexo 2. Gráficos obtenidos para los escenarios de CJA, Análisis Inicial

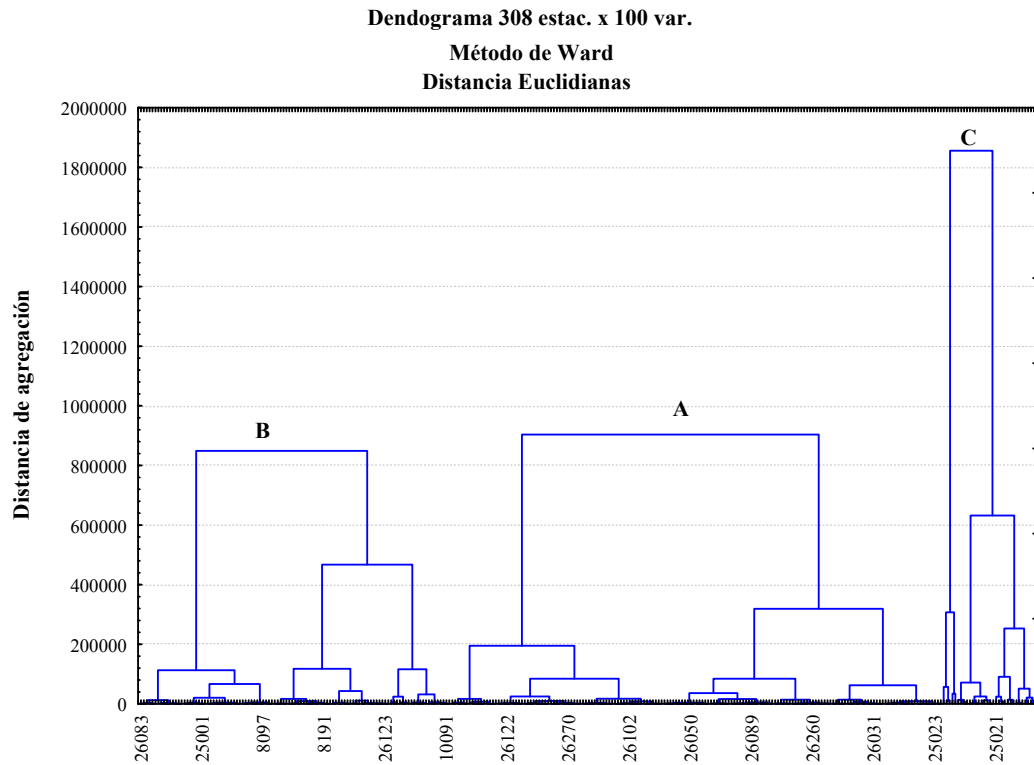


Figura 1.- Dendograma de resultados de la simulación Caos, Análisis Inicial.

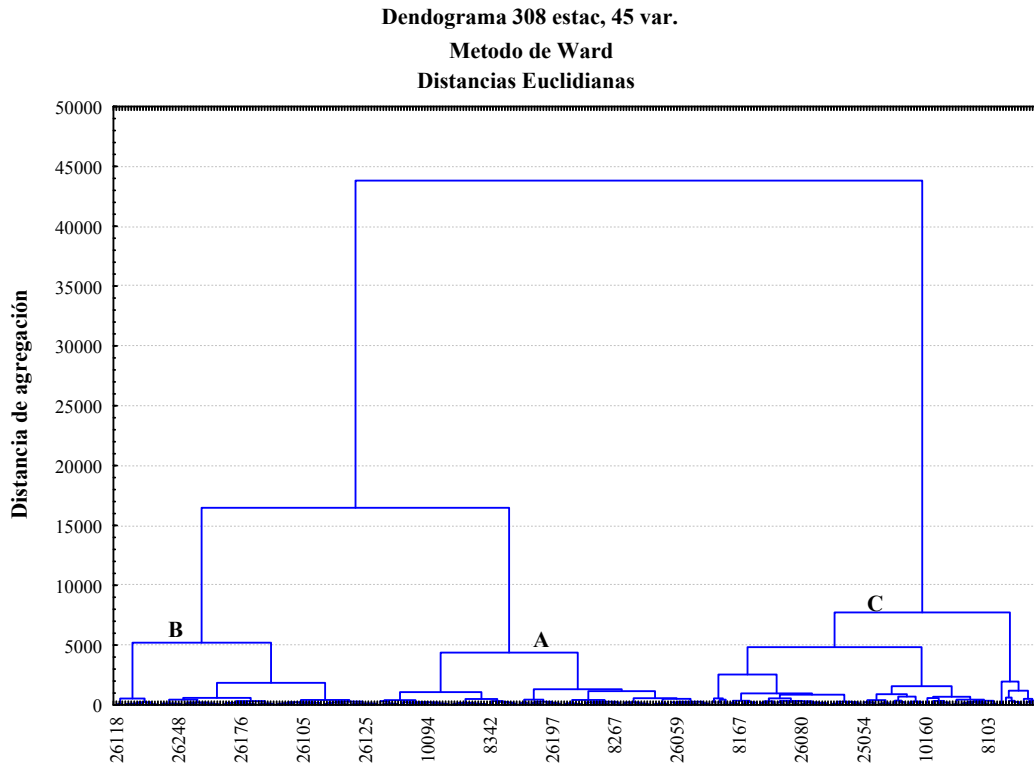
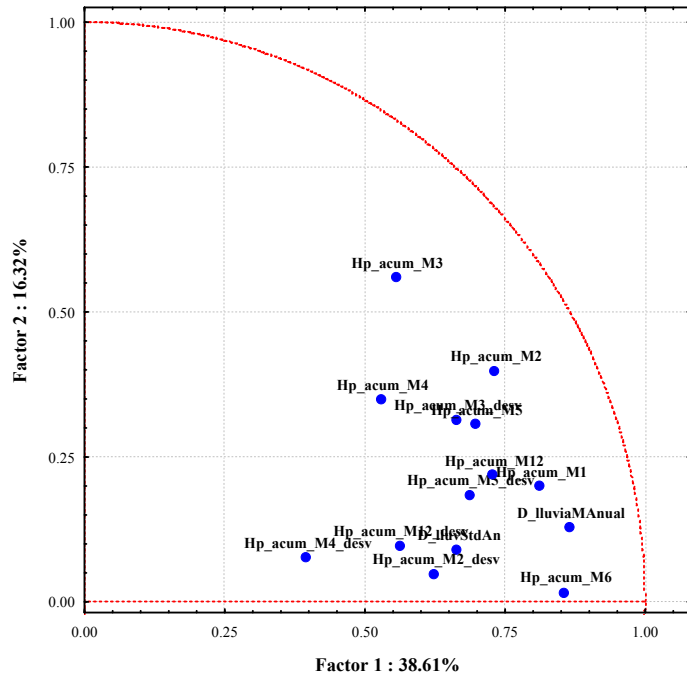
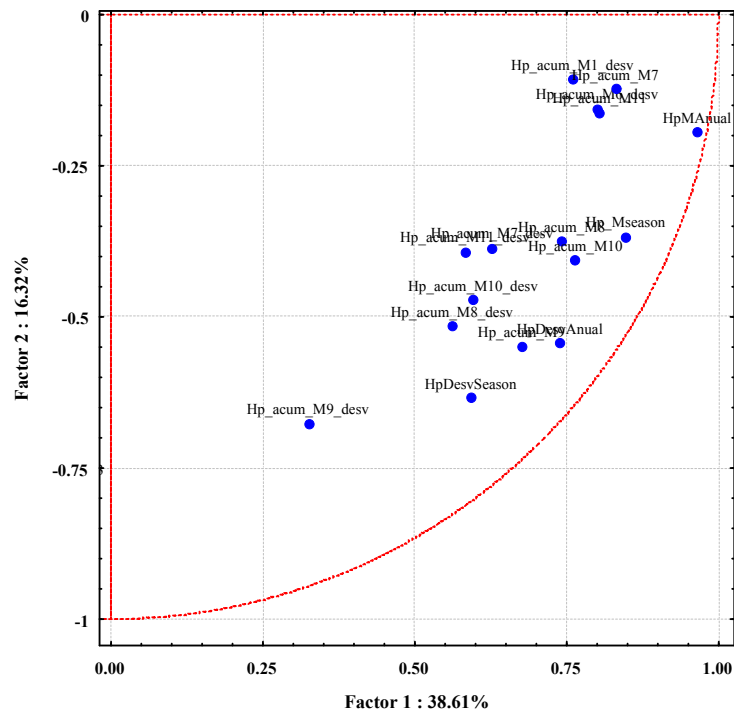


Figura 2.- Gráfica de distancias por pasos, simulación Representativa, Análisis Inicial

Circulo de correlación 45 var.
1er cuadrante



Circulo de correlación 45 var.
2do cuadrante



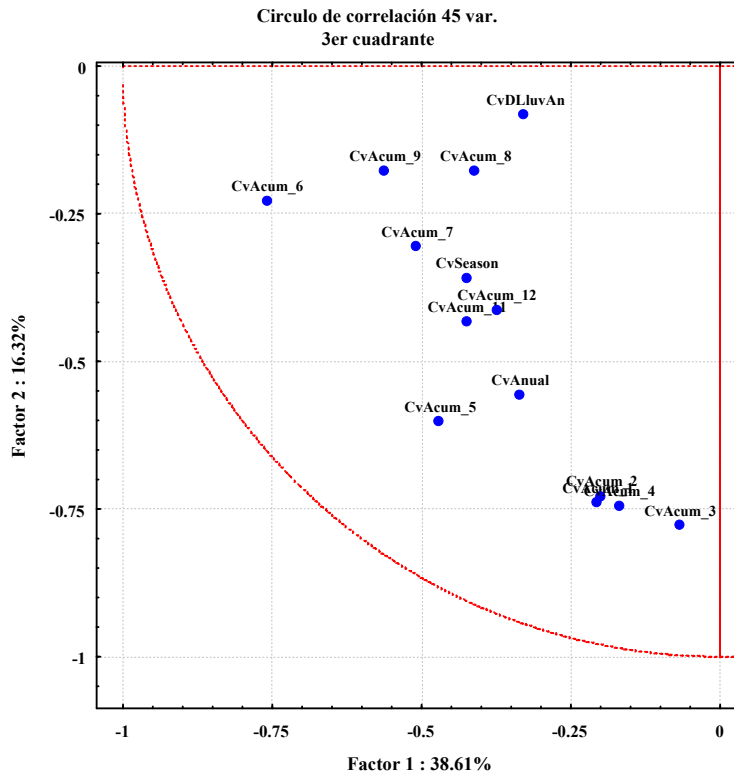
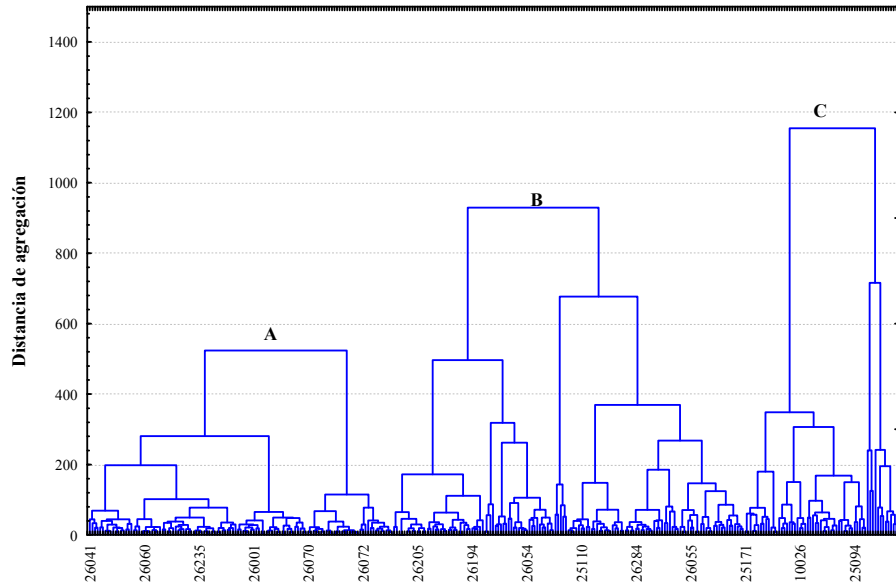


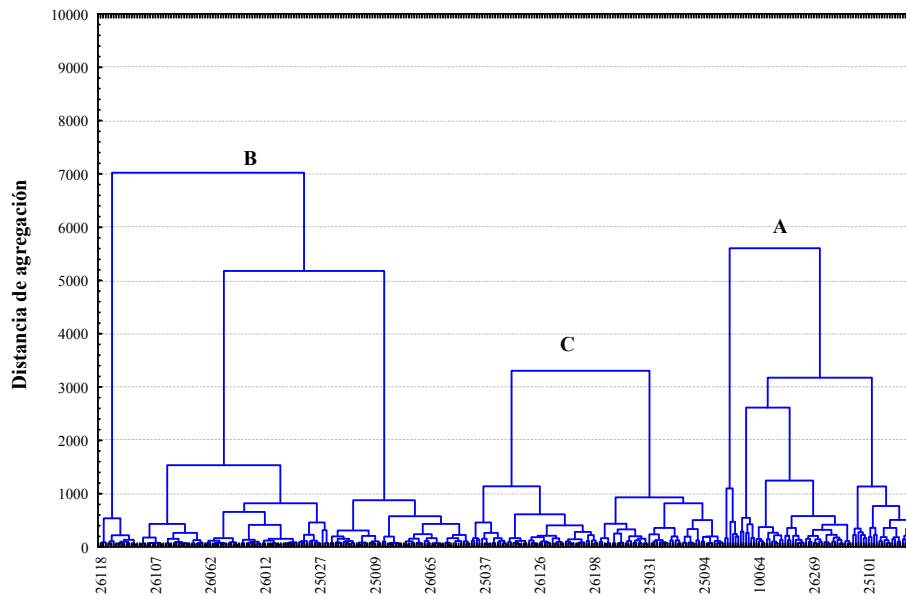
Figura 3.- Detalles del círculo de correlación de 45 variables, simulación Representativa, Análisis Inicial.

Dendograma 308 estac., 14 var.
Método de Ward
Distancia Euclidiana

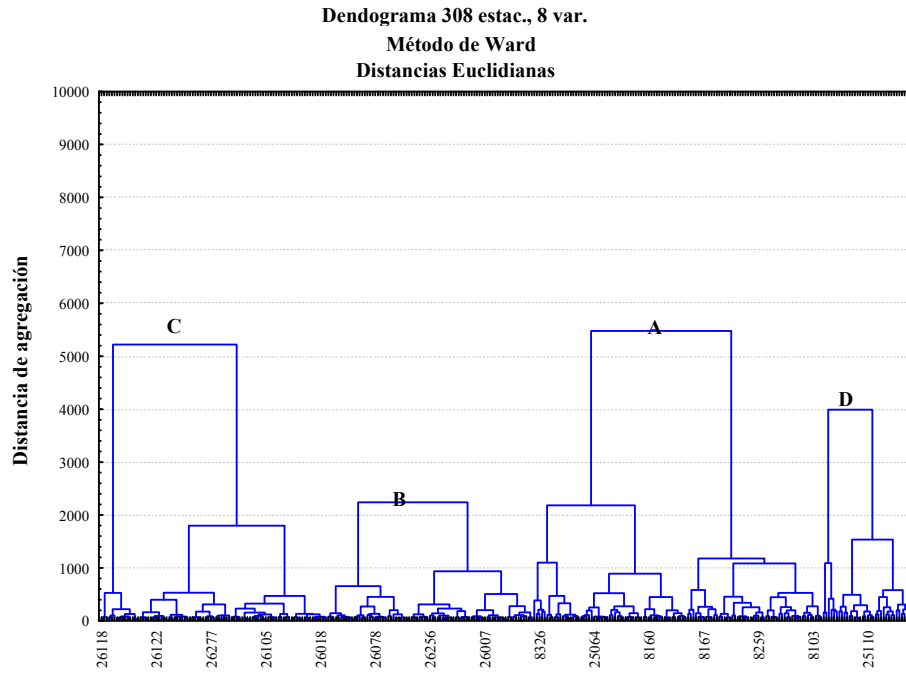


a) 1er cuadrante

Dendograma 308 estac., 16 var.
Método de Ward
Distancias Euclidianas

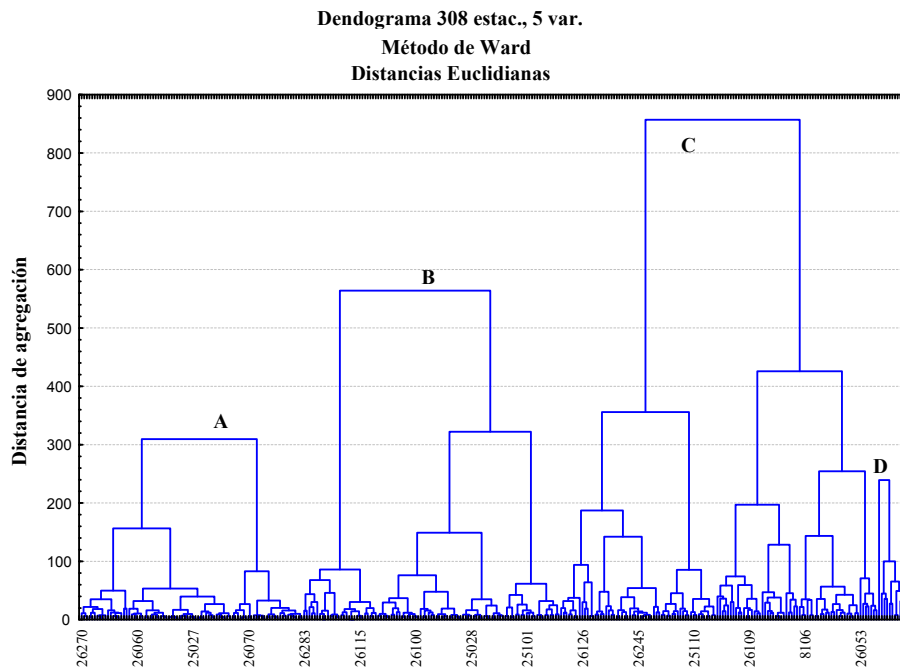


b) 2do cuadrante



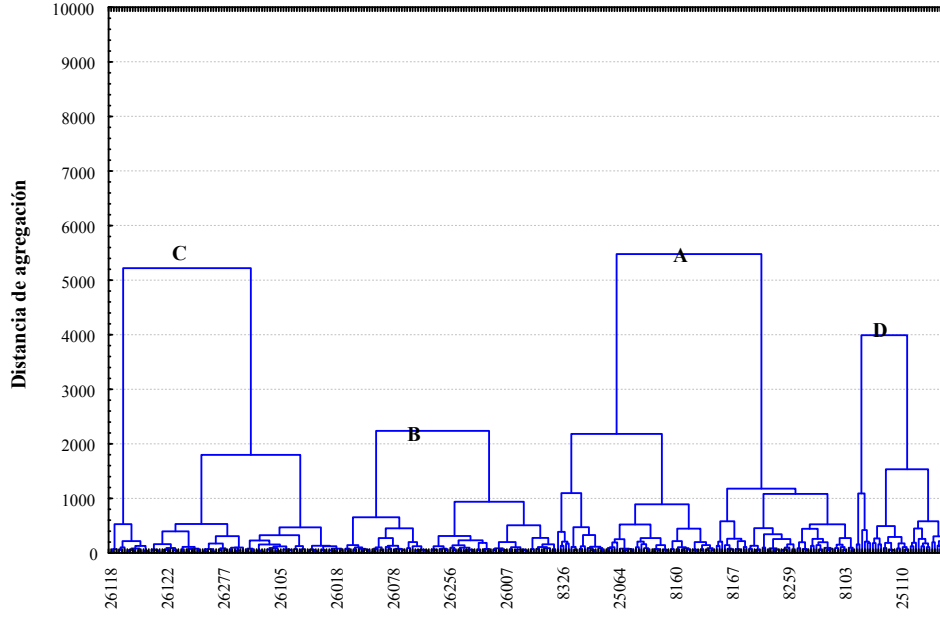
c) 3er cuadrante

Figura 4.- Dendrogramas resultantes de la clasificación CJA para los escenarios 1_CU,2_CU, y 3_CU, Análisis Inicial



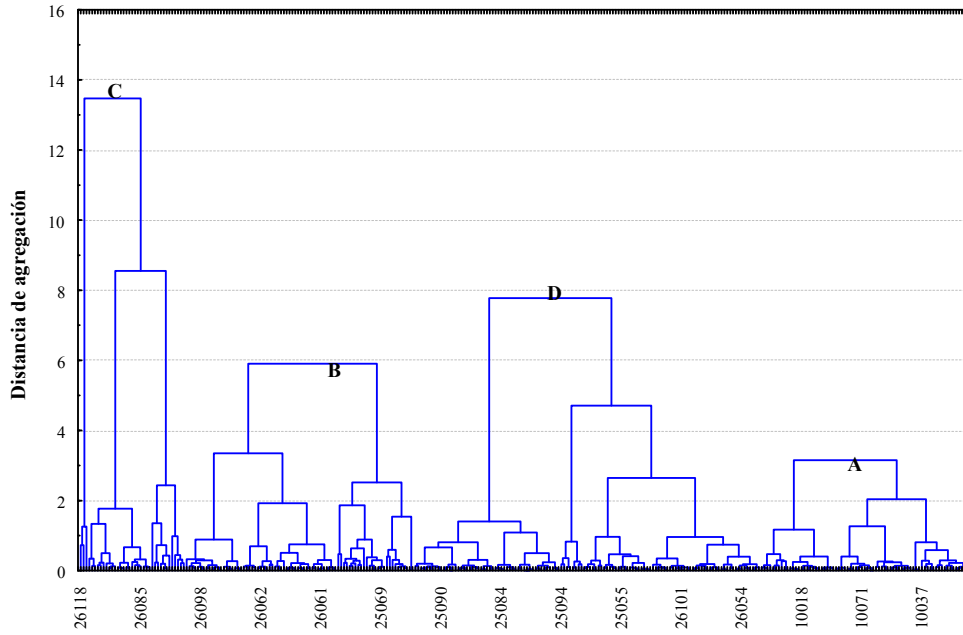
a) 1_CU_80

Dendograma 308 estac., 8 var.
Método de Ward
Distancias Euclidianas



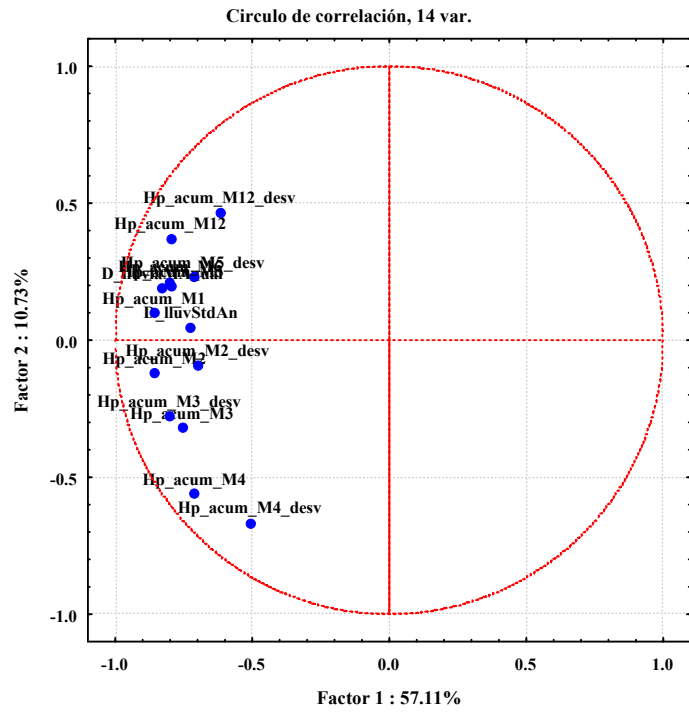
b) 2_CU_80

Dendograma 308 estac., 4 var.
Método de Ward
Distancias Euclidianas

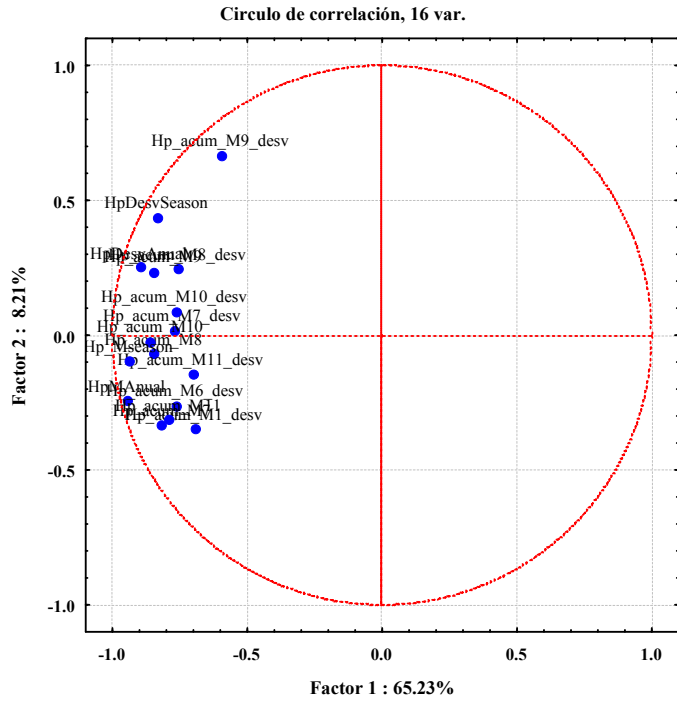


b) 3_CU_70

Figura 5.- Dendogramas resultantes de la clasificación CJA para los escenarios 1_CU_80, 2_CU_80 y 3_CU_70, Análisis Inicial



a) 1_CU_80



b) 2_CU_80

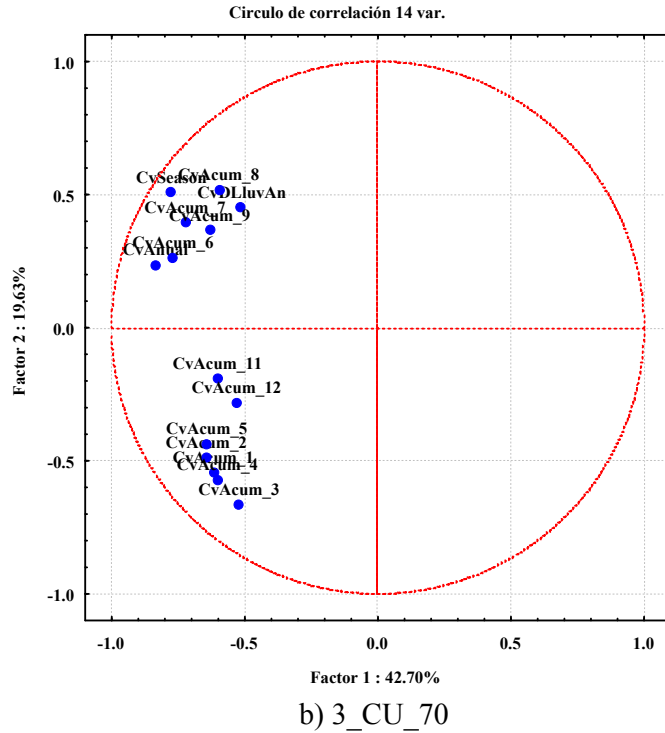


Figura 6.- Círculos de correlación asociados a los ACP para los escenarios 1_CU_80, 2_CU_80 y 3_CU_70, Análisis Inicial

Anexo 3. Procesamiento de información de superficie

Tabla 1. Tormentas escasas y ligeras, EMAs Alamos, mes de julio

No.	Nom_tormenta	Lamina
1	06/07/1999 03:40 - 03:50	0.5000
2	08/07/1999 05:20 - 05:30	1.27
3	08/07/1999 08:40 - 08:50	0.5
4	12/07/1999 06:10 - 06:20	0.5
5	14/07/1999 06:30 - 06:40	0.5
6	16/07/2000 04:20 - 04:30	0.5
7	21/07/2000 03:00 - 03:10	1.78
8	21/07/2000 06:00 - 06:10	0.5
9	24/07/2000 23:50 - 00:00	1.01
10	09/07/2001 10:30 - 10:40	0.76
11	16/07/2001 22:50 - 23:00	2.8
12	25/07/2001 09:10 - 09:20	0.5
13	27/07/2001 19:10 - 19:20	1.78
14	27/07/2001 23:10 - 23:20	3.81
15	28/07/2001 22:30 - 22:40	2.03
16	31/07/2001 14:20 - 14:30	0.5
17	12/07/2002 20:10 - 20:20	2.29
18	19/07/2002 09:10 - 09:20	0.5
19	20/07/2002 12:50 - 13:00	0.5
20	25/07/2002 00:00 - 00:10	0.5
21	25/07/2002 00:40 - 00:50	0.5
22	09/07/2003 00:30 - 00:40	1.27
23	15/07/2003 23:20 - 23:30	1.01
24	19/07/2003 02:50 - 03:00	0.5
25	22/07/2003 04:20 - 04:30	5.33
26	22/07/2003 05:10 - 05:20	1.27
27	27/07/2003 02:30 - 02:40	0.5
28	28/07/2003 02:30 - 02:40	0.5
29	05/07/2004 03:10 - 03:20	3.56
30	06/07/2004 05:20 - 05:30	0.5
31	07/07/2004 01:30 - 01:40	0.5
32	07/07/2004 02:20 - 02:30	0.5
33	15/07/2004 08:10 - 08:20	0.5
34	22/07/2004 05:50 - 06:00	0.5
35	22/07/2004 06:20 - 06:30	0.5
36	23/07/2004 03:10 - 03:20	2.54
37	23/07/2004 05:20 - 05:30	0.76
38	13/07/2005 02:20 - 02:30	0.76
39	18/07/2005 22:40 - 22:50	5.84
40	19/07/2005 03:30 - 03:40	0.5
41	21/07/2005 21:30 - 21:40	2.29
42	21/07/2005 22:10 - 22:20	9.14
43	22/07/2005 05:00 - 05:10	3.3
44	22/07/2005 05:40 - 05:50	0.5
45	22/07/2005 17:20 - 17:30	0.76
46	27/07/2005 05:50 - 06:00	0.5
47	10/07/2006 02:00 - 02:10	1.27
48	10/07/2006 03:10 - 03:20	0.5
49	24/07/2006 04:40 - 04:50	3.81
50	28/07/2006 01:00 - 01:10	0.5
51	28/07/1999 01:00 - 01:20	3.8100
52	22/07/2000 04:30 - 04:50	0.75
53	30/07/2000 23:10 - 23:30	1.01

54	09/07/2001 09:00 - 09:20	0.75
55	25/07/2001 08:30 - 08:50	0.75
56	25/07/2001 23:10 - 23:30	4.31
57	29/07/2001 01:20 - 01:40	0.75
58	31/07/2001 01:30 - 01:50	1.01
59	12/07/2002 10:50 - 11:10	0.75
60	20/07/2002 04:10 - 04:30	1.01
61	20/07/2002 10:00 - 10:20	3.55
62	24/07/2002 01:20 - 01:40	0.75
63	30/07/2002 02:50 - 03:10	9.91
64	20/07/2003 00:20 - 00:40	1.77
65	22/07/2003 05:40 - 06:00	0.75
66	31/07/2003 04:30 - 04:50	5.59
67	07/07/2004 03:50 - 04:10	0.75
68	20/07/2004 21:50 - 00:10	1.78
69	23/07/2004 03:40 - 04:00	2.28
70	23/07/2004 08:30 - 08:50	0.75
71	23/07/2004 10:50 - 11:10	2.03
72	04/07/2005 00:00 - 00:20	5.84
73	17/07/2005 22:40 - 23:00	3.81
74	18/07/2005 23:10 - 23:30	3.3
75	01/07/2006 00:50 - 01:10	3.56
76	03/07/2006 02:40 - 03:00	0.75
77	03/07/2006 15:10 - 15:30	0.75
78	10/07/2006 01:20 - 01:40	15.74
79	15/07/2006 01:10 - 01:30	7.11
80	20/07/2006 03:30 - 03:50	4.83
81	23/07/2006 00:50 - 01:10	6.09
82	28/07/2006 04:30 - 04:50	0.75
83	28/07/2006 23:20 - 23:40	1.52
84	06/07/1999 02:50 - 03:20	1.0000
85	07/07/1999 22:30 - 23:00	2.53
86	11/07/1999 07:50 - 08:20	1
87	16/07/1999 21:00 - 21:30	8.64
88	01/07/2000 02:40 - 03:10	1
89	23/07/2000 05:50 - 06:20	1
90	03/07/2001 22:40 - 23:10	5.83
91	09/07/2001 05:30 - 06:00	5.33
92	30/07/2001 20:50 - 21:20	4.06
93	19/07/2002 07:50 - 08:20	1
94	24/07/2002 23:10 - 23:40	1.51
95	01/07/2003 22:00 - 22:30	8.89
96	09/07/2003 16:00 - 16:30	2.02
97	23/07/2004 09:50 - 10:20	2.03
98	16/07/2005 07:10 - 07:40	9.4
99	22/07/2005 18:20 - 18:50	4.06
100	04/07/2006 02:30 - 03:00	1
101	28/07/2006 02:30 - 03:00	1
102	30/07/2006 22:10 - 22:40	4.83
103	05/07/1999 23:00 - 23:40	2.5300
104	27/07/1999 04:00 - 04:40	1.51
105	06/07/2000 02:20 - 03:00	1.51
106	04/07/2001 00:00 - 00:40	1.51
107	05/07/2001 22:40 - 23:20	3.8

108	29/07/2001 00:00 - 00:40	1.25
109	31/07/2003 05:40 - 06:20	1.51
110	07/07/2004 00:30 - 01:10	6.34
111	13/07/2004 01:00 - 01:40	7.36
112	24/07/2005 00:40 - 01:20	7.62
113	27/07/2005 02:30 - 03:10	9.39
114	24/07/2006 06:00 - 06:40	5.33
115	28/07/2006 00:00 - 00:40	1.51
116	06/07/1999 00:00 - 00:50	2.01
117	08/07/1999 04:10 - 05:00	6.08
118	09/07/1999 21:50 - 22:40	5.08
119	22/07/1999 20:20 - 21:10	8.37
120	21/07/2000 03:40 - 04:30	8.13
121	28/07/2000 05:30 - 06:20	5.84
122	26/07/2001 03:00 - 03:50	6.1
123	27/07/2001 00:40 - 01:30	6.08
124	20/07/2002 03:00 - 03:50	1.76
125	22/07/2004 06:50 - 07:40	5.58
126	22/07/2004 11:10 - 12:00	1.5
127	23/07/2004 01:40 - 02:30	10.15
128	09/07/2006 00:50 - 01:40	9.4
129	14/07/2006 04:40 - 05:30	8.39
130	27/07/1999 05:00 - 06:00	3.0500
131	29/07/2001 02:00 - 03:00	2.01
132	28/07/2003 00:50 - 01:50	7.11
133	28/07/2003 23:30 - 00:30	3.31
134	13/07/2004 03:50 - 04:50	3.29
135	03/07/2006 03:20 - 04:20	2.01
136	06/07/1999 01:20 - 02:30	2.2600
137	12/07/1999 03:50 - 05:00	3.54
138	07/07/2000 00:40 - 01:50	2.52
139	20/07/2002 07:40 - 08:50	7.6
140	31/07/2000 01:20 - 02:50	3.0100
141	16/07/2006 01:40 - 03:10	3.28
142	27/07/2005 03:40 - 05:30	4.3
143	10/07/2006 04:00 - 06:00	3.77
144	19/07/2002 09:40 - 11:50	6.62

Tabla 2.- Datos estadísticos sobre la identificación de tormentas registradas por la EMA
Álamos, mes Junio

Fecha	20	30	40	50	60	70	80	90	110	130
Jun-99	3	2		2	1		1			
Jun-00	3		2	2	2	1				
Jun-01	1	1		1					1	
Jun-02	1									
Jun-03	3	1			1					1
Jun-04			2	1	1					
Jun-05										
Jun-06	3	1	2				1	1		
Jun-07										
# Tormentas	14	5	6	6	5	1	2	1	1	1
# Promedio	2.33	1.25	2	1.5	1.25	1	1	1	1	1

Lamina_acum											
Max, mm	7.36	7.36	11.42	21.08	38.1	3.55	18.29	5.57	27.69	4.81	
Lamina_acum											
Prom, mm	2.446	4.774	5.162	10.115	14.062	3.550	10.795	5.570	27.690	4.810	
Desv.Est.											
Lamina	2.098	2.073	3.359	7.139	14.849	0.000	7.495	0.000	0.000	0.000	
Probabilidad	0.33	0.12	0.14	0.14	0.12	0.02	0.05	0.02	0.02	0.02	
I mm/hr	7.339	9.548	7.743	12.138	14.062	3.043	8.096	3.713	15.104	2.220	

Tabla 3.- Datos estadísticos sobre la identificación de tormentas registradas por la EMA
Álamos, mes Agosto

Fecha	20	30	40	50	60	90	120	150	170	230	270
Ago-99	3	7	2	4	2	3					
Ago-00	6	2	4		4	2	4	2			
Ago-01	2	2	1		2					1	1
Ago-02	4	1	2	3	3	2					
Ago-03	4	2	2	3	1	3	1	1			
Ago-04	4	3	1	2		5		1	1		
Ago-05	4		4	4	1		1	2			
Ago-06	5	3	6	1	1	1					
Ago-07											
# Tormentas	32	20	22	17	14	16	6	6	1	1	1
# Promedio	4	2.86	2.75	2.83	2.00	2.67	2	1.5	1	1	1
Lamina_acum											
Max, mm	7.11	17.53	18.53	23.1	30.74	54.86	37.6	44.17	6.06	20.8	38.34
Lamina_acum											
Prom, mm	1.99	4.37	4.99	7.16	13.13	24.74	15.62	25.18	6.06	20.80	38.34
Desv.Est.											
Lamina	1.93	4.45	5.08	6.35	10.32	18.43	14.25	18.69	0.00	0.00	0.00
Probabilidad	0.24	0.15	0.16	0.13	0.10	0.12	0.04	0.04	0.01	0.01	0.01
I mm/hr	5.97	8.73	7.49	8.60	13.13	16.50	7.81	10.07	2.14	5.43	8.52

Tabla 4.- Datos estadísticos sobre la identificación de tormentas registradas por la EMA
Álamos, mes Septiembre

Fecha	20	30	40	50	60	90	120	150	210	400
Sep-99	4		1				1			
Sep-00	5	2		1	2	1	1			
Sep-01	3		4	1					1	
Sep-02	3	2	2	3		3		1		
Sep-03	8	1	1	1	1	2	1			
Sep-04	2	2	4		2	1				1
Sep-05	1				2					
Sep-06	5	4		1	1	2				
Sep-07										
# Tormentas	31	11	12	7	8	9	3	1	1	1
# Promedio	3.875	2.2	2.4	1.4	1.6	1.8	1	1	1	1
Lamina_acum										
Max, mm	9.4	9.4	31.49	27.94	26.91	14.97	30.21	9.88	15.49	28.45
Lamina_acum										
Prom, mm	1.65	3.94	5.35	7.94	14.76	6.14	14.04	9.88	15.49	28.45

Desv.Est. Lamina	2.01	2.66	8.45	8.46	10.01	4.90	14.21	0.00	0.00	0.00
Probabilidad	0.37	0.13	0.14	0.08	0.10	0.11	0.04	0.01	0.01	0.01
I mm/hr	4.95	7.89	8.02	9.53	14.76	4.09	7.02	3.95	4.43	4.27

Tabla 5.- Datos estadísticos sobre la identificación de tormentas registradas por la EMA Basesachi, mes Junio

		Duraciones (min) / Num. Tormentas								
		20	30	40	50	60	90	120	150	210
Jun-99		1		2		1		1		
Jun-00		14	6	5	1	1	4			
Jun-01		6	3	2	2	4	2	1	1	
Jun-02		1	2	1		3	1	1	1	
Jun-03		8	3	6	1	3	1	1	1	
Jun-04		5	2	3	3	1	1			
Jun-05		1	8	1	1	1	1	2		1
Jun-06		7	7	4	5	7	1	2		
# Tormentas		43	31	24	13	21	11	8	3	1
# Promedio		5.38	4.43	3.00	2.17	2.63	1.57	1.33	1	1
Lamina_acum Max, mm		10.48	10.48	26.65	10.27	8.96	42.60	18.76	8.73	11.57
Lamina_acum Prom, mm		1.40	2.04	4.51	3.70	4.41	11.59	9.03	8.51	11.57
Desv.Est. Lamina		1.78	2.60	5.81	3.15	2.73	13.33	5.40	0.31	0.00
Probabilidad				0.30	0.16	0.26	0.14	0.10	0.04	0.01
I mm/hr		4.19	4.07	6.76	4.45	4.41	7.73	4.51	3.40	3.30

Tabla 6.- Datos estadísticos sobre la identificación de tormentas registradas por la EMA Basesachi., mes Julio

		Duraciones (min) / Num. Tormentas									
		20	30	40	50	60	90	120	150	180	240
Jul-99		16	8	8	3	1	2				
Jul-00		22	13	4	4	3	3	1	1		
Jul-01		15	11	8	10	9	2		1	1	
Jul-02		6	6	2	2	1	1	1			
Jul-03		18	8	3	4	2	4	2			
Jul-04			3	2	6	1	3				
Jul-05		11	7	10		2	3				1
Jul-06		13	10	4	2	3	3	1			
# Tormentas		100	62	44	28	21	21	4	2	1	1
# Promedio		12.50	7.75	5.50	3.50	2.63	2.63	1	1	1	1
Lamina_acum Max, mm		8.74	8.74	15.51	25.34	31.45	44.56	40.21	6.11	13.55	10.48
Lamina_acum Prom, mm		1.03	1.93	3.93	6.04	7.74	8.82	15.32	5.92	13.55	10.48
Desv.Est. Lamina		1.18	1.89	3.61	6.45	8.35	10.34	12.78	0.23	0.00	0.00
Probabilidad		0.35	0.22	0.15	0.10	0.07	0.07	0.01	0.01	0.00	0.00
I mm/hr		3.09	3.87	5.90	7.25	7.74	5.88	7.66	2.37	4.52	2.62

Tabla 7.- Datos estadísticos sobre la identificación de tormentas registradas por la EMA Basesachi, mes Agosto

Duraciones (min) / Num. Tormentas								
	20	30	40	50	60	90	150	180
Ago-99	10	9	1	1	1	2		1
Ago-00	12	9	5	2	2		1	1
Ago-01	13	10	6	5	3	2		
Ago-02	1						1	
Ago-03	9	7	2	1	4	2		
Ago-04								
Ago-05	11	13	3	8	5			
Ago-06	25	10	4	3	5	8		
# Tormentas	81	58	21	20	20	14	3	2
# Promedio	11.57	9.67	3.50	3.33	3.33	3.50	1	1
Lamina_acum Max, mm	8.52	12.89	17.47	16.82	25.77	7.64	5.44	23.37
Lamina_acum Prom, mm	1.09	2.87	3.88	4.50	5.19	4.75	4.64	16.04
Desv.Est. Lamina	1.14	3.42	4.00	4.94	5.73	1.79	0.76	7.32
Probabilidad	0.37	0.26	0.10	0.09	0.09	0.06	0.01	0.01
I mm/hr	3.27	5.74	5.82	5.41	5.19	3.17	1.86	5.35

Tabla 7.- Datos estadísticos sobre la identificación de tormentas registradas por la EMA Basesachi, mes Septiembre

Duraciones (min) / Num. Tormentas										
	20	30	40	50	60	90	120	150	210	300
Sep-99	6	7	3	1	3	3			1	
Sep-00	7	3	2	1	4	2	2	1		
Sep-01	5	1	5		4	2	1			
Sep-02	7		1			1				1
Sep-03	6	2	2	1	1	2				
Sep-04	9	3	1		1			1		
Sep-05	3	2	3	1	1		1			
Sep-06	10	3	3		2	1		1	1	
# Tormentas	53	21	20	4	16	11	4	3	2	1
# Promedio	6.63	3.00	2.50	1.00	2.29	1.83	1.33	1	1	1
Lamina_acum Max, mm	3.49	13.32	20.10	4.15	29.05	24.45	16.82	24.25	13.55	19.41
Lamina_acum Prom, mm	0.73	2.65	4.33	2.91	7.91	6.65	11.68	14.56	11.50	19.41
Desv.Est. Lamina	0.63	2.92	5.55	1.13	7.68	6.32	5.28	8.45	2.09	0.00
Probabilidad	0.39	0.16	0.15	0.03	0.12	0.08	0.03	0.02	0.01	0.01
I mm/hr	2.19	5.29	6.50	3.49	7.91	4.43	5.84	5.82	3.29	3.88

Anexo 4. Evolución de tormentas obtenidas con base en imágenes de satélite.

Tabla 1. Base de datos de áreas trazadas para la tormenta 07/07/04

Hora	- 110° C - -90° C	- 90° C - -70° C	- 70° C - -50° C	- 50° C - -32° C
20:06			1553.08	1265.38
20:19			2296.14	1233.39
20:36			3734.34	1897.82
20:51			5055.54	2446.04
21:19		953.83	8835.64	3642.52
21:36		1862.97	10982.15	4046.11
21:49		3461.59	11714.49	4804.64
22:06		19405.13	27128.59	13146.85
22:19		24194.04	24596.43	13949.12
22:36	136.60	30468.57	31418.02	16819.69
22:49	459.46	33102.20	33885.36	17118.30
23:06	516.23	38686.67	36475.60	23606.44
23:19		42937.80	41494.83	23295.71
23:36	675.12	53523.44	45815.43	29866.73
23:51	3000.15	57177.44	39606.77	28532.33
00:49	2300.23	91672.67	57860.24	52468.69
01:06	1037.07	95659.46	61641.24	42230.64
01:19		94743.47	72400.40	54779.07
01:36		95475.19	73857.77	53873.74
01:49		96621.28	72398.29	65007.79
02:06		97120.61	74450.67	67436.55

02:19		90993.24	92950.06	68999.70
02:34		177486.01	3645.36	61538.28
02:51		75908.72	106601.66	57891.84
03:20		71289.35	104458.66	70375.63
03:34	1300.51	77008.26	130463.54	80538.68
03:49	1100.29	64238.92	144110.16	81521.13
04:04		32440.39	104603.49	83372.87
04:19		30597.35	109107.49	82267.10
04:34		25782.52	124957.45	100241.82
04:50		23733.12	111944.77	115644.03
05:04		22562.13	101500.85	105653.45
05:20		15487.47	85411.56	88688.12
05:34		9624.45	75874.53	78956.62
05:51		5462.54	60500.26	62781.25
Hora	- 110° C --90°C	- 90° C --70°C	- 70° C --50°C	- 50° C --32°C
06:19		2501.26	50563.12	54213.49
06:34			28576.48	30003.12
06:50			19554.66	21574.10
07:04			6751.23	8541.25

Tabla 2. Base de datos de los ejes mayor y menos trazados para la tormenta 07/07/04

Hora	Eje mayor	Eje menor
20:06	77.98	44.36
20:19	93.82	51.48
20:36	117.35	56.68
20:51	149.37	56.69
21:19	157.15	130.65
21:36	186.43	133.35
21:49	211.74	152.75
22:06	210.41	453.93
22:19	232.97	436.12
22:36	346.53	489.36
22:49	360.75	488.14
23:06	359.92	562.94
23:19	532.19	553.24
23:36	543.32	620.48
23:51	550.50	509.79
00:49	794.15	541.66
01:06	795.40	524.32
01:19	802.44	424.18
01:36	794.15	419.61
01:49	774.81	431.50

02:06	776.16	421.58
02:19	766.86	406.19
02:34	690.68	418.09
02:51	679.07	409.73
03:20	767.62	402.69
03:34	771.82	435.85
03:49	726.08	441.30
04:04	839.38	458.90
04:19	830.45	424.64
04:34	738.67	418.88
04:50	745.09	428.08
Hora	Eje mayor	Eje menor
05:04	700.35	400.12
05:20	600.48	380.52
05:34	550.25	250.41
05:51	430.21	200.86
06:19	300.25	180.25
06:34	245.33	125.48
06:50	180.75	100.56
07:04	100.05	50.50

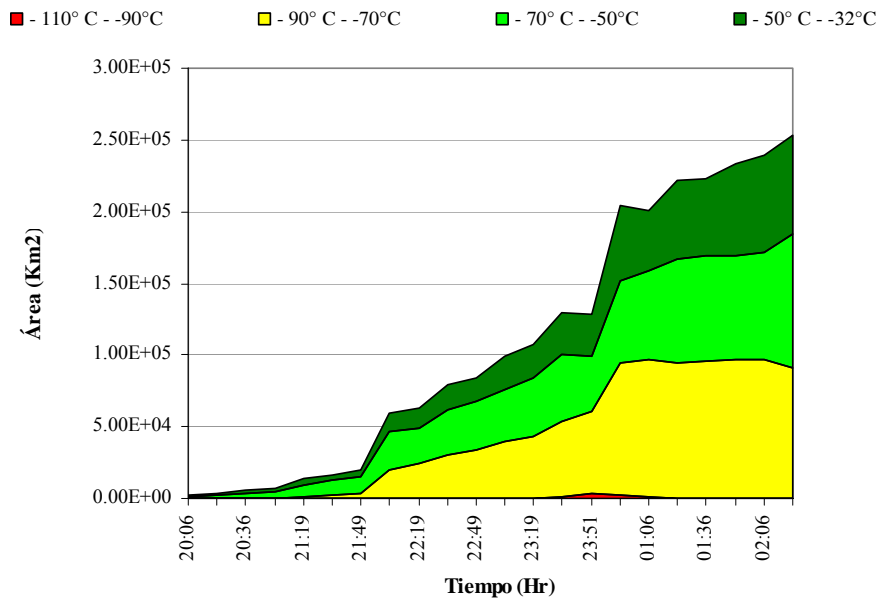


Figura 1.- Áreas de cobertura nubosa de la tormenta 07/07/04 - rangos de temperatura. Periodo cercano a la ocurrencia de lluvia

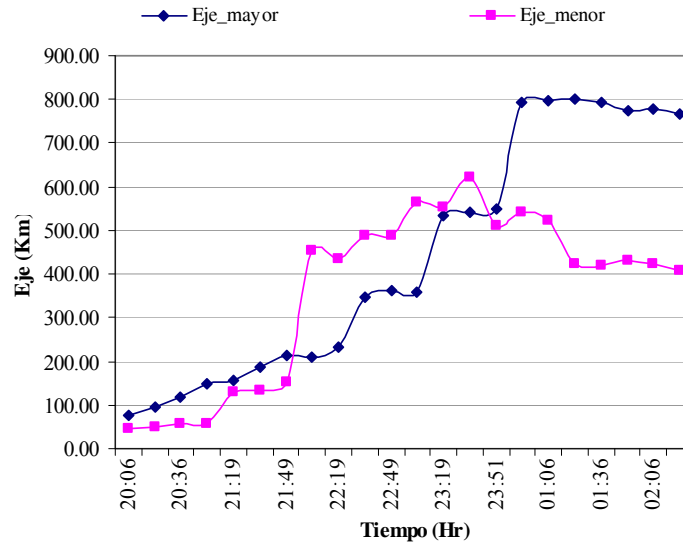


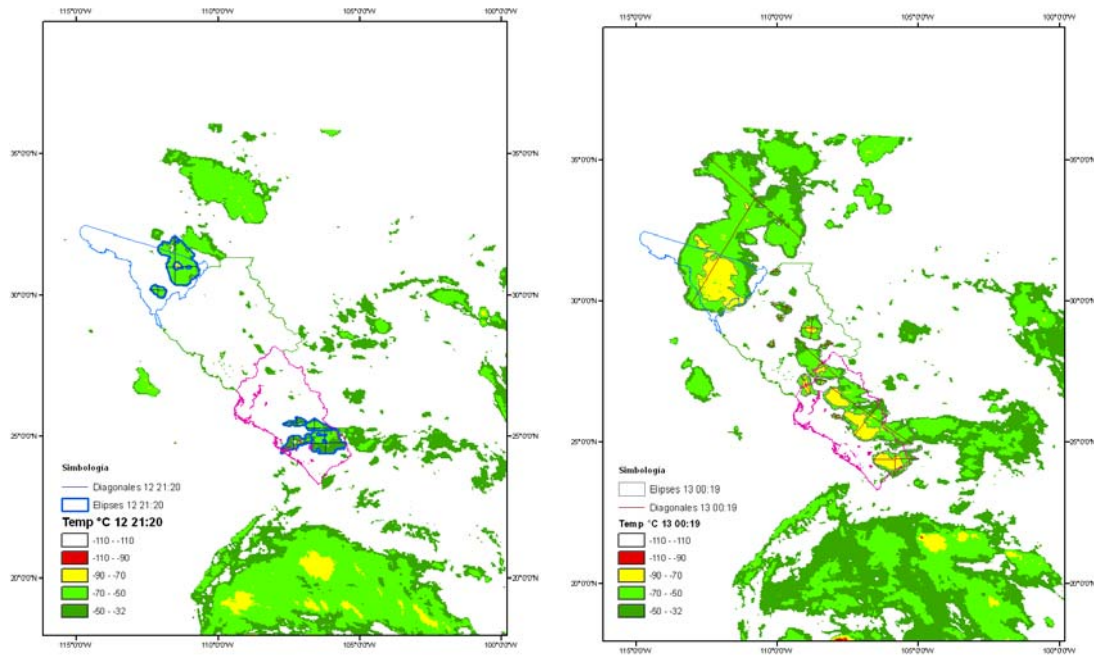
Figura 2.- Longitudes de los ejes mayor y menos trazados para la tormenta 07/07/04. Periodo cercano a la ocurrencia de lluvia

Tormenta 13/07/04

Se analizaron 24 imágenes a cada 15 min. aprox. comprendidas entre las 21:20 hr del día 12 de julio hasta las 04:04 hr del siguiente día. En la figura 3 se presentan tres de estas imágenes del inicio, mitad y el fin de la tormenta.

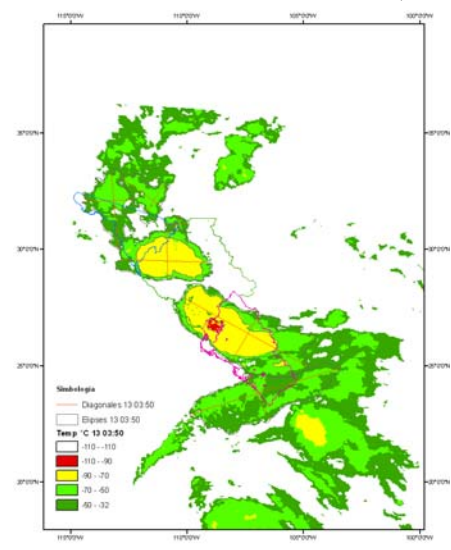
En la figura 4-a se presentan el total de las diagonales de las elipses dibujadas para las imágenes de la tormenta en cuestión, así como los 2 sistemas convectivos identificados. Ambos con orientación noroeste sin embargo en dirección contraria, ya que el sistema nombrado Sistema 2 se origino en el norte de Sonora, y se curveo ligeramente en la aproximación a la Sierra Madre. El sistema 1 se desarrollo en forma paralela a la costa de Sinaloa., es este caso se presentaron fusiones de 7 núcleos fríos.

En la figura 4-b, se muestra la forma en la cual fueron relacionadas las elipses con sus diagonales. Se resaltaban las elipses para identificar el número que se le había asignado ya que esta misma numeración se tomó para las diagonales mayores y menores, en el mismo instante de tiempo.



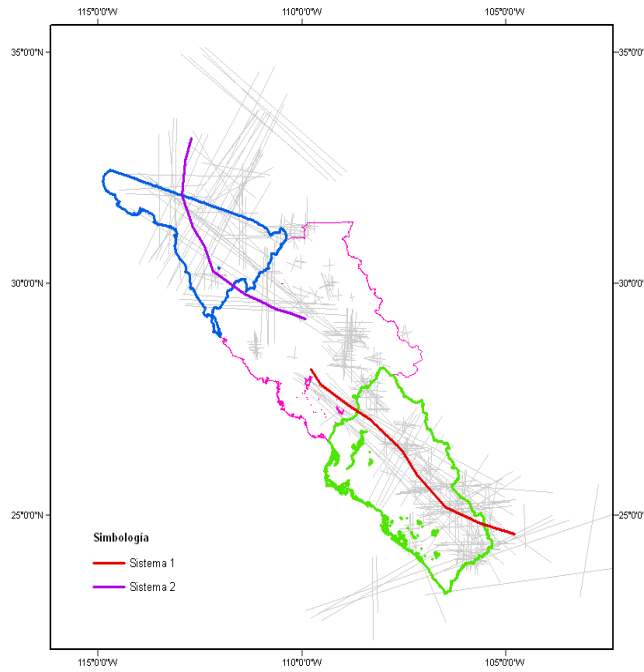
a) 21:20 hr. 12/07/04

b) 00:19 hr. 13/07/04

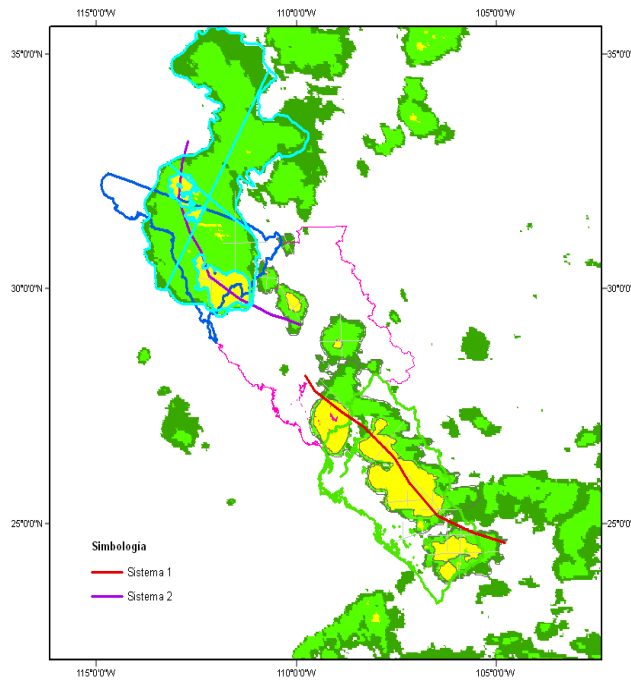


c) 03:50 13/07/04

Figura 3. Muestra de las características de la tormenta del 13/07/04



a) Trayectoria de los sistemas nubosos



b) Ejemplo de asociación de elipses y diagonales.

Figura 4. Etapas del proceso de análisis

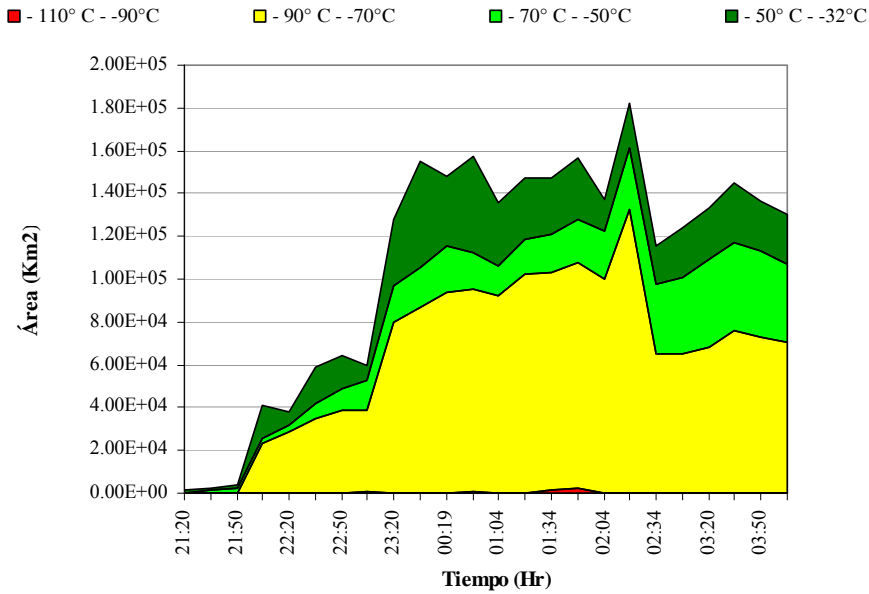


Figura 5.- Áreas de cobertura nubosa de la tormenta 13/07/04 - los rangos de temperatura empleados en el estudio. Periodo cercano a la ocurrencia de lluvia

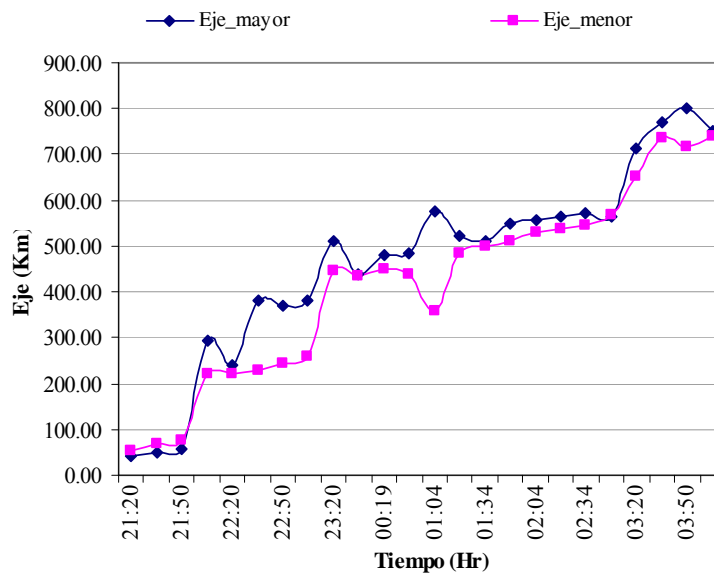


Figura 6.- Longitudes de los ejes mayor y menos trazados para la tormenta 13/07/04. Tormenta 22/07/2005

Se analizaron 23 imágenes a cada 15 min. aprox. comprendidas entre las 21:14 hr del día 21 de julio hasta las 03:29 hr del día 22 de julio. Se encontraron 4 sistemas convectivos principales orientados al noroeste aunque en dirección contraria (figura 7), ocurrieron fusiones de los sistemas 2,3 y 4, los cuales se originaron al norte de Sonora. Estos sistemas se desarrollaron en forma paralela a la línea costera encontrándose cerca

de la frontera norte de Sinaloa. Esta fecha corresponde a la retirada de la depresión tropical Emily y un sistema de baja presión afectado al norte de Sonora.

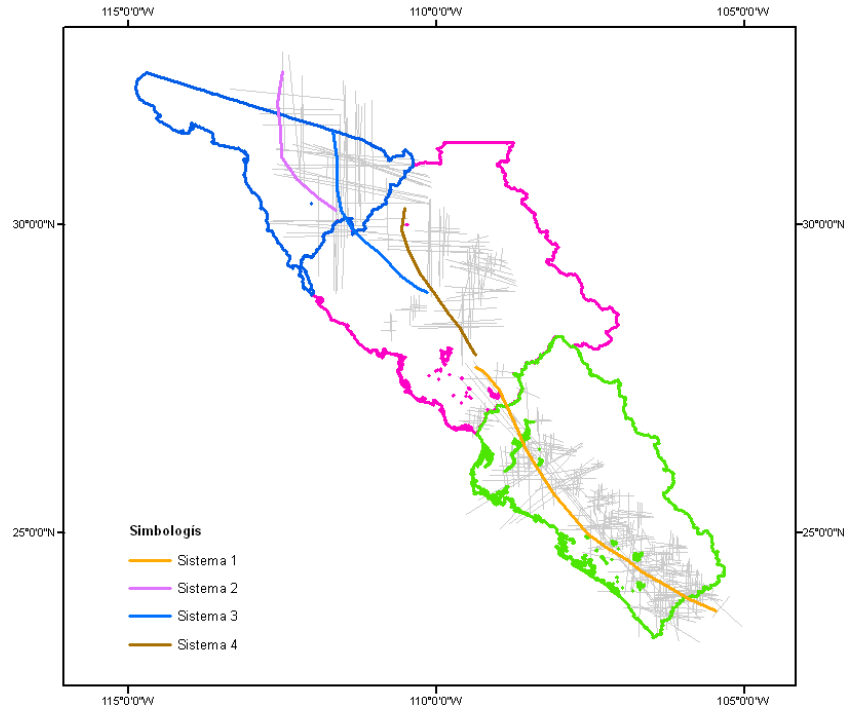


Figura 7. Trayectoria de los sistemas nubosos, tormenta 22/07/2005

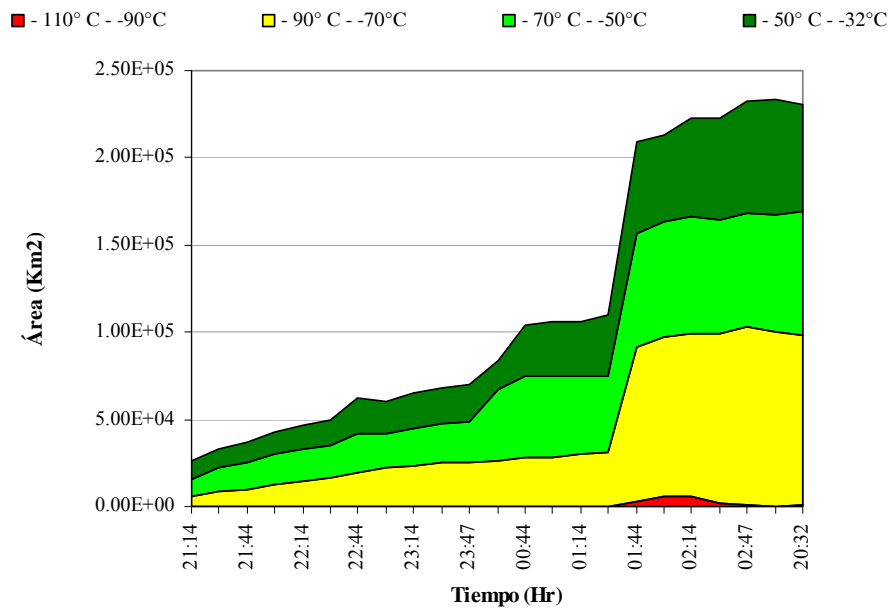


Figura 8.- Áreas de cobertura nubosa de la tormenta 22/07/2005- rangos de temperatura empleados en el estudio. Periodo cercano a la ocurrencia de lluvia

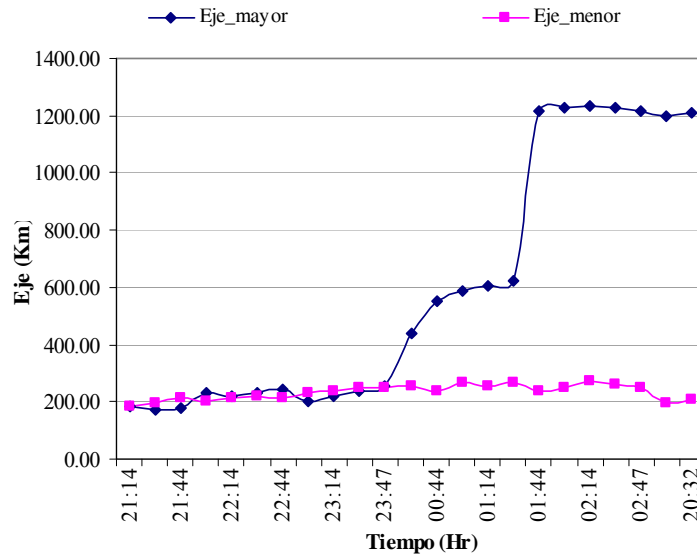


Figura 9.- Longitudes de los ejes mayor y menos trazados para la tormenta 22/07/2005

Tormenta 24/07/2006

Se analizaron 15 imágenes a cada 15 min. aprox. comprendidas entre las 02:54 hr del día 24 de julio hasta las 06:52 hr. Se encontraron 2 sistemas convectivos principales orientados al noroeste y en dirección contraria, lo que ha venido presentándose en el caso de los sistemas localizados al norte de Sonora, ver figura 10. Uno de los sistemas se desarrolló en forma paralela a la línea costera y muy cercano a ella, en la porción correspondiente a Sinaloa. Esta fecha corresponde a la aproximación al territorio de la tormenta tropical Emilia y un sistema de baja presión afectado al norte de Sonora.

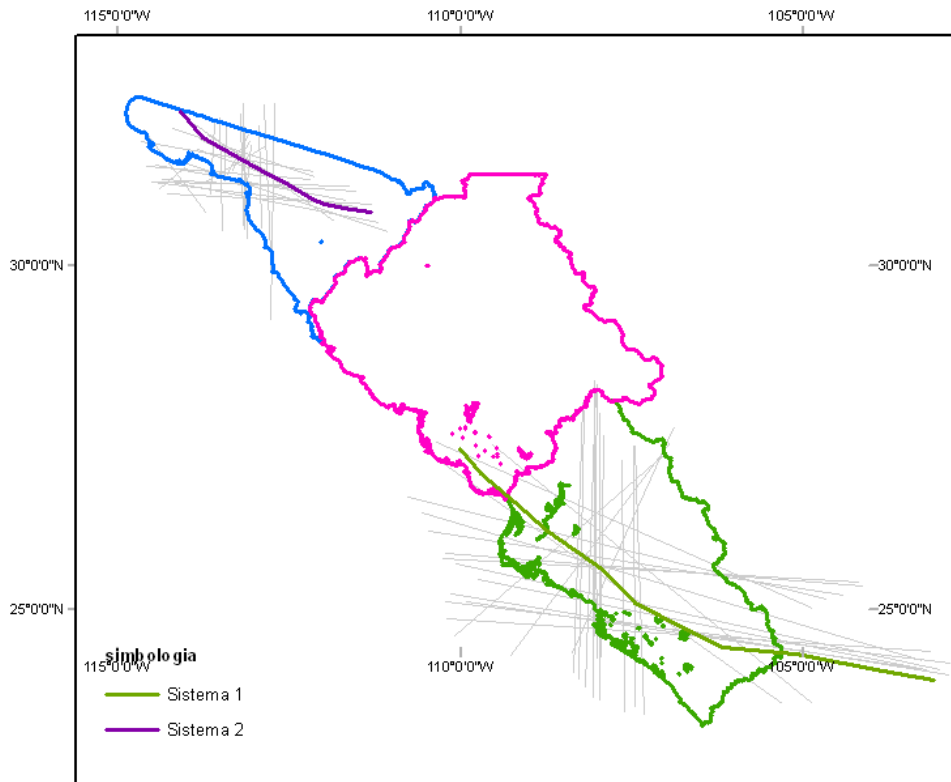


Figura 10. Trayectoria de los sistemas nubosos, tormenta 24/07/2006

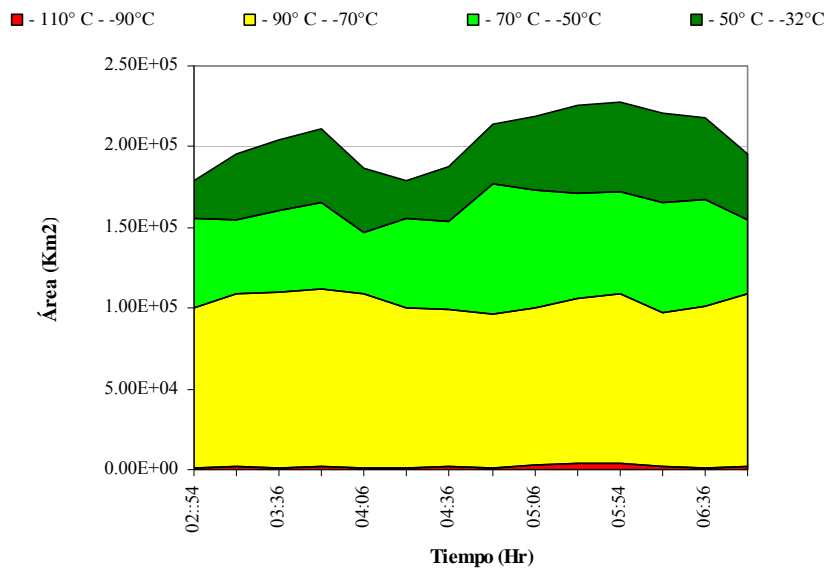


Figura 11.- Áreas de cobertura nubosa de la tormenta 24/07/2006 - rangos de temperatura empleados en el estudio. Periodo cercano a la ocurrencia de lluvia

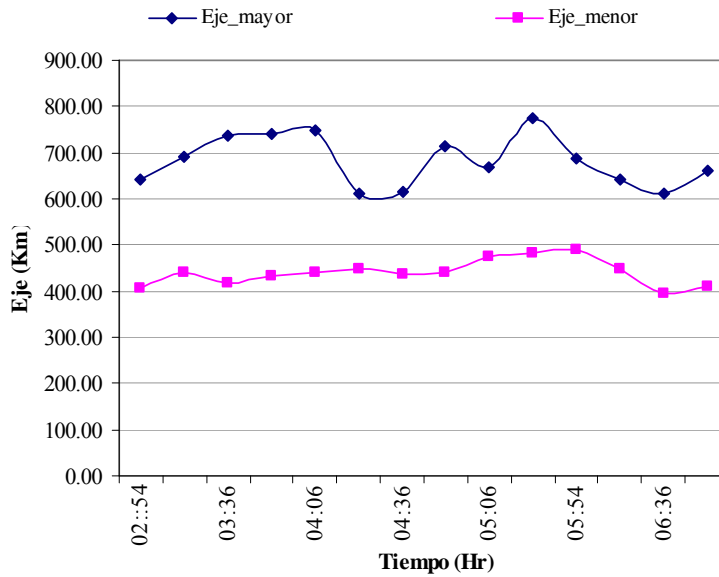


Figura 12.- Longitudes de los ejes mayor y menos trazados para la tormenta 24/07/2006

Tormenta 28/07/06

Se analizaron 22 imágenes a cada 15 min. aprox. comprendidas entre las 19:06 hr del día 27 de julio hasta las 01:06 hr del día 28. Se encontraron 4 sistemas convectivos principales orientados al oeste - suroeste, ver figura 13. Todos estos sistemas se desarrollaron de manera transversal a la zona de estudio. En esta fecha se tuvo la presencia de un sistema de baja presión afectado al noroeste del país.

Las evoluciones de las tormentas en general mantienen una orientación noroeste paralela a la costa, sin embargo estas orientaciones dependen sin duda de las condiciones atmosféricas que se presentaron.

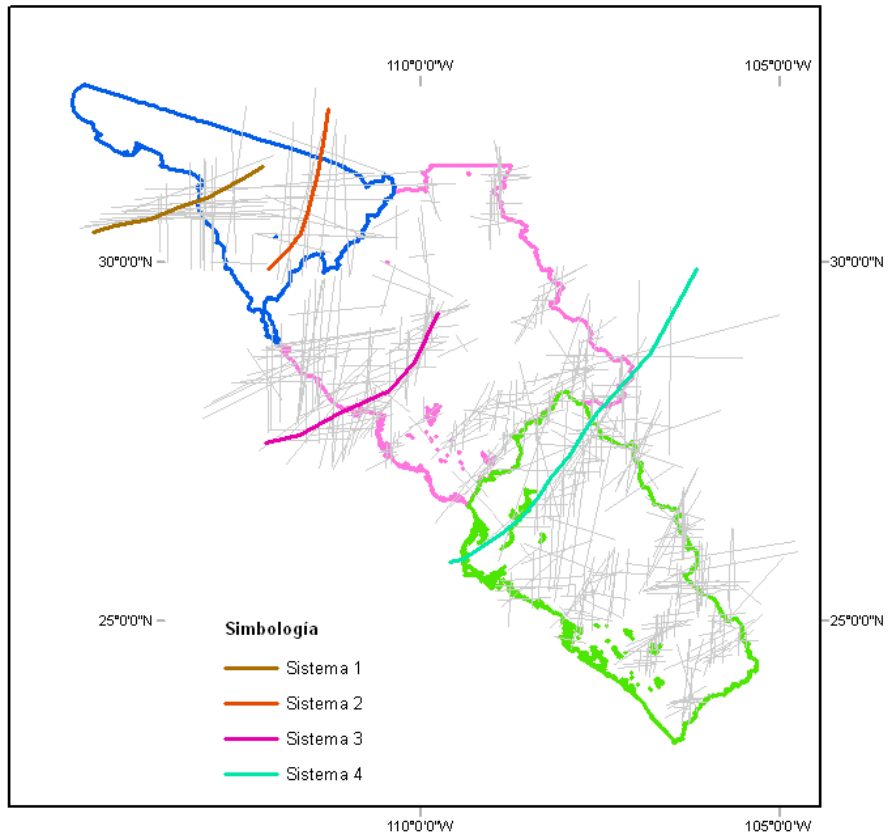


Figura 13. Trayectoria de los sistemas nubosos, tormenta 28/07/2006

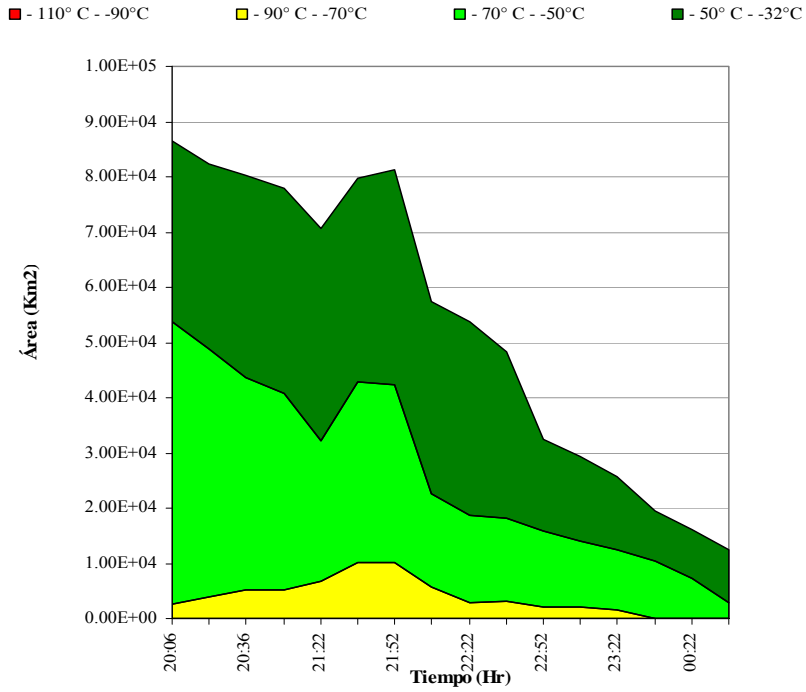


Figura 14.- Áreas de cobertura nubosa de la tormenta 28/07/2006- rangos de temperatura empleados en el estudio. Periodo cercano a la ocurrencia de lluvia

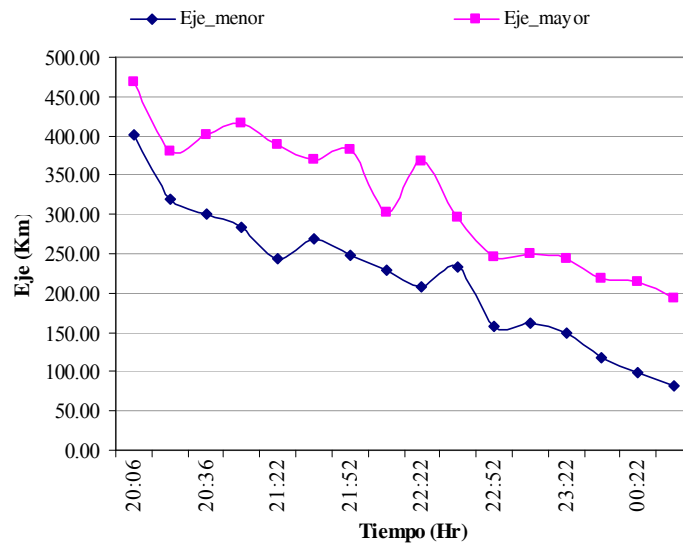


Figura 15.- Longitudes de los ejes mayor y menos trazados para la tormenta 28/07/2006

Anexo 5. Soporte del análisis combinado de información de superficie y satélite.

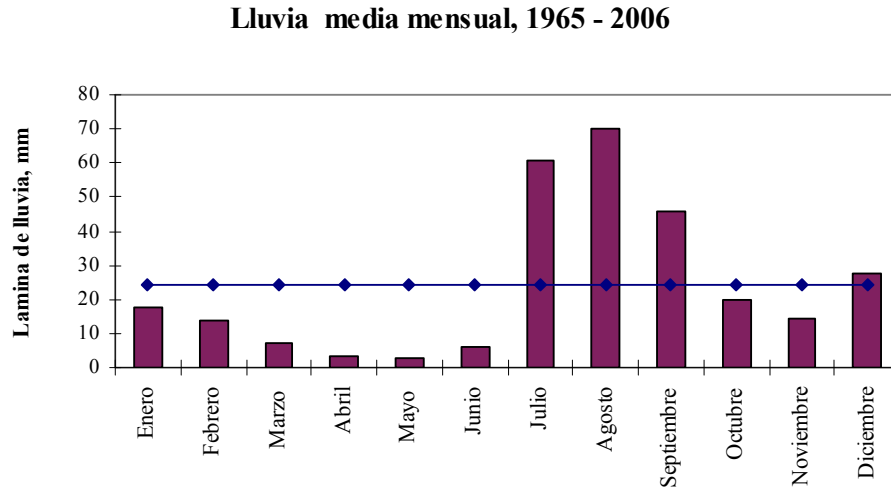


Figura 1.- Distribución mensual de la precipitación en la zona montañosa de Zona_NAME.

Tabla 4. Tormentas moderadas, EMA Basesachi, mes de julio

No.	Nom Tormenta	Lamina, mm
1	04/07/2006 20:40 - 20:50	10.16
2	02/07/2000 21:30 - 22:00	14.22
3	23/07/2001 22:10 - 22:40	10.92
4	08/07/2005 21:30 - 22:00	18.04
5	08/07/2006 00:00 - 00:30	14.48
6	28/07/2001 23:40 - 00:20	11.42
7	23/07/2003 02:30 - 03:10	12.19
8	26/07/2003 21:40 - 22:20	10.92
9	14/07/2006 00:00 - 00:40	19.55
10	04/07/2000 22:50 - 23:50	12.07
11	19/07/2001 21:00 - 22:00	18.78
12	25/07/2001 20:10 - 21:10	16.25
13	26/07/2005 22:30 - 23:40	17.51
14	12/07/2002 23:30 - 00:50	19.55
15	18/07/2003 23:50 - 01:20	11.67
16	09/07/2002 04:20 - 06:00	10.39
17	09/07/2006 20:10 - 22:10	18.78
18	06/07/2001 00:40 - 03:20	15.75
19	30/07/2005 23:40 - 03:20	12.19

Tabla 5. Tormentas fuertes, EMA Basesachi, mes de julio

No.	Nom Tormenta	Lamina, mm
1	05/07/2000 22:40 - 23:20	29.47
2	28/07/2000 21:30 - 22:10	23.62
3	27/07/2005 22:10 - 22:50	22.11
4	01/07/2005 01:10 - 02:00	36.57
5	22/07/2001 00:20 - 01:20	25.04
6	24/07/2001 22:30 - 23:30	22.09
7	31/07/2003 19:40 - 20:40	24.13
8	07/07/2000 01:30 - 02:40	28.95
9	04/07/2004 20:10 - 21:30	20.05
10	08/07/2003 20:50 - 22:40	47.65