

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GEOGRAFÍA Y
GEOMÁTICA “ING. JORGE L. TAMAYO”, A.C.
CentroGeo**

Centro Público de Investigación CONACYT

**EL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE CONOCIMIENTO
GEOESPACIAL ACERCA DE LOS EVENTOS DE
PRECIPITACIÓN INTENSA EN EL NOROESTE DE MÉXICO**

TESIS

Que para obtener el grado de:
Maestro en Geomática

Presenta
Juan Manuel Núñez Hernández

Supervisor Principal:
Dr. Franz Eduardo Mora Flores

Comité Supervisor:
Dr. Jaime Garatuza Payán

México, D.F., Septiembre 15, 2006

©CentroGeo. Derechos reservados. El autor otorga a CentroGeo el permiso de reproducir y distribuir copias de esta tesis en su totalidad o en partes.

RESUMEN

Adjetivada como la ciencia de la información geoespacial, la geomática está integrada por un amplio espectro de disciplinas, que en su interacción pueden construir conocimiento detallado pero comprensible acerca de los diversos fenómenos espaciales del mundo físico y humano. El presente trabajo aporta experiencias sobre el papel que la geomática juega en la búsqueda de información útil a partir de la identificación de patrones significativos, en particular se aborda el problema de la generación de estimaciones de precipitación con percepción remota, para eventos ocurridos durante la temporada de calor en el noroeste mexicano.

Teniendo como referencia espacio-temporal las precipitaciones intensas ocurridas durante la temporada de calor 2003 del *North American Monsoon* (NAM), fenómeno meteorológico en el que la distribución espacial y temporal de las lluvias suele no ser regular año con año, ocasionando que el éxito de las actividades socioeconómicas de la región esté definido por la disponibilidad del agua de lluvia. Como parte de los trabajos realizados en México para la comprensión del NAM, se instaló en la región noroeste de México una red de pluviógrafos digitales que pretenden ser la plataforma de validación de las diversas investigaciones sobre la precipitación convectiva durante la temporada de calor. Sin embargo y dada la enorme variabilidad espacial y temporal de la lluvia, es necesario cuestionarse acerca de la capacidad de la

red de pluviógrafos digitales para capturar y en su caso reproducir la variabilidad de la precipitación.

En este trabajo se obtienen estimaciones de precipitación con percepción remota de alta resolución espacial y temporal; de tal manera que, bajo un marco teórico adecuado, se genere información de utilidad que permita evaluar la capacidad de la red de pluviógrafos digitales para capturar y en su caso reproducir la variabilidad espacial y temporal de la lluvia. Planteado a partir de lo que eventualmente puede llegar a ser una aplicación de geomática dedicada a la búsqueda de información geoespacial útil, en el presente trabajo se obtienen estimaciones de precipitación generadas a partir de las modificaciones realizadas a un algoritmo para estimación de precipitación. Las estimaciones obtenidas, son evaluadas a partir de información proveniente de la propia red de pluviógrafos digitales y de otros sensores. Para finalmente ser empleadas para la identificación de patrones significativos que permitan medir con mayor precisión, la capacidad para capturar y en su caso reproducir la variabilidad espacial y temporal de las lluvias por convección en el noroeste mexicano.

DEDICATORIA

Con todo mi amor y dedicación para Gaby y Diego...

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer al CentroGeo y en particular a la Dra. Carmen Reyes, por su apoyo y tiempo dedicado a este trabajo.

Agradezco también al Dr. Franz Mora por todas las enseñanzas recibidas y la dedicación hacia mi trabajo.

Quiero también agradecer al Dr. Jaime Garatuza por sus consejos con respecto a este trabajo y todas las atenciones para conmigo durante mi estancia de investigación en el Instituto Tecnológico de Sonora.

Finalmente agradezco también al Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota del Instituto de Geografía de la UNAM por las imágenes GOES empleadas en este trabajo. En particular al Dr. Raúl Aguirre por su atención expedita a mi solicitud de información y a Olivia Salmerón por las facilidades técnicas en la transferencia de las imágenes.

A ellos y a todas las personas alrededor de éste trabajo... Gracias totales.

TABLA DE CONTENIDO

	Resumen	ii
	Dedicatoria	iv
	Agradecimientos	v
	Tabla de contenido	vi
	Lista de tablas	ix
	Lista de figuras	x
	Prefacio	xii
		Página
Capítulo 1.	INTRODUCCIÓN	1
	1.1. Consideraciones iniciales	1
	1.2. El paisaje geográfico de la región noroeste de México	2
	1.3. Patrones espacio-temporales de los eventos de precipitación intensa	5
	1.4. La medición de la precipitación	10
	1.4.1. Factores meteorológicos que intervienen en la precipitación	11
	1.4.2. Estimaciones de precipitación con percepción remota	15
Capítulo 2.	LA BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN ÚTIL DENTRO DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE CONOCIMIENTO GEOESPACIAL	18
	2.1. Antecedentes	18
	2.2. Consideraciones iniciales	22
	2.3. Marco teórico	24
	2.4. La búsqueda de información geoespacial útil	33
Capítulo 3.	DEFINICIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	35
	3.1. Propósito del trabajo	35
	3.2. Justificación de la problemática	39
	3.3. Planteamiento específico	41
	3.4. Alcances y objetivos	41

Capítulo 4.	ELEMENTOS DE GEO-SELECCIÓN	43
4.1.	Requisitos para la geo-selección de datos geoespaciales	43
4.2.	Revisión de las técnicas para estimación de precipitación	44
4.2.1.	Técnicas en el visible e infrarrojo	45
4.2.2.	Técnicas con sensores pasivos de microondas	49
4.2.3.	Técnicas con radar	51
4.3.	Geo-selección de datos geoespaciales	53
4.4.	Selección de la técnica para estimación de precipitación	54
4.5	Características de los datos para la búsqueda de información útil	55
4.5.1.	Los datos del satélite GOES	56
4.5.2.	Selección de productos del satélite TRMM	62
4.5.3.	Los datos de la red de pluviógrafos digitales	65
Capítulo 5.	GEO-ENSAMBLE DE DATOS Y CONSTRUCCIÓN DE HIPÓTESIS	69
5.1.	Geo-ensamble de los datos de precipitación	69
5.1.1.	Datos pluviográficos	70
5.1.2.	Datos satelitales	71
5.2.	Construcción de hipótesis	74
5.2.1.	Análisis exploratorio de los datos de precipitación	75
5.2.2.	Hipótesis de trabajo	76
Capítulo 6.	BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE PATRONES SIGNIFICATIVOS	77
6.1.	Geo-análisis para la implementación de la técnica convectiva-estratiforme modificada	77
6.1.1.	La versión original	78
6.1.2.	Modificaciones propuestas	82
6.1.3.	La Técnica Convectiva Estratiforme Modificada	84
6.1.4.	Obtención de resultados	89
6.1.5.	Validación de las estimaciones de precipitación	93
6.1.5.1.	Validación con la red de pluviógrafos digitales	93
6.1.5.2.	Validación con datos orbitales TRMM	95
6.2.	Evaluación de la red de pluviógrafos digitales	97

Capítulo 7.	CONCLUSIONES	100
	7.1. Comentarios finales	100
	7.2. Recomendaciones para el futuro	102
	Bibliografía	103
	Referencias bibliográficas	103
	Publicaciones periódicas	109
	Fuentes electrónicas	113

LISTA DE TABLAS

Capítulo	Tabla	Página
Capítulo 4.	ELEMENTOS DE GEO-SELECCIÓN	43
	4.1. Cronología de la misión espacial GOES	58
	4.2. Características de los instrumentos de imágenes de GOES	59
	4.3. Características de los instrumentos del satélite TRMM	64
	4.4. Productos del satélite TRMM	65

LISTA DE FIGURAS

Capítulo	Figura	Página
Capítulo 1.	INFORMACIÓN DE CONTEXTO	1
	1.1. Diagrama de los pueblos indígenas del noroeste de México	3
	1.2. Variaciones del paisaje geográfico en el noroeste mexicano	6
	1.3. Promedio de días con precipitación intensa por convección	9
	1.4. Factores que determinan la cantidad de lluvia	16
Capítulo 2.	LA BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN ÚTIL DENTRO DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE CONOCIMIENTO GEOESPACIAL	18
	2.1. Descripción de los pasos que constituyen el proceso KDD	20
	2.2. Modos de inferencia científica aplicados a la búsqueda de información útil	25
	2.3. La búsqueda de información geoespacial útil	32
Capítulo 3.	DEFINICIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	35
	3.1. Distribución de la red de pluviógrafos digitales del proyecto NAME	38
	3.2. Procesos del ciclo hidrológico	40

Capítulo 4.	ELEMENTOS DE GEO-SELECCIÓN	43
	4.1. Estrategia rutinaria para la exploración de imágenes del GOES-Oeste	60
	4.2. Estrategia rutinaria para la exploración de imágenes del GOES-Este	61
	4.3. Instrumentos de medición del NAME	66
	4.4. Red de pluviógrafos digitales del NAME por bandas de elevación	67
Capítulo 5.	GEO-ENSAMBLE DE DATOS Y CONSTRUCCIÓN DE HIPÓTESIS	69
	5.1. Modelo cartográfico para el geo-ensamble de datos del satélite GOES	73
	5.2. Modelo cartográfico para el geo-ensamble de productos orbitales del satélite TRMM	74
Capítulo 6.	BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE PATRONES SIGNIFICATIVOS	77
	6.1. Modelo cartográfico para la obtención de estimaciones de precipitación	85
	6.2. Precipitación acumulada en 24 horas	90
	6.3. Variación porcentual horaria del área total de lluvia	91
	6.4. Variación porcentual horaria del volumen total de lluvia	92
	6.5. Porcentaje acumulado de área y volumen de lluvia	92
	6.6. Valores de precipitación acumulada en 24 horas para la fecha de estudio	94
	6.7. Órbitas disponibles del satélite TRMM para el día 28 de junio del 2003	96
	6.8. Número de tormentas detectadas por la TCEM	98
	6.9. Valor promedio del radio de tormentas detectadas por la TCEM	98
	6.10. Probabilidad de detección de tormentas de la red de pluviógrafos digitales del NAME	99

PREFACIO

En México como en muchas otras regiones del mundo el agua es un factor limitante para la producción de alimentos y el desarrollo industrial. En el noroeste mexicano, las precipitaciones constituyen el principal factor condicionante de la producción agrícola. Su observación realizada mediante redes de pluviógrafos, las cuales proveen datos precisos pero puntuales acerca de la lluvia, sólo capturan una pequeña fracción de los eventos ocurridos, ya que debido a la enorme variabilidad espacial y temporal de las lluvias, especialmente aquellas ocurridas durante la temporada de calor, los datos obtenidos de estas redes de pluviógrafos no representan por completo a dicho fenómeno meteorológico.

Durante los últimos treinta años, las estimaciones de precipitación con percepción remota se han convertido en una alternativa de información acerca de la precipitación, ya que permiten capturar la variabilidad espacial y temporal de las lluvias. Dicha característica le otorga un valor muy relevante, ya que en conjunto con los datos provenientes de redes de pluviógrafos, las estimaciones de precipitación con percepción remota pueden ser empleadas para la búsqueda de información útil acerca del fenómeno de la precipitación.

El presente trabajo aborda la búsqueda de información útil, planteada como una etapa dentro del proceso de construcción de conocimiento geoespacial acerca de los eventos de precipitación intensa en el Noreste de México.

En el Capítulo 1, << Información de Contexto >> expongo las principales consideraciones a tomar en cuenta para la búsqueda de información útil acerca de los eventos de precipitación intensa en el noroeste de México. Realizo una descripción del paisaje geográfico de la región y su relación con los eventos de precipitación intensa ocurridos durante la temporada de calor. Además de una reseña de cómo se lleva a cabo la estimación de la cantidad de lluvia con sensores remotos a partir de conocer los factores meteorológicos que intervienen en la precipitación.

En el Capítulo 2, << La búsqueda de información útil dentro del proceso de construcción de conocimiento geoespacial >> planteo un marco teórico adecuado para implementar la búsqueda de información útil. Posterior a una revisión bibliográfica, desarrollo los elementos necesarios para plantear un marco teórico que permita realizar la búsqueda de información útil a partir de una identificación no exhaustiva de patrones significativos.

El Capítulo 3, << Definición de la Problemática >> contiene el propósito, la justificación y el planteamiento específico de todo este trabajo. Incluyo además los alcances y objetivos del mismo.

En el Capítulo 4, << Elementos de Geo-Selección >> describo, a partir de un proceso de abducción definido por la revisión de las principales técnicas para la obtención de estimaciones de precipitación con percepción remota, los requisitos necesarios para la selección de datos empleados para la búsqueda de información útil

En el Capítulo 5, << Geo-Ensamble de Datos y Construcción de Hipótesis >> implemento los procesos necesarios para adecuar los datos seleccionados, de

tal manera que a partir de un análisis exploratorio de ellos, me permitan llevar a cabo la construcción de la hipótesis de trabajo. Dicha hipótesis formaliza la búsqueda de nueva información de utilidad que permita conocer de mejor manera la capacidad de la red de pluviógrafos digitales del NAME para capturar y en su caso reproducir la variabilidad espacial y temporal de los eventos de precipitación intensa.

El Capítulo 6, << Búsqueda de información e identificación de patrones significativos >> presento los resultados obtenidos por la modificación al algoritmo para la obtención de estimaciones de precipitación con percepción remota. A partir de una descripción detallada de la técnica seleccionada para la obtención de estimaciones de precipitación, se proponen una serie de modificaciones con la intención de obtener estimaciones que permitan capturar la variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones ocurridas durante la temporada de calor en el noroeste mexicano. Se presentan los resultados obtenidos y se realiza una validación de las estimaciones de precipitación con percepción remota a partir de los datos de la red de pluviógrafos y de otros sensores.

En este Capítulo presento también información generada a partir de la identificación de patrones significativos que permite realizar una evaluación más detallada de la capacidad de la red de pluviógrafos digitales para capturar y en su caso reproducir la variabilidad espacial y temporal de los eventos de precipitación intensa.

Por último en el Capítulo 7 << Conclusiones >> realizo comentarios a los resultados obtenidos en este trabajo y expongo algunos conceptos que considero necesarios para trabajos futuros acerca de la búsqueda de información útil.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Consideraciones iniciales

La geomática adjetivada como la ciencia de la información geoespacial, abarca entre otros aspectos, los relacionados con la medición, adquisición, procesamiento, análisis, validación, visualización y comunicación de los datos geoespaciales. Esta ciencia emergente agrupa un amplio espectro de disciplinas, que en su interacción pueden construir conocimiento detallado pero comprensible acerca de los diversos fenómenos espaciales y temporales del mundo físico y humano. Dentro de estas disciplinas se incluyen algunas tradicionales como la cartografía, la topografía, la fotogrametría y la geodesia y algunas otras de reciente aparición como la percepción remota, los sistemas de información geográfica y los sistemas de posicionamiento global.

La revolución tecnológica de los últimos años ha ocasionado que las disciplinas que conforman a la geomática aumenten drásticamente su capacidad para generar *Terabites* de datos geoespaciales. Esto sin duda está transformando el papel de la geomática, ya que con un mercado mundial de casi 10 billones de dólares en el área de servicios y productos, esta ciencia emergente es considerada el mayor consumidor de datos satelitales, fotogrametría digital, sistemas de información geográfica, cartografía digital y localización GPS entre otras (Kaushal, 2000).

Con la disponibilidad de tal cantidad de datos geoespaciales, es necesaria la búsqueda de nuevos marcos de conocimiento que permitan abordar problemáticas potencialmente complejas en cuanto al manejo de datos. El presente trabajo explora los elementos que componen el proceso de construcción de conocimiento geoespacial, enfocándose exclusivamente en la etapa de búsqueda de información útil a través de la identificación de patrones significativos. De esta forma en los capítulos subsecuentes sólo se presenta la obtención no exhaustiva de patrones significativos en la precipitación, una de las variables más importantes de la meteorología, debido a su gran variabilidad espacial y temporal.

1.2. El paisaje geográfico de la región noroeste de México

Ubicado geográficamente por arriba del trópico de cáncer, la configuración física del paisaje geográfico del noroeste mexicano, está definida principalmente por la actividad geológica que dio origen a la Sierra Madre Occidental y a los procesos de subducción que originaron el Golfo de California (Roldan *et al.*, 2000; Valencia *et al.*, 2000).

Aunque caracterizada por una muy pobre disponibilidad de agua, la región fue habitada por diferentes tribus y pueblos desde la época prehispánica, a la

llegada de los españoles la región noroeste alcanzaba una población de más de 540,000 habitantes entre los que destacaban los seris, los pápagos, los yaquis, los mayos, los tarahumaras, los guarijíos, los pimas y los tepehuanos, asimismo los pueblos indígenas kiliwa, paipai, kumiai, cochimí y cucapá, nativos de la península de Baja California (Figura 1.1).

Después de un largo proceso de conquista y colonización se cambió la composición pluriétnica de la región y muchos pueblos desaparecieron mientras otros pocos conservaron parte de sus territorios originales. Años después, el periodo del porfiriato trajo consigo a las primeras ciudades importantes del noroeste mexicano, debido principalmente a la actividad agrícola, la implementación del ferrocarril, las explotaciones mineras y la formación de la frontera; el resto de las ciudades provienen del periodo posrevolucionario, relacionadas en mayor medida con el desarrollo de la actividad agrícola en auge y a la normalización del comercio por tierra con los Estados Unidos de Norteamérica (Cámara, 1991).

RARÁMURI Tarahumara	YOREME Mayos	ÓDAMI / O'DAM Tepehuanes		
MAKURAWE Guarijío / Warijó	YAQUIS	CONCA'AC Seris		
O'OB Pimas	TOHONO O'OTHAM Pápagos	KIKAAPOA Kikapúes		
M'TI-PA Cochimí	ES-PEI Cucapá	KO'LEW Kiliwa	TI'PAI kumiai	AKWA'AL Pai Pai

Investigación antropológica: Macrina Réstor. Responsable de la Unidad de Información y Documentación sobre los Pueblos Indígenas de Sonora (INI-COLSON).

Figura 1.1. Diagrama de los pueblos indígenas del noroeste de México

Con la introducción, a principios del siglo XX, de las innovaciones tecnológicas como el cine, el telégrafo, el teléfono y el alumbrado público, se afianzaron los sistemas urbanos ya desarrollados, siendo fundamental el tendido de las vías férreas para el enlace con el centro del país, la costa y la frontera norte. Fue al transporte ferroviario y a su ubicación preponderante en las porciones bajas y despejadas, que se debió en gran medida la consolidación de la tendencia general de despoblamiento de las regiones serranas de Sonora y Durango a la vez que se observó la densificación de los valles costeros de Sinaloa y Sonora, y de las llanuras bajas en Chihuahua, así como de la franja fronteriza. Para mediados del siglo pasado los núcleos más poblados se engarzaban por medio de las vías férreas. Lo que consolidó a ciudades como Mexicali y Tijuana en Baja California, Culiacán y Mazatlán en Sinaloa, Hermosillo y Ciudad Obregón en Sonora, además de la incorporación de los centros comerciales y pesqueros de Topolobampo, Guaymas y Yabaros.

Probablemente el momento histórico más importante para la región noroeste de México en términos de la composición socio-económica de su paisaje geográfico actual, fueron las reformas agrarias del cardenismo, éstas dieron gran impulso a la actividad agrícola en los valles de Mexicali, Culiacán, Juárez y la Laguna. La construcción de caminos e infraestructura hidráulica en conjunto con las actividades agrícolas definieron el desarrollo y planeación de asentamientos rurales que obedecieron al patrón de trazo definido por los agrimensores, generando cuadrículas que simplemente densificaron la extensa trama de geometría regular de los distritos de riego. Ciudad Obregón, en el corazón del valle del Yaqui; los Mochis en el valle de El Fuerte; Mexicali y Delicias en sus respectivos distritos de riego, son los casos mas sobresalientes de ciudades eminentemente agrícolas (Méndez, 2000).

Con el auge agrícola se crearon las condiciones necesarias para convertir a la región en abastecedora de las materias primas requeridas por el proceso de

industrialización. De esta manera, se volvió más notoria la presencia de las instalaciones agroindustriales a los lados de las vías férreas y puntos de embarque carretero de los valles. Las Periferias urbanas de Mexicali, Los Mochis, Obregón, Hermosillo, Juárez, Torreón y otros centros menores pronto quedaron repletos de estructuras fabriles, bodegas y talleres. Se construyeron más presas, se abrieron centenares de pozos, se tendieron kilómetros de canales, se ampliaron las carreteras troncales y se multiplicaron los ramales carreteros, se erigió la industria de los agroquímicos y de la producción y procesamiento de productos agrícolas, avícolas, acuícolas y ganaderos, además de que se consolidaron la mayoría de los distritos de riego hasta contar hoy en día con una extensión de 1,300.000 hectáreas de cultivo bajo riego, lo que le permite a la región ocupar los primeros lugares a nivel nacional en la producción de granos, principalmente trigo, soya, cártamo, ajonjolí y maíz, así como de algunos cultivos hortícolas; convirtiendo con ello al noroeste mexicano en una de las zonas agrícolas más importantes del país por las altas divisas que genera, producto de la comercialización de sus cosechas tanto en el interior del país como en el extranjero (Cuauhtémoc y Graizbord, 2004).

1.3. Patrones espacio-temporales de los eventos de precipitación intensa

A principios del mes de julio de cada año, el paisaje del noroeste mexicano empieza a cambiar drásticamente sobre todo en lo que se refiere a la porción conocida como la ladera oeste de la Sierra Madre Occidental. Un aumento repentino en la precipitación acompaña a este cambio, ocasionando con ello una serie de transformaciones en el paisaje de la región. Vegetación fotosintéticamente más activa y mayor vigor de la biomasa vegetal (verdor) durante los meses de julio a septiembre, son transformaciones ocasionadas en

la vegetación por la dinámica de la precipitación ocurrida en el noroeste mexicano (Figura 1.2).

De acuerdo a los fenómenos que la originan, tres son los tipos de precipitación que se presentan en el noroeste mexicano: por convección, ciclónica y orográfica. Los cuales además de tener variación en la cantidad de precipitación, ocurren a diferentes escalas espaciales y temporales. Durante los meses de junio, julio, agosto, septiembre y octubre se precipita el 80% del total de la precipitación total anual en la región (Stensrud, 1997).

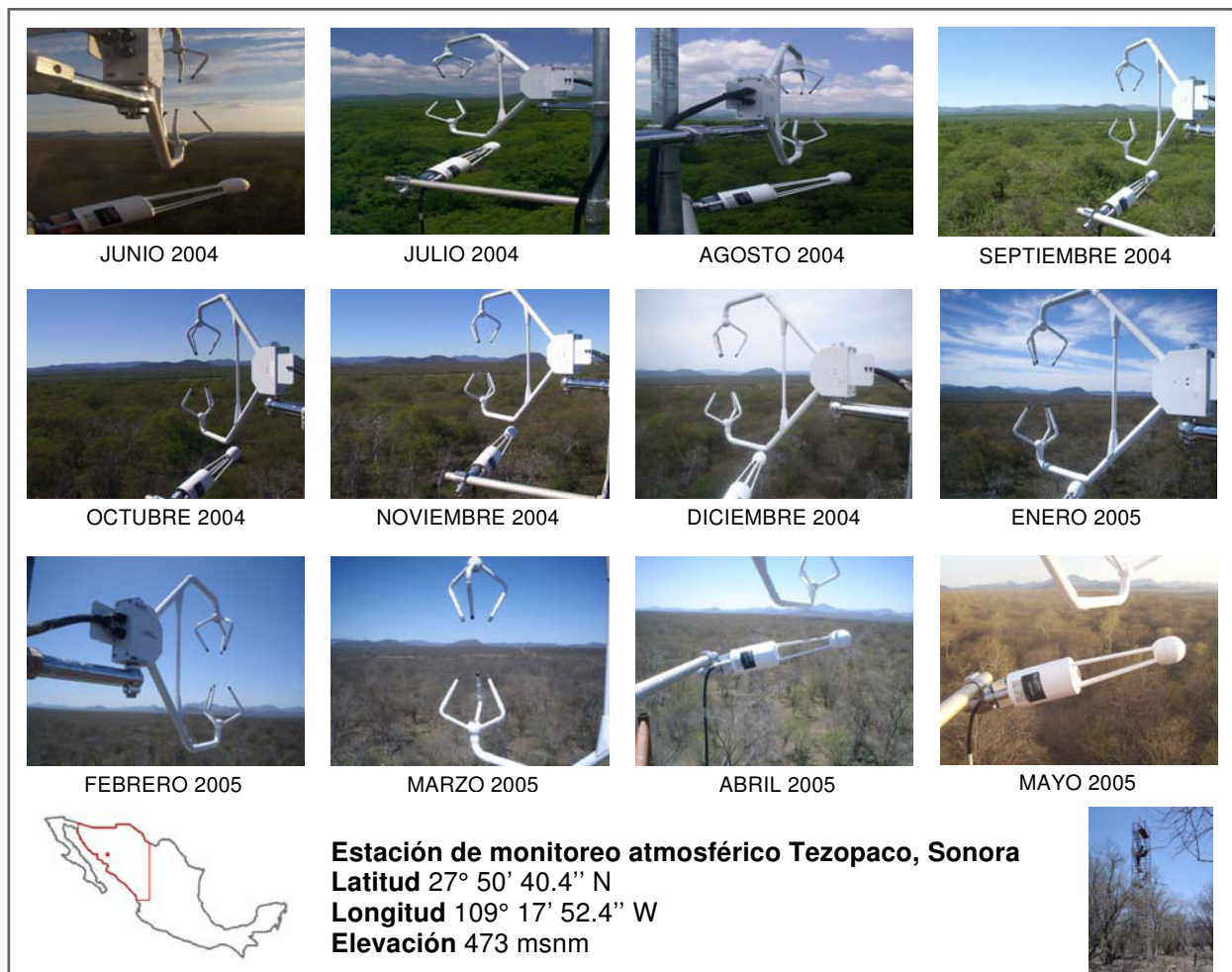


Figura 1.2. Variaciones del paisaje geográfico en el noroeste mexicano

En el noroeste mexicano, a principios del verano, el régimen de circulación frío es reemplazado por uno cálido, debido principalmente a que el centro de alta presión nororiental migra hacia el norte mientras que el sistema de alta presión de las Bermudas se expande hacia el noroeste de México. Durante este periodo también conocido como la temporada de calor, la cual comprende los meses de junio, julio y agosto, se establece una isla de calor sobre el desierto sonorense como consecuencia de las elevadas temperaturas del verano, lo que ocasiona que el noroeste mexicano experimente, producto de la inestabilidad convectiva asociada al calentamiento superficial del aire húmedo combinado con la orografía de la región, acontecimientos convectivos frecuentes de precipitación intensa (Leal y Watts, 2003). A este fenómeno se le conoce con el nombre de *North American Monsoon* (NAM), debido a que alimenta una región extensa de alta precipitación que primero se desarrolla sobre el sur de México y después se extiende hacia el noroeste a lo largo de la vertiente oeste de la Sierra Madre Occidental, limitando finalmente su influencia hasta la región suroeste de los Estados Unidos de Norteamérica (Douglas *et al.*, 1993). En resumen, el régimen de la precipitación del NAM para el Noroeste Mexicano puede entenderse como un sistema convectivo diurno, forzado por el intenso calor sobre la topografía de la ladera oeste de la Sierra Madre Occidental distribuida a lo largo del Mar de Cortes.

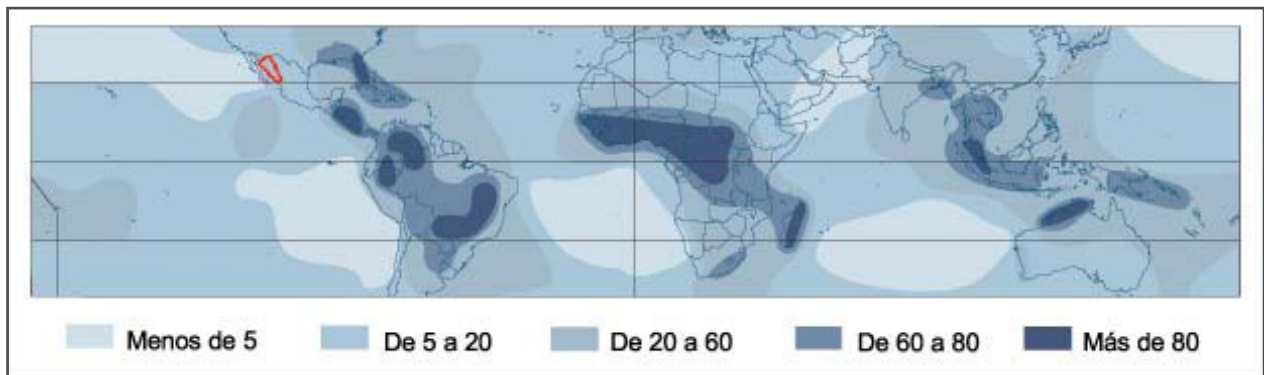
El fenómeno de la convección ocurre cuando un fluido bajo los efectos de la gravedad es calentado desde abajo o enfriado desde la parte superior, de tal forma que la difusión molecular no puede redistribuir su campo de densidad lo suficientemente rápido como para mantener el equilibrio. La capa de fluido llega a ser entonces muy inestable por lo que se forman vuelcos macroscópicos para estabilizar estratificadamente el campo de densidad. La convección atmosférica que producen las nubes *cumulus* y *cumulonimbus* tiene la complicación adicional de que el aire al interior de las nubes, compresible y con presencia de vapor de agua, actúa como neutralizador de

estos vuelcos. La convección atmosférica se presenta idealmente como un patrón de elementos circulando verticalmente, los cuales son geométricamente simétricos; sin embargo en la realidad, la forma de los vuelcos es altamente modificada por las interacciones de las nubes y los campos de precipitación con los movimientos del aire, creando estructuras verticales asimétricas que pueden condensar y hacer caer el agua en forma de lluvia intensa (Houze, 1997).

Dentro del contexto de formación de nubes *cumulus* y *cumulonimbus* formadas por arriba de la tropósfera y más allá, a una altura de 20,000 *m*, dos son los tipos de precipitación que se distinguen durante el proceso de convección atmosférica. El fenómeno de la precipitación por convección, ocurre generalmente sobre una escala espacial limitada entre los 10 y los 300 *km*² y se caracteriza por tener una considerable variabilidad espacial que depende de la existencia y permanencia de los propios sistemas convectivos (McGregor and Nieuwolt, 1998:187-188).

Al principio cuando la actividad es joven y vigorosa, la precipitación que se presenta es denominada convectiva, mientras que a la precipitación ocurrida en regiones de antigua convección se le denomina estratiforme. La precipitación convectiva ocurre cuando las velocidades verticales en los núcleos de las corrientes aéreas ascendentes se encuentran entre los 10 y los 14 *m/s*, ocasionando con ello que el vapor se condense rápidamente produciendo con ello precipitación intermitente e intensa. La precipitación estratiforme por su parte ocurre cuando los movimientos verticales del aire presentan velocidades ascendentes de entre 1 y 2 *m/s*, generando así precipitación de baja intensidad. La precipitación estratiforme ocupa una gran porción de las nubes *cumulus* y *cumulonimbus* que precipitan, debido a que ocurre en regiones donde previamente ocurrió actividad convectiva intensa (Houze, 1997).

Durante la temporada de calor las tormentas son los mayores causantes de precipitación intensa por convección en la región noroeste del país (Figura 1.3). Se trata de disturbios de tamaño pequeño, gran intensidad y corta duración. Las tormentas son básicamente celdas individuales de convección cuyo origen se debe principalmente a inestabilidades en la atmósfera ocasionadas por convección libre (calor superficial) o por convección forzada (orografía). Las tormentas raramente alcanzan diámetros de más de 10 km^2 y tienen una duración promedio de entre 1 y 2 horas. Cuando una tormenta prevalece sobre largos periodos de tiempo en un mismo lugar, se trata de una repetición del proceso de convección (Negri *et al.*, 1993).



Elaboración propia a partir de (McGregor and Nieuwolt, 1998:144)

Figura 1.3. Promedio de días con precipitación intensa por convección

Debido a que las tormentas son formadas por un ascenso rápido de aire caliente, a menudo a grandes alturas en la atmósfera, suelen ser generalmente intensas y en algunas ocasiones pueden ir acompañadas de descargas eléctricas. Sin embargo y debido principalmente a que una gran porción en espacio y tiempo, del transporte total de la convección, ocurre en regiones de antigua convección, es decir en las regiones estratiformes de las nubes *cumulus* y *cumulonimbus*, es de vital importancia poder dividir la precipitación por convección en su parte convectiva y estratiforme; ya que la

primera genera la precipitación de mayor intensidad, mientras que la segunda ocurre en una mayor extensión.

En cuanto a la parte temporal se refiere, la precipitación por convección en la región noroeste de México presenta un ciclo diurno, ligado estrechamente a la topografía de la región. Precipitaciones a lo largo de la costa de Mazatlán por la mañana y una línea característica de mayor intensidad a lo largo de la pendiente oeste de la Sierra Madre Occidental durante la tarde noche, son las principales características del comportamiento temporal de las precipitaciones por convección (Negri *et al.*, 1993; Gochis *et al.*, 2004).

1.4. La medición de la precipitación

Para conocer acerca de la precipitación, es necesario conocer todos los factores meteorológicos que intervienen en ella. Los fenómenos caracterizados por flujos verticales de calor muy turbulentos y de momento como las tormentas y los aguaceros producen lluvia convectiva que ocupa extensiones no muy grandes y suele ser intermitente e intensa. Los fenómenos caracterizados por flujos verticales de calor relativamente débiles y de momento provocan lluvia estratiforme que ocupa extensiones muy grandes y suele producir lluvia de larga duración pero de poca intensidad.

La mayoría de los sistemas de nubes productoras de lluvia son híbridos durante algún periodo de su ciclo de vida y poseen una zona convectiva y otra estratiforme. Sin embargo, puede suceder que sistemas puramente convectivos al final de su proceso evolutivo se transforman en sistemas estratiformes. Mientras que en algunas otras ocasiones se forman sistemas convectivos en zonas amplias de precipitación estratiforme

1.4.1. Factores meteorológicos que intervienen en la precipitación

La cantidad de lluvia por unidad de área depende de la intensidad con que cae y el tiempo durante el cual ocurre. Sea $R(t)$ la intensidad de lluvia instantánea y P la cantidad de lluvia por unidad de área caída en un tiempo Δt , se tiene que:

$$P = \int_{t'}^{t'+\Delta t} R(t) dt$$

Si \bar{R} es la intensidad de lluvia promediada en el tiempo y Δt la duración de la lluvia:

$$\bar{R} = \frac{\int_{t'}^{t'+\Delta t} R(t) dt}{\Delta t}$$

Entonces, la lluvia total P podrá expresarse como:

$$P(\Delta t) = \bar{R}\Delta t$$

La intensidad de la lluvia instantánea $R(t)$, en un punto dado, es proporcional al flujo vertical de humedad $\phi = wq$, donde w es la componente vertical de la velocidad del viento y q es la humedad específica del aire ascendente. De esta manera un aire húmedo que asciende rápidamente tiene altas probabilidades de producir una precipitación intensa, aunque no todo el vapor de agua del aire que asciende caerá posteriormente en forma de lluvia. Lo anterior depende de la eficiencia de la lluvia ε , entendida como la proporción entre la

masa de agua que cae en forma de lluvia m_p y el flujo de masa de agua que entra a la nube m_i

$$\varepsilon = \frac{m_p}{m_i}$$

De manera que:

$$R(t) = \frac{m_p}{m_i} wq$$

Para que se produzca un flujo vertical de vapor de agua importante, se han de dar una serie de condiciones simultáneas en la atmósfera tales como:

- Inestabilidad que haga posible los movimientos ascendentes
- Humedad suficiente para que el aire pueda alcanzar su nivel de convección libre
- Algún proceso mediante el cual el aire sea elevado hasta su nivel de convección libre

La mayoría del vapor de agua que entra en una nube *cumulus* y *cumulonimbus* se condensa, en cambio no todas las gotas caen posteriormente en forma de lluvia, debido principalmente a que una buena parte se evapora. En la evaporación intervienen aspectos de microfísica de nubes tales como la distribución de tamaños de las gotas de agua, la fracción de partículas de

hielo presentes, etc. Estos factores son inobservables con las herramientas que utiliza la predicción operacional.

La duración de la lluvia Δt viene determinada por la velocidad de movimiento del sistema de nubes, su tamaño y su forma. Sea \vec{V}_s la velocidad del sistema de nubes y L_s la longitud del sistema en la dirección de la velocidad, se tiene que el tiempo Δt durante el cual se registra la precipitación viene dado por la siguiente expresión:

$$\Delta t = \frac{L_s}{|\vec{V}_s|}$$

Así un sistema de nubes que se mueve lentamente y cuyo tamaño en la dirección del movimiento sea grande podrá producir lluvias de elevada duración, suponiendo que mantenga sus características en el periodo durante el cual se registra.

Para el caso de la precipitación por convección ocurrida durante la temporada de calor en el noroeste mexicano, la velocidad del sistema \vec{V}_s es la suma de la velocidad media de las celdas que lo componen \vec{V}_c y la velocidad de propagación \vec{V}_p debida a la aparición, desarrollo y posterior decaimiento de las celdas convectivas en su periferia.

La velocidad de las celdas es fácilmente pronosticable: ya que coincide aproximadamente con el viento medio en el cual están inmersas dichas celdas. La predicción de la velocidad de propagación es más complicada, ya que la convección puede interactuar con el entorno para desarrollar nuevas convecciones alrededor de las celdas principales. Dicha propagación se produce si el entorno del sistema convectivo reúne las condiciones

termodinámicas adecuadas, la energía potencial suficiente para desarrollar nuevas celdas y el grado de humedad suficiente.

La propagación puede ocurrir en cualquier lugar del sistema. Si tiene lugar adelante, a sotavento del viento medio troposférico, se produce entonces una aceleración en el movimiento del sistema; a este tipo de propagación se le denomina *forward*. Si la propagación ocurre en la parte trasera del sistema, a barlovento del viento medio troposférico, tiene lugar una desaceleración del sistema; a este tipo de propagación se le denomina *backward*. Con este último tipo de propagación se suelen dar episodios de precipitación intensa ya que el sistema permanece mucho tiempo estacionado prácticamente en el mismo lugar (Rivera, 2001).

En lo que se refiere a la distribución espacial se puede afirmar que la escala sinóptica proporciona las condiciones necesarias para el desarrollo de sistemas convectivos y los mecanismos de mesoescala determinan cuando y donde se desarrollan las convecciones (Ramis *et al.*, 1998). Aunque los movimientos verticales de escala sinóptica no son suficientes para iniciar la convección que posteriormente pueda dar lugar a precipitaciones intensas, existe relación entre los sistemas de escala sinóptica y los sistemas convectivos fundamentada en el aumento de la humedad y en la desestabilización creada por el ascenso de aire.

Los procesos de mesoescala son los principales responsables del inicio de la elevación necesaria del aire para desencadenar la posterior convección libre. En este proceso suele jugar un papel muy importante la orografía del terreno, sobre todo en situaciones en que los sistemas se mueven perpendicularmente a una cadena montañosa. Los órdenes de magnitud de la escala de tiempo en que tienen lugar las elevaciones de aire van desde los 20 minutos, para pequeñas células convectivas, hasta varios días para movimientos sinópticos a

gran escala. Por ejemplo, si el aire ha de ser elevado 1 km hasta su nivel de convección libre a una velocidad de 1 cm/s , que es una velocidad típica de los movimientos de escala sinóptica, el tiempo necesario es más o menos un día. En cambio, los procesos de mesoescala, con una velocidad típica de ascenso de 10 cm/s producen la misma elevación en aproximadamente 3 horas

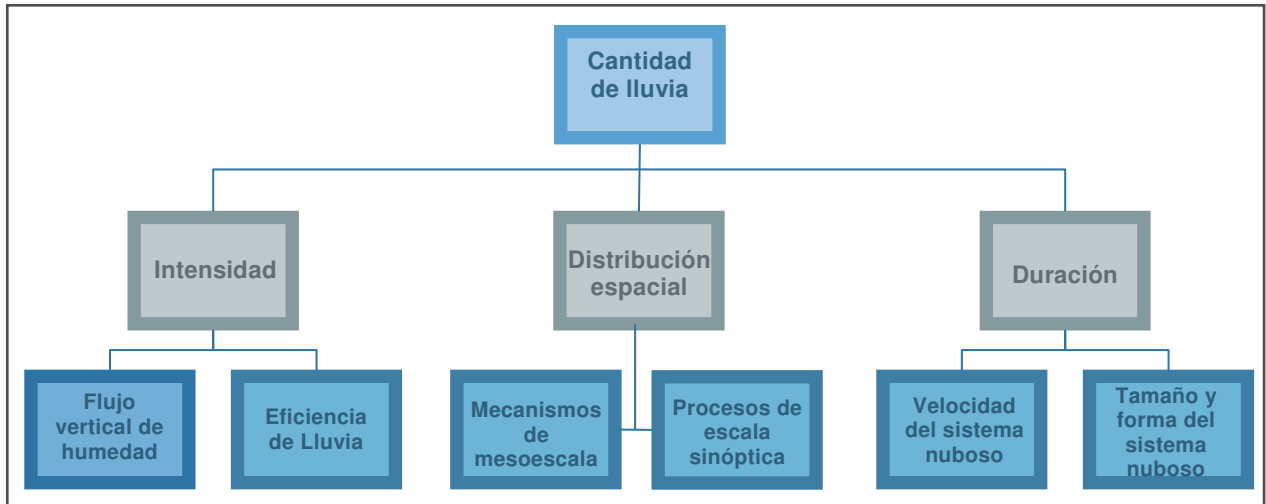
Los procesos de mesoescala, influyen también en la localización de las zonas de propagación y en la formación de zonas diferenciadas dentro del sistema nuboso. Estas zonas son básicamente de dos tipos, la zona convectiva donde se produce la precipitación intensa y de corta duración y la zona estratiforme con lluvias más moderadas y de mayor duración. El mecanismo es el siguiente: las gotas de agua y los cristales de hielo en niveles muy altos, se produce en corrientes ascendentes del orden de $1\text{-}10\text{ m/s}$ en *cumulus* de fase de crecimiento; cuando alcanzan un tamaño suficiente caen superando las corrientes ascendentes, fase de maduración. La corriente descendente de la lluvia que cae, contrarresta el movimiento ascendente y puede llegar a anularlo enfriando el aire por evaporación por parte de las gotas. Si la corriente descendente llega al suelo, se esparce en todas direcciones, ocasionando rachas de viento frío *gust* que puede dar lugar a un frente frío asociado. Estas rachas pueden elevar aire de los alrededores hasta su nivel de convección libre a lo largo del contorno de la nube, creándose nuevas células hijas alrededor de la original, formándose así una estructura multicelular, dando lugar a diferentes tipos de propagación según la zona del sistema en que se producen estas nuevas células. Si los diversos frentes de racha se fusionan, pueden llegar a formar alrededor de la nube principal un gran frente al que se le denomina *outflow boundary*. Según sea la cizalladura del viento en niveles bajos, se favorece o entorpece la formación de nuevas células convectivas.

1.4.2. Estimaciones de precipitación con percepción remota

Como ya se mencionó, para poder describir en forma completa lo que ocurre con la lluvia en cierta región geográfica, es necesario contar con información sobre tres características fundamentales: intensidad, duración y distribución espacial (Figura 1.4).

Es por esto que resulta muy complejo medir la lluvia en tierra ya que todos los instrumentos disponibles, sólo se limitan a medir con precisión la característica de intensidad, para que a partir de ella se pueda estimar la duración y la distribución espacial. Sin embargo, dentro de la percepción remota, hasta ahora la gran mayoría de las investigaciones en cuanto al desarrollo de técnicas para estimación de precipitación con satélites tienen que ver con la separación entre nubes que precipitan y nubes que no precipitan; es decir, las estimaciones acerca de la cantidad de lluvia se obtienen a partir del estudio de los elementos que definen la distribución espacial y la duración de la precipitación (las nubes) para con ello realizar una inferencia sobre la intensidad de la precipitación (Garatuza e Ibarra, 1993; Petty, 1995; Bendix and Bendix, 1998; Levizzani, 1999; Islam *et al.*, 2002; Reudenbach and Bendix, 2002; Balda e Vendrame, 2003). Además de que se ha empezado a experimentar la combinación de varios tipos de sensores para obtener mejores resultados (Levizzani *et al.*, 2002a; Negri *et al.*, 2002b; Kidd, 2005).

Figura 1.4. Factores que determinan la cantidad de lluvia



La estimación de precipitación a partir del uso de de la información que se genera con imágenes de satélite, tiene un futuro prometedor; sin embargo uno de sus principales retos es la validación de los datos obtenidos, tanto de los patrones de distribución espacial de la precipitación como de las estimaciones de su intensidad y duración (Negri and Adler, 1993; Levizzani *et al.*, 2002b; Scofield and Kuligowski, 2002; Fu and Liu, 2003; Feidas and Cartalis, 2005). Como parte de este trabajo, se pretenden abordar estas problemáticas particulares como uno de los asuntos más importantes a tomar en cuenta al momento de generar estimaciones de precipitación durante la temporada de calor en el noroeste mexicano.

Capítulo 2

LA BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN ÚTIL DENTRO DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE CONOCIMIENTO GEOESPACIAL

2.1. Antecedentes

Se estima que más del 80% de los datos almacenados en bases de datos que los seres humanos han recolectado hasta ahora son datos geoespaciales; por ejemplo el proyecto *Earth Observing System Data and Information System* (EOSDIS) de la *Nacional Aeronautics and Space Administration* (NASA) tiene archivados más de 2 *Petabytes* de datos, con la inclusión diaria de 3 *Terabytes* de nuevos datos (Ramapriyan *et al.*, 2002; Di, 2005).

Lo anterior es un claro ejemplo de que en los últimos años las nuevas tecnologías nos han permitido aumentar dramáticamente nuestra capacidad para coleccionar *Terabytes* de datos geoespaciales en bases de datos. Esto ha creado la urgente necesidad por encontrar nuevos métodos y nuevas herramientas que puedan transformar automática e inteligentemente, en la medida de lo posible, grandes cantidades de datos geoespaciales en

información útil. La pregunta de cómo hacer frente a este desafío, resultado de la revolución tecnológica que acelera la producción de datos, puede tener su respuesta en el proceso de *Knowledge Discovery in Databases* (KDD). Originalmente, el proceso de KDD ha sido propuesto por un grupo de investigadores, en ciencias de la información, preocupados por desarrollar métodos y técnicas que le dieran sentido a grandes cantidades de datos. El proceso de KDD se refiere al descubrimiento de información útil a partir de grandes volúmenes de datos. Dicho proceso incluye aspectos tales como: el almacenado, acceso y manejo efectivo de los datos, los algoritmos empleados para el descubrimiento de información útil a partir de la identificación de patrones en los datos y los resultados de estos descubrimientos que pueden ser interpretados y visualizados dentro de un ambiente de interacción hombre-máquina principalmente. Con el fin de proporcionar una descripción más detallada de las actividades multidisciplinarias que conforman dicho proceso, a continuación se presenta una perspectiva general del marco conceptual del proceso de KDD.

El proceso de KDD se define como, el proceso no trivial de identificación de patrones válidos, novedosos, potencialmente útiles y en última instancia comprensibles, a partir de datos. (Fayyad *et al.*, 1996a). En este sentido y de acuerdo con sus autores originales, el término **patrón** se define como una expresión en un cierto lenguaje que describe un subconjunto de datos o un modelo aplicable a esos datos. El término **proceso** implica la existencia de muchos pasos que abarcan la preparación de los datos, la búsqueda de patrones, la evaluación del conocimiento y el refinamiento final repetido en iteraciones múltiples. El proceso se asume como **no trivial** ya que implica la búsqueda de modelos y parámetros. Los patrones descubiertos deben ser **válidos** con un cierto grado de certeza. También se busca que los patrones sean **novedosos** (por lo menos al sistema y preferiblemente al usuario) y **potencialmente útiles** para el usuario. Finalmente los patrones deben se

comprensibles, si no de forma inmediata, al menos después de un cierto post-procesamiento. El flujo básico de los pasos que componen al proceso de KDD se ilustra en la Figura 2.1.

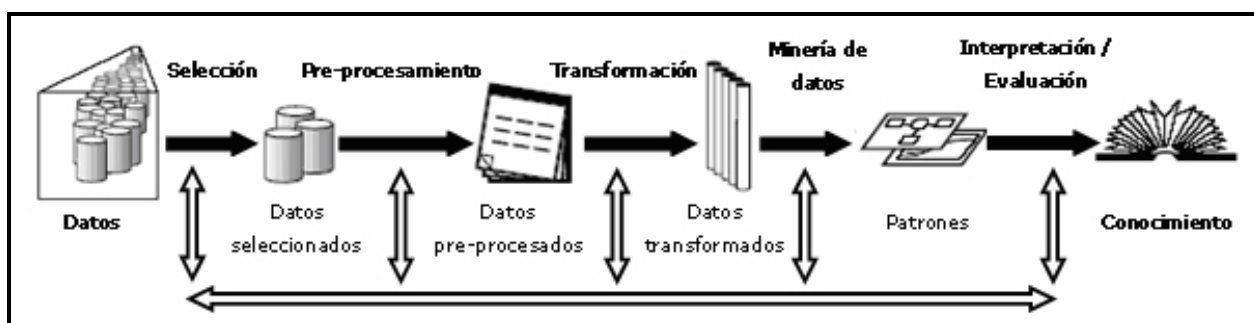


Figura 2.1. Descripción de los pasos que constituyen el proceso KDD

El proceso de KDD es interactivo e iterativo, pues está constituido de numerosos pasos, con muchas decisiones tomadas por los usuarios, por lo que queda de manifiesto la naturaleza interactiva del proceso. A continuación se enumeran los pasos básicos que componen al proceso de KDD.

1. **Aprendizaje del dominio de la aplicación:** Consiste en desarrollar y entender el dominio de la aplicación e identificar las metas del proceso de KDD desde el punto de vista de los usuarios
2. **Creación del conjunto de datos de interés:** Incluye la selección del conjunto de datos sobre el cual es realizado el proceso de descubrimiento de conocimiento
3. **Limpieza de los datos y preprocesamiento:** Incluye operaciones básicas, tales como eliminación de ruido entre otras, así como algunas decisiones en cuanto a ediciones de los datos

4. **Reducción y proyección de los datos:** Trata sobre la búsqueda de características útiles para representar los datos
5. **Elegir la función de minería de datos:** Incluye la decisión del propósito del modelo derivado del algoritmo de minería de datos
6. **Elegir el algoritmo para la minería de datos:** Es la selección de los métodos empleados para la búsqueda de patrones en los datos, se incluye también la selección de parámetros apropiados
7. **Minería de datos:** Es la búsqueda de patrones de interés en una forma de representación particular o en un conjunto de dichas representaciones
8. **Interpretación:** Consiste en interpretar los patrones descubiertos, para volver a cualesquiera de los pasos anteriores o para su posible visualización por parte de los usuarios, eliminando patrones redundantes y traduciendo los patrones útiles en términos comprensibles
9. **Empleo del conocimiento descubierto:** Incluye la incorporación de este conocimiento a las partes interesadas, ya sea para la toma de decisiones, la documentación o la divulgación, así como la evaluación para su comprobación y resolución de conflictos con el conocimiento previamente aceptado.

El proceso de KDD tiene un carácter altamente interactivo, flexible a los propósitos de los usuarios. Contiene ciclos entre cualesquiera dos pasos, lo que habla de la naturaleza iterativa del proceso. En la literatura sobre KDD, la mayoría de las investigaciones se han enfocado en la minería de datos, sin embargo los otros pasos que componen al proceso son igualmente importantes

para el uso adecuado del proceso de KDD en la construcción de conocimiento (Fayyad *et al.*, 1996b).

Es importante mencionar que aunque el planteamiento original del proceso de KDD puede ayudarnos en la búsqueda de información útil en bases de datos de gran volumen, es posible plantearlo también como un proceso no exhaustivo de búsqueda de información útil basado en actividades acotadas de selección y manejo de datos, construcción de hipótesis, análisis y evaluación de patrones geoespaciales. Las siguientes secciones, pretenden dar los pasos necesarios para adaptar el proceso de KDD a realizar una búsqueda selectiva de patrones significativos de la precipitación, en particular de las tormentas producidas durante los meses de la temporada de calor en el noroeste mexicano.

2.2. Consideraciones iniciales

El propósito principal de esta sección es el de dar a conocer los aspectos necesarios para la selección de un marco teórico adecuado para la búsqueda de información de utilidad, a partir de la identificación de patrones significativos en bases de datos, que también esté soportado por fundamentos sólidos que tomen en cuenta las características únicas de los datos geoespaciales. Dichas características pueden disgregarse en tres aspectos; la naturaleza propia de los datos geoespaciales, la complejidad de las relaciones y transformaciones temporales, y la gran cantidad de información que se pueden incorporar al proceso de búsqueda de patrones útiles acerca de fenómenos geoespaciales.

La primera característica, la naturaleza propia de los datos geoespaciales, se refiere principalmente a los conceptos de dependencia y heterogeneidad espacial, los cuales implican por un lado, la falta de independencia y, por

tanto, la existencia de una estructura espacial entre datos determinada por la localización absoluta o relativa de dichos datos y, por el otro, la existencia de cierta inestabilidad en dicha estructura espacial de los datos que determina diferencias entre estos (Li *et al.*, 2000; Friis-Christensen *et al.*, 2001; Kuba, 2001).

El primer efecto espacial, la dependencia o autocorrelación, consiste en la falta de independencia que se produce a menudo entre las observaciones de datos; se trata probablemente del efecto espacial mejor conocido gracias a la formulación de la primera ley de la geografía propuesta por Tobler (1979) según la cual “todo tiene que ver con todo, pero las cosas cercanas están más relacionadas entre sí que las cosas lejanas”¹. La dependencia espacial puede ser explicada a partir de la existencia de una relación funcional entre lo que ocurre en uno y otro lugar determinado del espacio; es decir, una variable se encuentra espacialmente autocorrelacionada cuando los valores observados en un lugar determinado dependen no sólo de ciertos factores externos, sino de los valores observados en regiones vecinas (Legendre, 1993).

El segundo efecto espacial, la heterogeneidad, está relacionado con la diferenciación espacial y se define por la ausencia de estabilidad en el espacio por parte de los datos; lo anterior implica que, en los modelos espaciales, las formas funcionales y los parámetros varían con la localización geográfica no siendo homogéneos para todo el conjunto de datos. La compleja interacción resultado de la estructura de los datos puede generar dependencia espacial combinada con heterogeneidad espacial, haciéndose altamente complicado distinguir entre ambos efectos (Legendre, 1993; Smith and Mark, 2001).

La inclusión de la variable tiempo en los datos geoespaciales, la segunda característica, introduce complejidad adicional en la búsqueda de patrones

¹ Citado por (Chasco, 2003)

geoespaciales útiles. El tiempo tiene diferente comportamiento que el espacio: es direccional, cíclico y con características únicas de escalamiento. Contrario a la situación multidireccional de los efectos de dependencia y heterogeneidad espacial, el tiempo nos presenta un claro escenario unidireccional que tiene que ser tomado en cuenta (Roddick, 2002).

La tercera característica se refiere a la capacidad tecnológica que, con el paso de los años, las bases de datos tienen para incluir información cada vez más diversa. La incorporación de la multimedia que incluye audio, imágenes, video y textos que se pueden relacionar inequívocamente con la localización de la colección de datos o de su contenido; es una muestra clara de la diversidad de información que se puede incluir en la búsqueda de información geoespacial útil (Buttenfield *et al.*, 1991; Miller and Han, 1999; Buchanan *et al.*, 2001).

Con la revisión de las tres características anteriores, se resalta la importancia del adecuado manejo de los datos, implícito en la segunda D dentro del proceso de KDD. Lo que convierte al campo de las bases de datos en una fuerza impulsora ante el problema de la búsqueda de información potencialmente útil (Fayyad *et al.*, 1996a).

2.3. Marco teórico

La búsqueda de patrones útiles dentro del proceso de KDD con énfasis en las características únicas de los datos geoespaciales es conocido como *Geographic Knowledge Discovery in Databases* (GKDD). El objetivo principal de GKDD es el de aumentar la capacidad de los seres humanos de obtener información útil de bases de datos geoespaciales que comprenden una amplia gama de perspectivas e intereses que van de lo físico a lo social y todos los puntos entre ellos; y que además experimentan cada vez más una mayor

infraestructura para la recopilación de datos (Aldridge, 2001; Bédard *et al.*, 2003).

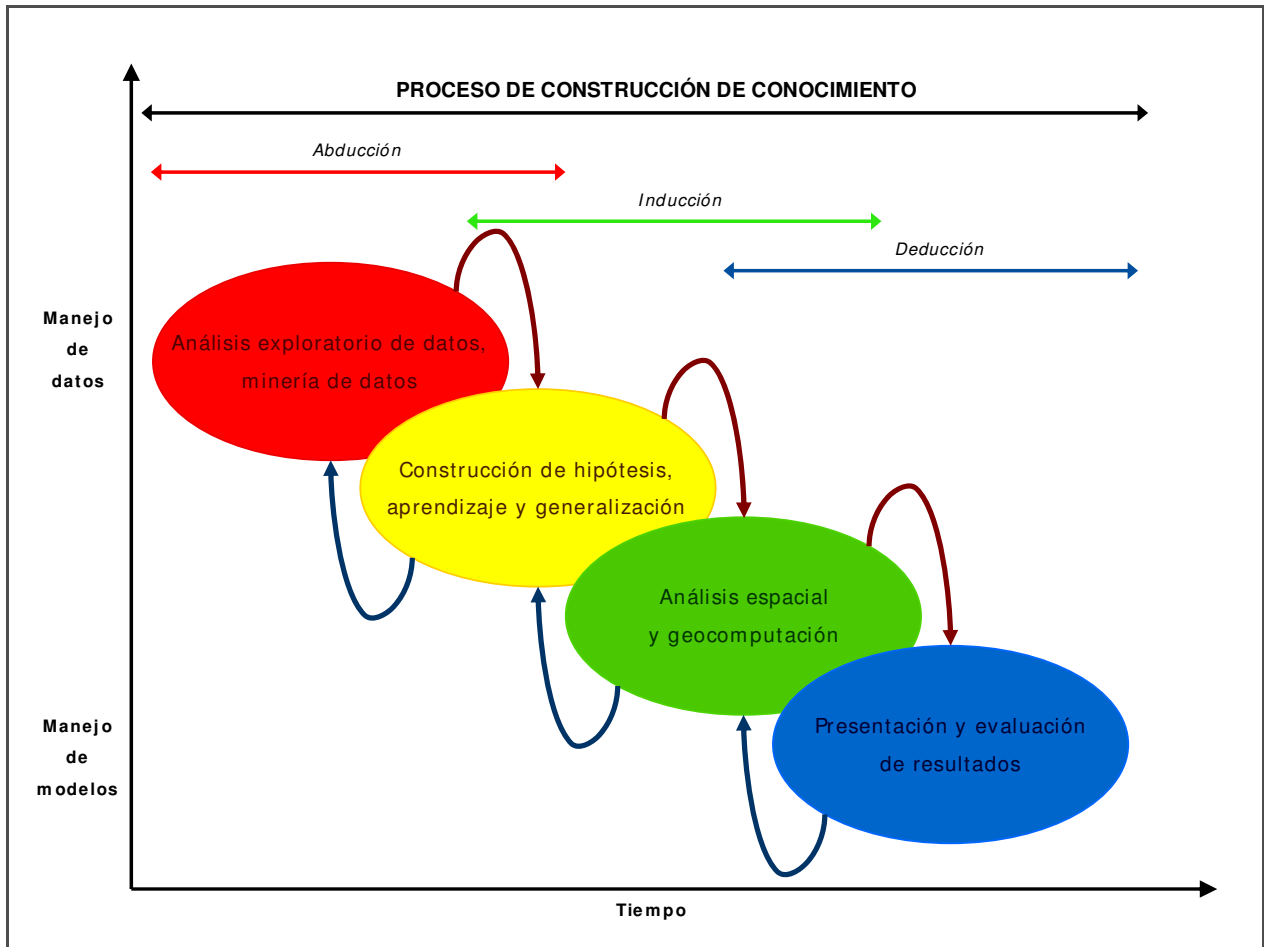


Figura 2.2. Modos de inferencia científica aplicados a la búsqueda de información útil

Debido al carácter cuantitativo de los datos geoespaciales la aproximación en GKDD, requiere necesariamente basarse en el método científico, el cual refleja en el flujo de sus actividades la estructura necesaria para la construcción de conocimiento. El método científico es el medio por el cual se penetra en una verdad sin descubrir; se realiza a partir de (1) identificar el problema que define a la meta de la búsqueda, (2) recopilar los datos con los que se tiene la esperanza de resolver el problema, (3) postulando una hipótesis como el medio más lógico para que los datos localizados ayuden a resolver el problema y (4)

probar empíricamente la hipótesis mediante el procesamiento de los datos para ver si la interpretación de ello resuelve la pregunta inicial (Leedy, 1993).

La Figura 2.2 muestra las fases del método científico inmerso en GKDD, el cual se inicia con la exploración de los datos y el desarrollo de la hipótesis de trabajo, estos conducen a la búsqueda de información en función del tipo de análisis planteado y a la evaluación de los resultados producidos (Gahegan *et al.*, 2005).

Este acercamiento al método científico, con orígenes en la investigación práctica, puede ser replanteado como el marco teórico para la búsqueda de información de útil a partir de la identificación de patrones significativos en bases de datos. Para establecer dicho proceso, deben de tomarse en cuenta una serie de aproximaciones dirigidas por métodos específicos que formalizan el conocimiento (abducción, inducción, deducción) (Gahegan *et al.*, 2005). Filosóficamente el concepto de abducción está más cercano al descubrimiento. Abducción es el acto simultáneo de descubrir una estructura mediante algunos datos y plantear una hipótesis con la cual explicar dicha estructura. La estructura descubierta es necesariamente no significativa en un principio, mientras que la explicación teórica de ella puede ser construida como una extensión del conocimiento ya construido (Aldridge, 2001).

Debido a que los métodos de abducción son difíciles de formalizar en términos computacionales, la identificación de patrones significativos se enfoca principalmente en los métodos inductivos-deductivos (inducción, comprensión y aproximación). Estos métodos facilitan el entendimiento de la diferencia estructural entre patrones, lo que puede conducir al descubrimiento de tendencias o características significativas que pueden ser asociadas tanto a las entidades, como a las relaciones o los procesos involucrados dentro del dominio de los fenómenos geoespaciales, lo que permite abordar su

complejidad. Sin embargo, es precisamente la complejidad de lo geoespacial una de las dificultades principales que restringen la identificación de patrones significativos dentro del dominio de GKDD. No hay hasta ahora un modelo geoespacial universal aceptado y los modelos en ejecución actualmente varían perceptiblemente uno de otro, a menudo de maneras absolutamente fundamentales (Gahegan, 2001).

Para la correcta identificación de patrones significativos dentro de GKDD, deben tratar de resolverse tres problemas distintos:

- Los datos geoespaciales a menudo no pueden ser comparados o combinados directamente para la identificación de patrones significativos
- Es difícil aplicar conocimiento geoespacial formal al proceso de búsqueda de información útil, puesto que tal conocimiento no está disponible o no ha sido generado
- Cuando se descubren nuevos patrones potencialmente significativos, es difícil representarlos formalmente como información útil

En este sentido es necesario apreciar que las principales características del modelo geoespacial para la adecuada identificación de patrones significativos, deben ser, por un lado la capacidad del modelado espacio-temporal de los problemas abordados y por el otro, una necesidad imperiosa de formalizar como información de utilidad los patrones descubiertos.

Muchos de los análisis contemporáneos realizados con datos geoespaciales se basan principalmente en la noción de proximidad, donde el espacio y el tiempo proporcionan el acoplamiento necesario a otros factores

potencialmente interesantes y al contexto de influencia de los fenómenos bajo estudio. Hoy se reconocen extensamente las condiciones complejas de dependencia y heterogeneidad espacial presentes en las bases de datos geoespaciales, las cuales han ganado mucha atención durante las últimas dos décadas (Ester *et al.*, 1999).

En atención a estas características de los datos geoespaciales, se han desarrollado modelos geoespaciales espacialmente explícitos. Se dice que un modelo es espacialmente explícito cuando distingue comportamientos y predicciones según localizaciones geográficas y que además emplea para ello uno o más conceptos espaciales tales como distancia, localización, conectividad, adyacencia o dirección (Budak *et al.*, 2004). Es decir, que al emplear un modelo geoespacial, los resultados obtenidos dependen de las propiedades geoespaciales de los propios datos usados para la investigación del fenómeno en estudio. Convencionalmente dicha investigación se basa en gran parte en las mediciones métricas (es decir cuantitativas). Sin embargo, los modelos geoespaciales expresan y entienden también relaciones geoespaciales como lengua natural en vez de medidas métricas. Es así que dentro de los modelos geoespaciales se establece una semántica que permite realizar preguntas, empleando para ello las relaciones geoespaciales de los datos. Entre las principales relaciones geoespaciales se encuentran las siguientes:

- **Relaciones topológicas.** Se refieren a características como conectividad, adyacencia y a la intersección entre objetos geoespaciales

- **Relaciones de dirección cardinal.** Denotan direcciones relativas entre objetos geográficos a través de términos direccionales

- **Relaciones de proximidad.** Se refieren tradicionalmente a las distancias geográficas entre objetos geoespaciales

En resumen, los modelos geoespaciales proporcionan medios rápidos y técnicamente sólidos que permiten archivar, manipular, analizar, comunicar y utilizar explícitamente los datos para entender todos los aspectos de dependencia y heterogeneidad presentes en los fenómenos físicos y humanos que suceden en la superficie terrestre o cerca de ella. De todos los modelos geoespaciales disponibles, probablemente el concepto GRID brinde el mejor ambiente tanto para el completo acceso y el manejo adecuado de los datos, como para el modelado geoespacial y la producción de productos geoespaciales virtuales (Di, 2003). Dentro del proceso de GKDD, el ambiente GRID es el marco de referencia más prometedor para futuras implementaciones de alto rendimiento acerca de aplicaciones de distribución intensiva de datos geoespaciales. La combinación de bases de datos geoespaciales de gran tamaño, la gran cantidad de recursos y usuarios y el intensivo análisis computacional están demandando plataformas de este tipo para la distribución del conocimiento descubierto (Cannataro and Talia, 2003a)

Actualmente algunas de las nuevas aproximaciones al análisis espacial están basadas en técnicas del campo de la inteligencia artificial tales como: los sistemas expertos, las redes neuronales, las redes bayesianas y los algoritmos genéticos; o en modelos espaciales como los autómatas celulares o los modelos basados en agentes (O'Sullivan and Unwin, 2003).

Ésta naciente relación entre las nuevas aproximaciones al análisis espacial y el concepto GRID permite apropiarse del marco metodológico del modelado geoespacial en GRID. Las etapas que engloban al proceso de búsqueda de información útil dentro del modelado geoespacial en GRID son:

- **Geo-selección.** Consiste en definir los datos necesarios para responder las preguntas planteadas. Las preguntas deben ser tratadas a través de los pasos subsecuentes del modelado geoespacial, dichos pasos transforman los datos geoespaciales en información. En este paso también se incluye el acceso a los datos, lo cual ayuda y define en muchos de los casos el tipo de preguntas que pueden plantearse.

Dentro del modelado geoespacial en GRID, la implementación de servicios de búsqueda y acceso de datos geoespaciales en ambiente GRID son una parte muy importante dentro de la geo-selección, ya que éstos, facilitan la distribución en línea de datos geoespaciales y sus metadatos asociados en los llamados servicios GRID (Di, 2003).

En resumen, la etapa de geo-selección implica el aprendizaje del dominio del problema del mundo real a solucionar mediante el método de inferencia de abducción, para definir y localizar los datos en repositorios de datos geoespaciales, para que, en la mayoría de los casos se inicie una transferencia en línea de ellos y de sus metadatos asociados, para que puedan ser empleados.

- **Geo-ensamble.** Es la organización de los datos geoespaciales de múltiples fuentes, en una forma homogénea, para que principalmente mediante métodos específicos de inducción se inicie, con los datos ya recopilados, la construcción de hipótesis que ayuden a solucionar el problema planteado.

En general se trata de realizar una serie de transformaciones a los datos geoespaciales obtenidos en la etapa de geo-selección para así obtener nuevas capas de datos listos para llevar a cabo el análisis. Dentro de la

etapa de geo-ensamble, estas nuevas capas de datos pueden ser creadas a partir de la transformación de los datos geoespaciales obtenidos en la etapa de geo-selección.

En esta etapa se incluyen básicamente algunas operaciones de transformación, que en el caso particular de imágenes de satélites, incluyen operaciones de preprocesamiento como reproyección, remuestreo, submuestreo, corrección geométrica y radiométrica. Dentro del modelado geoespacial en GRID, las operaciones de transformación, no solamente incluyen ecuaciones algebraicas, ya que se pueden incluir también manejo estadístico, reclasificación de zonas, combinación de datos geoespaciales, cálculo de distancias y direcciones, caracterización de formas y medición de tamaños entre otras más.

■ **Geo-análisis.** Consiste en la extracción de patrones geoespaciales útiles, a partir de la ejecución de procedimientos llevados a cabo con los datos creados en la etapa de geo-ensamble. Todas las operaciones que tienen como entrada una o más capas de datos, pueden generar una nueva salida que a su vez puede ser utilizada como entrada para otra operación. La secuencia de esta serie de operaciones se denomina procedimientos. Dichos procedimientos son empleados sobre todo para modelar espacialmente algunos fenómenos complejos. Con la generación de procedimientos se facilita la interpretación de los datos geoespaciales. La interpretación es un proceso en el cual los datos son transformados en información de utilidad

En esta etapa se incluyen también la obtención, el análisis y la validación de los resultados obtenidos con la aplicación de dichos procedimientos. Lo anterior se lleva a cabo en términos de la evaluación

de criterios predefinidos o de algún otro elemento planteado en el problema original.

En la búsqueda de información útil, geo-análisis es la etapa que consume la mayor cantidad de tiempo, ya que consiste en probar la hipótesis de trabajo mediante procedimientos definidos con un mayor énfasis en métodos de deducción y en la evaluación de los resultados producidos.

De acuerdo con GKDD, la búsqueda de información útil mediante el modelado geoespacial en GRID permite convertir datos geoespaciales en información útil, con cierto grado de validación, demandado por un usuario específico, ya que mediante la elaboración de procedimientos se automatiza el proceso de transformación de datos geoespaciales en información (Bruckner and Schneider, 2001; Cannataro and Comito, 2003; Cannataro and Talia, 2003a; Di *et al.*, 2003).

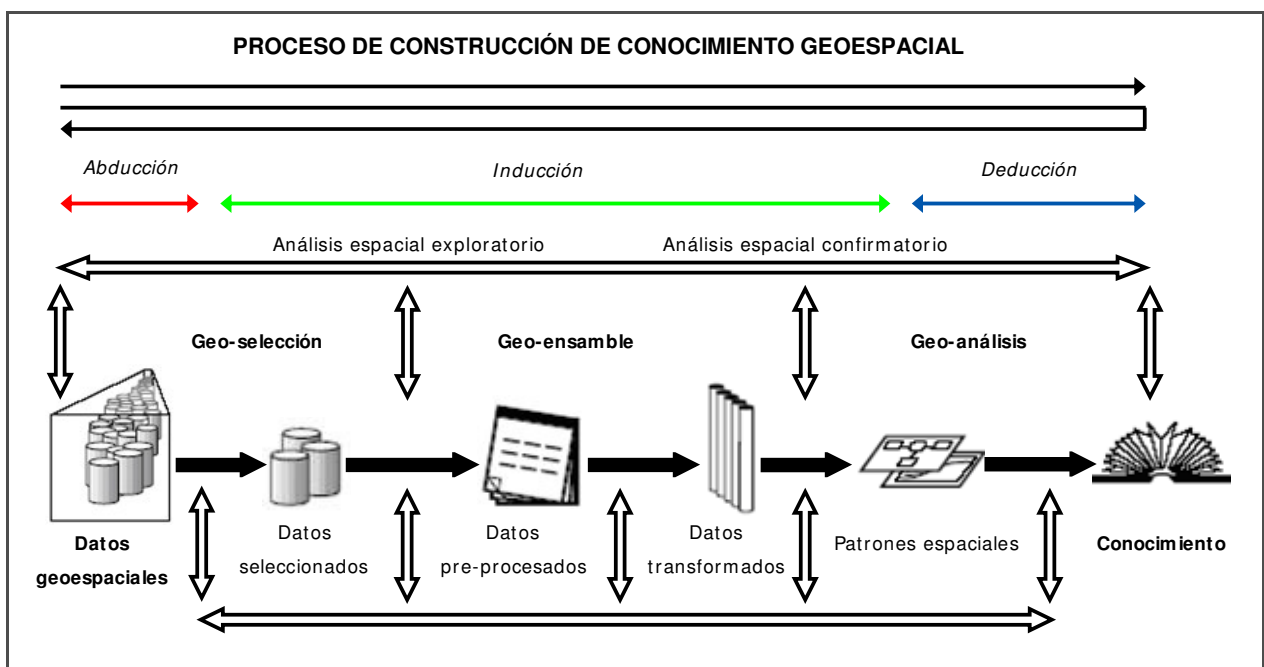


Figura 2.3. La búsqueda de información geoespacial útil

La Figura 2.3 muestra de forma conceptual la búsqueda de información útil adoptado en este trabajo. El proceso se inicia mediante métodos de abducción que permiten obtener información previa acerca del fenómeno en particular, de tal forma que se construya el dominio de la problemática, facilitando así la etapa de geo-selección de los datos. La segunda etapa aunque no trivial, puede automatizarse mediante procedimientos que facilitan la transformación de los datos recopilados, en entradas útiles para la etapa de geo-análisis. Esta última etapa, consiste de la aplicación de algoritmos de análisis espacial implementados computacionalmente, que permitan la identificación de patrones significativos que pueden eventualmente ser interpretados como información de utilidad.

2.4. El proceso de búsqueda de información geoespacial útil

La aproximación a la búsqueda de información geoespacial útil acerca de los eventos de precipitación intensa en el noroeste de México, pretende el mejor entendimiento de los procesos que originan la precipitación por convección en el noroeste mexicano, de tal forma que la obtención de estimaciones de precipitación con percepción remota generadas en este trabajo, permitan la identificación de patrones geoespaciales significativos acerca del fenómeno de la precipitación. Los patrones descubiertos en un intervalo corto de tiempo y cantidad de datos, deberán permitir evaluar la capacidad de la red de pluviógrafos digitales para capturar y en su caso reproducir la variabilidad espacio-temporal de los eventos de precipitación intensa ocurridos en el noroeste mexicano durante la temporada de calor 2003.

Para este trabajo, dentro de cada una de las etapas que definen la búsqueda de información geoespacial útil, se plantean a manera de modelos cartográficos, el tipo de comandos, funciones, operadores y sentencias que se

requieren para la identificación de patrones significativos². Previo entendimiento del dominio del fenómeno, la etapa de geo-selección, está dedicada a la búsqueda y selección de los datos geoespaciales tanto para la obtención de estimaciones de precipitación con percepción remota, como de datos para su validación. En la etapa de geo-ensamble, se presenta la adecuación y organización de los datos geoespaciales para que mediante un sencillo ejercicio de análisis espacial exploratorio, se elabore la hipótesis de trabajo que permita formalizar la búsqueda de información útil a partir de la identificación de patrones significativos. Por último y mediante la implementación de un algoritmo, en la etapa de geo-análisis, se lleva a cabo la identificación no exhaustiva de patrones significativos acerca del fenómeno de la precipitación intensa en el noroeste mexicano durante la temporada de calor.

² Todos los modelos cartográficos de este trabajo, están implementados en ARC/INFO.

Capítulo 3

DEFINICIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

3.1. Propósito del trabajo

Pese a que el *North American Monsoon* (NAM) suele ser un fenómeno meteorológico con patrones preestablecidos, la variabilidad espacial y temporal de las lluvias no suele ser regular año con año. Esto ocasiona que el éxito de las actividades productivas, de consumo y de generación de energía eléctrica de la región noroeste del país esté definido por la disponibilidad del agua de lluvia. Por lo que generar información de utilidad para comprender mejor la distribución espacial de la lluvia es en consecuencia un requisito indispensable para la correcta planeación de las distintas actividades socioeconómicas de la región.

En virtud de lo anterior y como un esfuerzo internacionalmente coordinado, la comunidad científica ha desarrollado un ambicioso programa al que se le denomina *North American Monsoon Experiment* (NAME). El propósito principal del proyecto es el de determinar el origen y los límites de la predicción de la lluvia durante la temporada de calor en la región, con énfasis en la

variabilidad interanual. Dicho proyecto es auspiciado en gran parte por la *Nacional Oceanic & Atmospheric Administration* (NOAA) y en él participan distintas dependencias de Estados Unidos y de México. Estas instituciones incluyen, el *Nacional Center for Atmospheric Research* (NCAR), la *University of Arizona* (UA), el Centro de investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE), el Instituto del Medio Ambiente y el Desarrollo Sustentable del Estado de Sonora (IMADES), el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON), la Universidad de Sonora (UNISON), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) entre muchos otros. Se trata sin duda alguna del mayor esfuerzo dirigido hasta ahora para llevar a cabo la monumental tarea de entender mejor el clima de la región¹.

Los principales objetivos científicos del NAME son promover una mejor comprensión y una simulación más realista de:

1. Los procesos convectivos de la temporada de calor en terreno complejo
2. La variabilidad intraestacional del monzón norteamericano

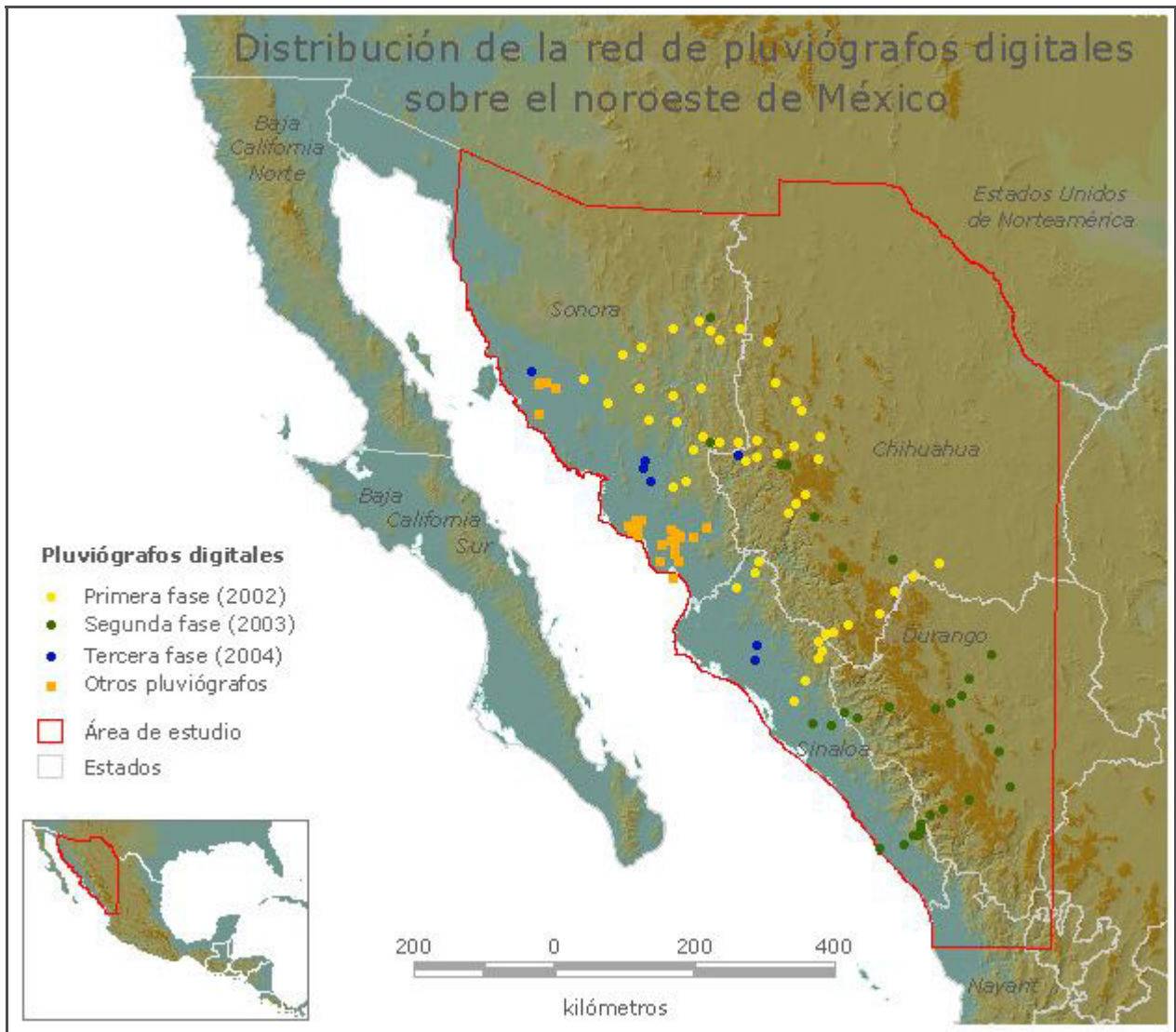
De esta forma, y como parte de los trabajos del NAME realizados en México, se contribuyó a mejorar la red climatológica convencional de la Comisión Nacional del Agua (CNA). Esta modificación consistió en la implementación por etapas de una red de pluviógrafos digitales (que registran cada 0.25 *mm* de lluvia) y otra de pluviómetros manuales en los estados de Sonora, Chihuahua, Sinaloa y Durango (Gochis *et al.*, 2003).

¹ Citado en (NAME, 2002)

Durante la primera etapa del proyecto, en el verano de 2002, se instalaron 50 pluviógrafos; durante la primavera de 2003 se sumaron 30 pluviógrafos más como parte de la segunda etapa; y para junio de 2004 se instalaron 7 instrumentos más, concluyendo así, la tercera y última etapa del proyecto. La red al final consta de 87 pluviógrafos que sumados a los pluviógrafos del proyecto de modelación de la humedad del suelo entre los ríos Sonora y San Miguel en el estado de Sonora conforman una red de más de 100 pluviógrafos digitales. De esta red aproximadamente el 40% está instalada en lugares donde la CNA normalmente toma lecturas diarias de lluvia; el 60% restante se instaló estratégicamente de tal manera que se registrara el gradiente topográfico de la zona y se cubrieran espacialmente áreas donde no se realizaban registros (Figura 3.1.).

Con lo anterior, se pretende que la red de pluviógrafos del NAME sea la plataforma de validación de investigaciones que se llevan a cabo tanto en México como en el extranjero por los diversos grupos de científicos que forman parte del proyecto (Gochis *et al.*, 2004). Estos proyectos incluyen temas tales como la explicación de la actividad convectiva, la medición y modelación de la dependencia topográfica de la precipitación durante el monzón, el origen de los sistemas convectivos de mesoescala y la influencia de las perturbaciones tropicales.

Así, para cumplir sus propósitos de validación, es importante conocer si la red actual de pluviógrafos captura la gran variabilidad espacio-temporal de la precipitación del noroeste mexicano. Una adecuada descripción del fenómeno espacio-temporal deberá estar basada en la frecuencia de las observaciones y la cobertura espacial de las estaciones pluviométricas, sobre todo para capturar la variabilidad de la precipitación convectiva durante la temporada de calor.



Elaboración propia con datos del NAME y de SRTM a partir de (Gochis *et al.*, 2003)

Figura 3.1. Distribución de la red de pluviógrafos digitales del proyecto NAME

Sin embargo, hay elementos suficientes para suponer que no sólo empleando la red de pluviómetros digitales del NAME, se pueda capturar completamente la variabilidad espacial y temporal de la lluvia en toda la región; ya que la distribución espacial de las estaciones podría ser insuficiente para capturar la variabilidad espacial de la cantidad de lluvia. De esta manera, este trabajo de tesis tiene como principal propósito desarrollar una metodología alternativa, basada en los principios de la percepción remota, para la obtención de estimaciones que permitan capturar adecuadamente la variabilidad espacial y

temporal de las precipitaciones convectivas en la región noroeste de México ocurridas durante los meses de la temporada de calor. Las estimaciones de precipitación de alta resolución espacial y temporal realizadas con percepción remota, ofrecen, bajo un proceso adecuado, convertirse en una herramienta interesante para la búsqueda de información útil acerca del fenómeno de la precipitación.

3.2. Justificación de la problemática

Como sabemos la precipitación es el principal flujo de entrada de agua a los continentes, por lo que cuantificarla es de vital importancia para múltiples propósitos. Sin embargo, su alta variabilidad espacial y temporal ha sido un obstáculo para su óptima cuantificación. “La *World Meteorological Organization* (WMO) ha estimado que más de tres cuartas partes de la superficie terrestre, carece de estaciones para la medición de la precipitación y que en el caso particular de la República Mexicana apenas la mitad de los estados cuentan con la red de medición mínima recomendada”². Los estados del noroeste mexicano a pesar de contar con un poco más de las estaciones mínimas recomendadas por la WMO y ser una de las zonas agrícolas más importantes del país, con una superficie aproximada de 1,300.000 hectáreas bajo riego, precisan de mayor información acerca de las lluvias convectivas ocurridas durante la temporada de calor, ya que éstas se presentan al principio del ciclo agrícola (INE, 2004).

Sin embargo, la precipitación como variable física forma parte de un proceso complejo conocido como Ciclo Hidrológico, definido como el conjunto de todos los procesos de transformación del agua en la Tierra. Se considera que inicia con la evaporación del agua de los océanos. El vapor de agua resultante es transportado por las masas de aire en movimiento hacia los continentes. Bajo

² Citado en (WMO, 2000)

condiciones meteorológicas adecuadas el vapor de agua se condensa para formar nubes, las que a su vez dan origen a las precipitaciones (Figura 3.2.).

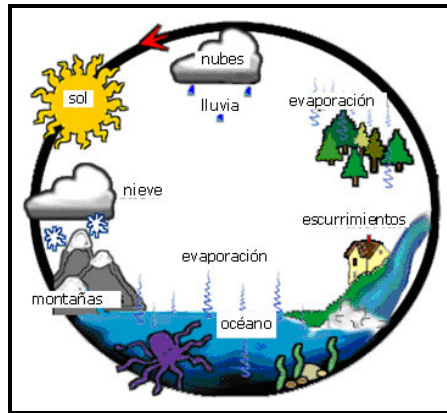


Figura 3.2. Procesos del ciclo hidrológico

Parte del agua precipitada no alcanza la superficie terrestre ya que es evaporada de nuevo o interceptada por la cobertura terrestre; la parte que sí alcanza el suelo se puede mover hacia las corrientes bajas o bien infiltrarse. El agua interceptada y una parte de la que escurre por la superficie, se evapora nuevamente. De la precipitación que llega hasta las corrientes, una parte se infiltra y otra escurre hasta los océanos y demás cuerpos de agua; de la parte infiltrada una parte es absorbida por las plantas y posteriormente es transpirada, casi en su totalidad hacia la atmósfera, mientras que la otra parte fluye bajo la superficie terrestre hacia las corrientes, el mar, otros cuerpos de agua o bien hacia las zonas profundas del suelo para ser almacenada como agua subterránea y después aflorar en manantiales, ríos o el mar (Ramírez, 2004).

Debido a su gran importancia y sin importar la complejidad en su cuantificación, ocasionada por su alta variabilidad espacial y temporal, es justificado extraer información útil de la precipitación; empleando para ello todo tipo de procedimientos. La medida de la cantidad de lluvia a partir del uso exclusivo de instrumentos de medición en tierra, ya no es capaz de

satisfacer las necesidades de información más especializada acerca de la distribución espacial de la precipitación, sobre todo lo que se refiere a la definición de patrones espacio-temporales.

3.3. Planteamiento específico

Durante la realización de este trabajo, se pretenden identificar los elementos conceptuales necesarios que permitan cuantificar de manera adecuada y mediante técnicas de percepción remota la cantidad de lluvia ocurrida durante la temporada de calor en el noroeste mexicano. El proceso de búsqueda de información útil planteado aquí, emplea como entrada, datos geoespaciales de diversos sensores remotos con la finalidad de obtener estimaciones de precipitación de alta resolución espacio-temporal que permitan la extracción de patrones significativos acerca de la ocurrencia de tormentas durante los meses de la temporada de calor.

Para llevar a cabo lo anterior, en este trabajo se emplean algunas herramientas de la Geomática para la recopilación y medición de datos a partir de técnicas de percepción remota principalmente; su análisis y modelación mediante algunas aproximaciones del análisis espacial, algoritmos y modelos matemáticos. Todo lo anterior bajo el hilo conductor de lo que en este trabajo se denomina la etapa de búsqueda de información útil dentro del proceso de construcción de conocimiento geoespacial.

3.4. Alcances y objetivos

Los alcances generales del presente trabajo son:

- Contribuir al conocimiento de la distribución espacial de los eventos de precipitación por convección ocurridos en los meses de

junio, julio y agosto, durante la ocurrencia del Monzón Norteamericano en la Región Noroeste de México.

- Explorar el diseño e implementación de aplicaciones de Geomática, basadas en la búsqueda de información útil a partir de bases de datos potencialmente grandes

Los objetivos del presente trabajo son:

Objetivo general

- Desarrollar los componentes teóricos necesarios para llevar a cabo la búsqueda de información útil que permita generar estimaciones de precipitación que incorporen la distribución espacial de la lluvia de los eventos de precipitación intensa ocurridos durante la temporada de calor en el noroeste mexicano.

Objetivos particulares

- Aplicar técnicas de estimación de precipitación con percepción remota, con el propósito de identificar patrones significativos de la cantidad de lluvia para eventos de precipitación intensa, ocurridos durante la temporada de calor en el noroeste mexicano.
- Generar información útil que permita evaluar la capacidad de la red de pluviógrafos digitales del NAME, para capturar y en su caso reproducir la variabilidad espacial y temporal de los eventos de precipitación ocurridos durante la temporada de calor en el noroeste mexicano.

Capítulo 4

ELEMENTOS DE GEO-SELECCIÓN

4.1. Requisitos para la geo-selección de datos geoespaciales

Para la medición de la precipitación en alguna región geográfica específica, en la mayoría de los casos se emplean redes de pluviógrafos. Estos instrumentos pueden obtener mediciones sumamente precisas en los puntos preseleccionados, pero para obtener el patrón espacial de la distribución de la lluvia, es necesario realizar extrapolaciones a partir de estas localidades. La correcta determinación del patrón espacial depende de la ubicación, densidad, y método de extrapolación, sin embargo por lo general los errores se incrementan cuando estas mediciones puntuales son extrapoladas. Esto es especialmente cierto en el caso de tormentas convectivas cuando incluso redes densas de pluviógrafos pueden no representar adecuadamente la distribución espacial de las tormentas (Sevruk, 1982).

Una alternativa para obtener una mejor representación del patrón espacial de la precipitación, es utilizar radares meteorológicos para áreas espaciales pequeñas y sensores multiespectrales sobre plataformas satelitales, para escalas espaciales mayores. Estos últimos, los sensores remotos, proveen estimaciones continuas de la precipitación en tiempo y espacio. Desafortunadamente, no es posible dar una evaluación precisa en la exactitud de la medición de la cantidad de lluvia realizada mediante técnicas de percepción remota, en cierto modo porque no hay disponible una base de comparación satisfactoria (Fattorelli *et al.*, 1996).

Por consiguiente, es necesario incorporar dentro de la etapa de geo-búsqueda todas las preguntas acerca de la correcta representación de los patrones espacio-temporales de la precipitación a partir del empleo de técnicas de percepción remota. Cuestiones como la correcta estimación de lluvia empleando mediciones provenientes de diferentes sensores o la incorporación de mediciones combinadas y el efecto de los errores en la cuantificación de la cantidad de lluvia son preguntas que sólo podrán responderse después de que las técnicas de estimaciones de precipitación basadas en sensores remotos sean ampliamente documentadas.

4.2. Revisión de las técnicas para estimación de precipitación

En cuanto a los satélites empleados para estimar lluvia, es posible diferenciar dos grandes grupos, los satélites geoestacionarios (ejemplos GOES y METEOSAT) y los satélites de órbitas polares bajas (ejemplos SSM/I, AMSU y TRMM). Sin embargo, para su clasificación, quizás sea mejor hacer referencia al tipo de sensor empleado para la estimación de precipitación. Las técnicas empleadas para la estimación de precipitación pueden ser divididas en tres categorías: las de sensores visibles e infrarrojos; las de sensores pasivos de

microondas; y las de radar, es decir, las que utilizan un sensor activo para llevar a cabo la estimación (Barret and Martin, 1981).

4.2.1. Técnicas en el visible e infrarrojo

La característica general de las técnicas en el visible e infrarrojo (VIS/IR) puede ser resumida de la siguiente manera. Un tope de nube frío es equivalente a una nube densa, por lo que se asume una relación entre las nubes altas y su correspondiente cantidad de precipitación. La mayor limitante en la aplicación de las técnicas basadas en el análisis de la reflectancia en el visible e infrarrojo radica en la suposición de una relación indirecta. Por ejemplo, existen nubes *cirrus* muy frías que normalmente no producen precipitación y viceversa, existen nubes de baja o mediana altura menos frías que producen considerables cantidades de precipitación. Sin embargo, la principal ventaja de las técnicas VIS/IR, tiene que ver con las características orbitales de los satélites geoestacionarios, los cuales proveen de una buena resolución temporal y espacial de casi todas las regiones pobladas de la Tierra (Petty, 1995; Reudenbach *et al.*, 2001; Scofield and Kuligowski, 2002; Reudenbach and Bendix, 2002).

Todas las estimaciones de precipitación realizadas con técnicas VIS/IR son necesariamente indirectas debido principalmente a que la radiación que se monitorea no tiene penetración en las nubes, es decir que se estima la precipitación que cae de la base de la nube a partir de analizar la radiación que proviene de la superficie de su tope. El brillo de la superficie del tope de la nube o su equivalente en temperatura, puede ser relacionado con la lluvia que ésta produce, pero las gotas de lluvia jamás son monitoreadas directamente. No obstante existen numerosas técnicas VIS/IR para estimación de lluvia, las cuales pueden ser divididas en cuatro categorías (Kidder and Vonder, 1995).

- **Cloud Indexing.** Es una serie de técnicas basadas en la idea de que es relativamente sencillo identificar distintos tipos de nubes en las imágenes de satélite, y por lo tanto se les puede asignar una intensidad de precipitación a cada tipo de nube teniendo en cuenta la fracción de tiempo o área cubierta por la nube.

La precipitación en una localización o área en particular, puede ser definida como:

$$R = \sum_i r_i f_i$$

Donde r_i es la tasa de precipitación asociada a cada tipo de nube y f_i es la fracción de tiempo o área que el punto de observación es cubierto por el tipo de nube.

El mayor ejemplo de este tipo de técnicas es el *GOES Precipitation Index* (GPI) el cual emplea un valor umbral de 235 K y una tasa de precipitación constante de 3 mm/h para estimar precipitación tropical en áreas de aproximadamente 2.5° x 2.5° de latitud (Arkin, 1979). La ecuación precisa es:

$$GPI = 3f\Delta t$$

En donde *GPI* es una estimación de la precipitación media en el área; *f* es la fracción del área más fría que el umbral y Δt es el tiempo en horas para el cual *f* se aplica.

Algunos otros ejemplos de estas técnicas son empleados básicamente para estimación de precipitación en océanos (Barret, 1970; Follansbee, 1973; Kilonsky and Ramage, 1976).

- **Bispectral.** Estas técnicas combinan la información de los canales visible e infrarrojo, teniendo en cuenta que las nubes frías (canal infrarrojo) y brillantes (canal visible) son las que producen más lluvia.

La primera técnica *bispectral* desarrollada fue empleada para estimar precipitación en el *Indian Summer Monsoon* (Dittberner and Vonder Haar, 1973). Dicha técnica emplea una relación de la forma:

$$P = c_1E + c_2A + p_0$$

En donde P es el porcentaje de precipitación estacional, E es la media estacional de radiación infrarroja, A es la media estacional de albedo visible y el resto de los parámetros son los coeficientes de la regresión.

Existen otras técnicas biespectrales basadas en la construcción de histogramas de dos dimensiones entre el brillo y la temperatura de la nube, en donde posteriormente a cada píxel se le asocia una probabilidad de precipitación (Lovejoy and Austin, 1979) o se agrupa en *clusters* (Tsonis and Isaac, 1985).

- **Life-History.** Estas técnicas se basan en el hecho de que la cantidad de lluvia de una nube, sobre todo de nubes convectivas, es función del estadio de su ciclo de vida en el que se encuentra.

La primera de estas técnicas fue planteada en términos de la relación que existe entre la tasa de cambio del área de la nube y la tasa de lluvia (Stout *et al.*, 1979). La ecuación que define dicha relación es:

$$R = a_0 A + a_1 \frac{dA}{dt}$$

Donde A es el área de la nube, $\frac{dA}{dt}$ es la tasa de cambio del área de la nube y a_0 y a_1 son coeficientes determinados empíricamente.

Este tipo de técnicas han sido empleadas para la estimación de lluvia que se asocia a inundaciones repentinas (Scofield and Oliver, 1977; Scofield, 1987). Sin embargo, todas están basadas en métodos de árboles de decisión que requieren la interpretación interactiva por parte de un meteorólogo, lo que limita su automatización.

- **Cloud Model.** Son técnicas que incorporan la información física del sistema nuboso y de las condiciones ambientales que lo rodean. Se considera que son las técnicas más completas en cuanto a cantidad de información empleada para la estimación de precipitación.

La mayoría de estas técnicas surgen como modificación a alguna técnica anterior o como la síntesis de dos o más técnicas anteriormente revisadas. Entre las técnicas clasificadas como de técnica *Cloud Model* se encuentran la *Convective-Stratiform Technique* (CST) (Adler y Negri, 1988) planteada como resultado de la aplicación de un modelo unidimensional de nube (Adler and Mack, 1984) y la versión mejorada mediante un proceso de recalibración entre los parámetros de la técnica original (Negri *et al.*, 2002a). Otro ejemplo, es la técnica conocida como

GOES Multi-spectral Rainfall Algorithm (GMSRA) (Ba and Gruber, 2001), la cuál como su nombre lo indica, emplea los cinco canales del satélite GOES para producir estimaciones de precipitación. Por último, podemos incluir un ejemplo muy reciente, la *Hydro-Estimator Technique* (Kuligowski *et al.*, 2005) planteada como respuesta a la necesidad de eliminar la dependencia de los datos de radar para calibrar la *Auto-Estimator Technique* (Vicente *et al.*, 1998).

4.2.2. Técnicas con sensores pasivos de microondas

Existe otro tipo de técnicas para la estimación de precipitación que utilizan información colectada con sensores pasivos, tales como los instrumentos de microondas. Estas técnicas han logrado un avance importante en la calidad de las estimaciones de precipitación, ya que estos interactúan en mucha mayor medida con las partículas de agua y/o hielo al interior de las nubes. A diferencia de las técnicas VIS/IR, en las técnicas de *Microwave Passive* (MP) se incluye la información del tamaño de las gotas de lluvia, ya que éstas interactúan con este tipo de radiación al penetrar las nubes. Desafortunadamente, las estimaciones de precipitación se ven fuertemente afectadas por la frecuencia de observaciones. En comparación con los satélites geoestacionarios, los sensores pasivos viajan por lo general en satélites de órbita polar, que tienen una muy pobre resolución temporal. Tal es el caso de los satélites del *Defense Meteorological Satellite Program* (DMSP), los satélites *Special Sensor Microwave Imagen* (SSM/I) y el *Advance Microwave Sounding Unit* (AMSU) (Petty, 1995; Levizzani *et al.*, 2002a).

Sin embargo, en general son dos los aspectos que se pueden mencionar acerca del uso de los microondas pasivos en la obtención de estimaciones de precipitación.

El espectro de las microondas puede ser dividido a *grosso modo* en tres partes.

- Por debajo de los 22 *GHz*, la absorción es el mecanismo primario que afecta la transferencia de la radiación de microondas. La dispersión también ocurre pero es de secundaria importancia.
- Por encima de los 60 *GHz* la dispersión domina sobre la absorción.
- Entre los 22 y los 60 *GHz*, la absorción y la dispersión son igual de importantes.

Los radiómetros de microondas pueden observar a diferentes frecuencias diversas partes de la estructura de la lluvia.

- Debajo de los 22 *GHz*, cualquier hielo sobre la lluvia es casi transparente y los radiómetros de microondas responden directamente sobre la capa de lluvia.
- Sobre 60 *GHz*, la dispersión del hielo es el proceso dominante y los radiómetros de microondas detectan solamente el hielo por lo que no pueden ver la lluvia por debajo de las capas de hielo.

Así pues, las estimaciones de precipitación hechas en frecuencias más altas son necesariamente más indirectas que las realizadas con frecuencias más bajas. Sin embargo, debe de considerarse que al emplear mecanismos de absorción en las mediciones, éstas suelen no ser lo mejor debido a la confusión que hay de absorción de vapor de agua y oxígeno en las estimaciones.

4.2.3. Técnicas con radar

El radar emite energía electromagnética en bandas angostas que se propagan a través del espacio a la velocidad de la luz e interactúan con la materia a lo largo de su trayectoria. La distancia o el tiempo entre picos sucesivos definen la longitud de onda λ , o el período de la onda f . La longitud de onda del radar está normalmente en el rango de 3 a 10 *cm*. (más específicamente 3, 5, 6 ó 10 *cm*). Cuando la onda electromagnética interactúa con las partículas de lluvia, la energía es parcialmente absorbida, disipada y reflejada, gran parte de la energía reflejada regresa al transmisor. El radar es por eso denominado un aparato eco-sonoro en el cual la distancia desde el transmisor al objetivo se mide por el tiempo que tarda un pequeño pulso de la energía electromagnética transmitida en viajar al objetivo y regresar nuevamente después de ser reflejada (Battan, 1973).

El sistema radar está configurado en forma tal que el transmisor produce radiación electromagnética de una potencia conocida a una frecuencia dada. La radiación es emitida a lo largo de un haz radial angosto desde la antena del radar que recibe también la parte del haz de retorno (señal de retorno) disipado por las partículas de lluvia. Un receptor detecta la señal de retorno, la amplifica y convierte la señal recibida en una señal de baja frecuencia que refleja las propiedades de la interacción onda electromagnética - precipitación. De acuerdo con la frecuencia en uso operativo, podemos identificar distintas aplicaciones para distintas bandas de operación de radar:

- **Banda S, (2.7 – 2.9 GHz)**. Esta es la frecuencia más apropiada en regiones donde ocurren precipitaciones fuertes y la atenuación de la señal debido al efecto de la precipitación sea significativa, se trata de la frecuencia menos afectada por el fenómeno de atenuación en

comparación con frecuencias mayores. Debido a los particulares requerimientos para generar impulsos electromagnéticos de longitudes de onda grande, el tamaño del reflector necesario para tal fin es relativamente grande. Este hecho es mecánicamente indeseable y lógicamente mucho más costoso y físicamente más grande.

- **Banda C (5.3 – 5.7 GHz)**. Esta frecuencia ofrece las mejores posibilidades para radares meteorológicos en tierra y es usada en la mayoría de los nuevos radares que se instalan en regiones no tropicales. En esta frecuencia la energía transmitida tiene la capacidad de penetrar precipitaciones de media intensidad, permitiendo además la incorporación de sistemas para la corrección de la atenuación de la señal.

- **Banda X (9.3 - 10.0 GHz)**. La emisión de señales en esta frecuencia está fuertemente afectada por el fenómeno de la atenuación. Los radares que operan en esta longitud son generalmente dedicados a aplicaciones de hidrología urbana, las cuales requieren resoluciones espaciales elevadas con rangos de cobertura muy limitada. También, en este caso se integran procedimientos adecuados para la corrección de la atenuación.

Hasta hace algunos años el sueño de contar con un satélite en órbita para la estimación de la precipitación era difícil de creer, principalmente por el consumo de energía del radar en el espacio, el tiempo de movimiento del radar requerido para las observaciones, la precisión en el retorno de la señal y la resolución espacial y temporal requeridas para la toma de lecturas (Bandeem and Katz, 1975; Zawadski, 1984).

Hoy en día el *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) es el primer satélite dedicado a la medición de lluvia tropical a escala global que porta un radar de lluvia, es decir tiene un sensor activo, además de sensores de microondas, infrarrojos y visibles. Básicamente este satélite experimental combina toda la tecnología existente a la fecha para estimar lluvia desde el espacio desde 1997 que fue puesto en órbita. Debido a su éxito para la obtención de datos de precipitación, las técnicas *Radar* (R) para la estimación de la precipitación con sensores remotos, tienen un futuro prometedor con el TRMM y la misión *Global Precipitation Measurement* (GPM), constelación de satélites para la estimación de la precipitación, nieve y hielo en todo el mundo, a ser lanzados en aproximadamente cuatro años¹.

4.3. Geo-selección de datos geoespaciales

Es evidente que las necesidades de datos para la adecuada identificación de patrones espacio-temporales acerca del fenómeno de la precipitación por convección en el noroeste mexicano, son fuertemente dependientes de la escala temporal y espacial del fenómeno a ser modelado. Los resultados de trabajos que emplean el método Montecarlo para estudiar el efecto de la localización de los pluviógrafos dentro de cuencas, muestran que hay mayor sensibilidad a la resolución temporal de los datos respecto de su resolución espacial (Krajewski *et. al.*, 1991).

Al examinar la sensibilidad de la resolución espacial de las estimaciones de precipitación a la variabilidad temporal y espacial de las tormentas convectivas algunos trabajos reportan que una resolución espacial de 5 km^2 es adecuada; mientras que en el caso de la resolución temporal, es adecuado contar con datos en periodos de corto tiempo del orden de los minutos (Seliga

¹ Citado en (GPM, 2005)

et.al., 1991; Michaud and Sorooshian, 1994). Para estimaciones de precipitación intensa por tormentas convectivas en el noroeste mexicano, durante la temporada de calor, las escalas de interés son en el orden de media a dos horas en tiempo y desde las decenas de kilómetros cuadrados hasta algunas centenas de kilómetros cuadrados en espacio (Negri *et al.*, 1993; Pellegrin, 1994; Stensrud, 1997; Barlow *et al.*, 1998)

Si entendemos a las técnicas disponibles para estimación de precipitación con percepción remota revisadas en la sección anterior, como una función de las escalas espacial y temporal de interés. De ellas las técnicas que emplean datos provenientes de sensores de órbita geostacionaria, son las más indicadas para cubrir las necesidades de búsqueda de patrones espacio-temporales con resolución de interés para este trabajo.

4.4. Selección de la técnica para estimación de precipitación

De todas la técnicas para estimación de precipitación con datos provenientes de sensores de órbita geostacionaria, la técnica conocida como *Convective-Stratiform Technique* (CST) es la más adecuada para búsqueda de patrones espacio-temporales diferenciados, ya que obtiene estimaciones de precipitación convectiva y estratiforme, basadas en la búsqueda de temperaturas mínimas relativas y el cálculo de parámetros con los cuales se eligen los candidatos a ser tormentas. Implementada a finales de la década de los 80's, es la única técnica para la obtención de estimaciones de precipitación que con anterioridad ha sido probada en México y en particular en la región noroeste del país (Negri *et al.*, 1993); además de la existencia de un modelo numérico unidimensional de nube para la zona de estudio, lo que permite contar con áreas de cobertura e intensidades de precipitación más adecuadas (Oropeza, 2001).

La técnica CST que en este trabajo propongo para identificación de patrones acerca de los eventos de precipitación intensa en el Noroeste de México, pertenece a la categoría *Cloud Model* dentro de las técnicas VIS/IR. Su característica principal es que la intensidad de lluvia, duración y distribución espacial de las tormentas se asignan como una función de la temperatura de la superficie del tope de la nube, a partir de los resultados de un modelo numérico unidimensional de nube, ya que la radiación que se monitorea no tiene penetración en las nubes, es decir que se estima la precipitación que cae de la base de la nube a partir de analizar la radiación que proviene de su tope. Todos los esquemas en esta categoría son necesariamente indirectos; el brillo del tope de la nube o su equivalente en temperatura, puede ser relacionado con la lluvia que ésta produce, pero las gotas de lluvia jamás son monitoreadas directamente. Por lo anterior, es preciso considerar que además de la adquisición de datos provenientes de sensores de órbita geoestacionaria para implementar dicha técnica, es necesario contar con datos extra que permitan la correcta validación, tanto de la intensidad y duración como de la distribución espacial de las estimaciones de precipitación, generadas en este trabajo.

4.5. Características de los datos para la búsqueda de información útil

En este trabajo la búsqueda de patrones significativos acerca de los eventos de precipitación intensa en el Noroeste de México, se realiza mediante la implementación de la *Convective-Stratiform Technique* (CST). La selección de la CST permite definir un perfil con las características de los datos necesarios tanto para la implementación de la técnica, como para su correcta validación. Permittiéndonos además definir los alcances de los propios datos en las siguientes etapas del proceso de búsqueda de información útil.

La principal característica de los datos empleados para la implementación de la CST, es la de permitir la correcta obtención de patrones espacio-temporales de precipitación, además de la obtención de estimaciones de intensidad de precipitación con cierto grado de precisión. Para cumplir con lo anterior, es necesario pensar en datos con una gran resolución espacial y temporal, característica principal de los datos de sensores pasivos. Tal es el caso de las imágenes de los satélites GOES, ya que con una resolución espacial de entre uno y ocho kilómetros, y una resolución temporal de hasta 5 minutos para algunas zonas geográficas, el acervo de imágenes disponibles para las distintas series de los satélites GOES permite la implementación de la CST con más o menos los mismos estándares de calidad en la información, ya que dichos satélites no han sufrido mayores modificaciones en sus instrumentos de medición a lo largo de las diferentes series que conforman la misión.

Por el otro lado, las características de los datos empleados para la correcta validación de las estimaciones de la cantidad de precipitación (intensidad, duración y distribución espacial), son las de permitir la definición de rangos de precisión tanto para la intensidad y duración de las estimaciones de precipitación generadas mediante la implementación de la CST, así como de evaluar los patrones espacio-temporales de los eventos de precipitación durante la temporada de calor en el noroeste mexicano. La evaluación de las estimaciones de precipitación en cuanto a su intensidad y duración es llevada a cabo mediante la red de pluviógrafos digitales del NAME, colocada a lo largo de la ladera oeste de la Sierra Madre Occidental. Mientras que la evaluación de la distribución espacial de la precipitación es llevada a cabo mediante la comparación de los patrones espacio-temporales de la precipitación obtenidos por la implementación de la CST y los datos del *Rainfall Measuring Mission* (TRMM), satélite de prueba para la medición de la cantidad de lluvia desde el espacio.

4.5.1. Los datos del satélite GOES

El 17 de mayo de 1974 el *Synchronous Meteorological Satellite* (SMS-1) fue puesto en órbita como el primer prototipo de *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES). Poco tiempo después, la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) inició la operación de la serie GOES con el lanzamiento del GOES-1.

Es importante mencionar que mientras los satélites GOES se encuentran en desarrollo e incluso durante el lanzamiento son nombrados con letras (GOES-A, GOES-B, etc.) y una vez que el satélite ha sido puesto en órbita exitosamente la letra es substituida por un número. De esta forma el satélite diseñado y lanzado como GOES-A se convirtió en GOES-1, GOES-B en GOES-2 y así sucesivamente. En mayo de 1986 el vehículo espacial Delta 3914 tuvo una falla y el GOES-G se perdió. Hoy en día es posible diferenciar la misión GOES en cinco series: GOES A-B, GOES C-H, GOES I-K, GOES L-M y la actual serie llamada GOES N-P, la cual se espera contribuya de manera vital al conocimiento del clima en la Tierra (Tabla 4.1).

En los inicios de la misión el sensor principal en los satélites GOES era el radiómetro de barrido visible e infrarrojo *Visible and Infrared Spin Scan Radiometer* (VISSR). Con el tiempo más bandas espectrales fueron agregadas a este sensor, permitiendo al sistema GOES adquirir mediciones multiespectrales, a partir de las cuales se pueden derivar la temperatura atmosférica y sondeos verticales de la humedad. El VISSR *Atmospheric Sounder* (VAS) se introdujo en GOES-4 en 1981, pero las imágenes y sondeos no podían ser tomados al mismo tiempo, así que mientras los datos de las imágenes se usaban en forma operativa, los datos de sondeo se usaban sólo en experimentos especiales. La NOAA, reconociendo la necesidad de mejorar esta situación inició en 1995 el desarrollo de la siguiente generación de

satélites geoestacionarios. Los GOES I-M tienen instrumentos separados para imágenes y sondeos con el fin de evitar conflictos entre sus operaciones, permitiendo con esto a la NOAA iniciar los sondeos geoestacionarios en forma operativa por primera vez.

Misión GOES			
Serie	Satélite	Fecha de lanzamiento	Lanzador
1968 - 1977	GOES-1	16/10/1975	Delta 2914
	GOES-2	16/06/1977	Delta 2914
1978 - 1987	GOES-3	16/06/1978	Delta 2914
	GOES-4	09/09/1980	Delta 3914
	GOES-5	22/05/1981	Delta 3914
	GOES-6	28/04/1983	Delta 3914
	GOES-G	03/05/1986	Delta 3914
	GOES-7	26/02/1987	Delta 3914
1988 - 1997	GOES-8	13/04/1994	Atlas-1
	GOES-9	23/05/1995	Atlas-1
	GOES-10	25/04/1997	Atlas-1
1998 - 2002	GOES-11	03/05/2000	Atlas-2A
	GOES-12	23/07/2001	Atlas-2A
2003 - 2007	GOES-N	28/07/2005*	Delta IV
	GOES-O	Noviembre de 2006**	Delta IV
	GOES-P	Abril de 2007**	Delta IV

Fecha pospuesta / ** Fechas planeadas originalmente para su lanzamiento

Elaboración propia con datos de la página de Internet de GOES
Tabla 4.1. Cronología de la misión espacial GOES

A partir del GOES-I, el instrumento de imágenes es un radiómetro de cinco canales, diseñado para muestrear radiación y energía solar reflejada por los materiales que se encuentran en las áreas de muestreo con una alta resolución espacial. Los satélites GOES observan a la Tierra en rangos del espectro visible y del espectro infrarrojo (Tabla 4.2).

Los satélites GOES son lanzados desde la Tierra para permanecer generalmente sobre un mismo punto sobre de ésta. El punto más cercano a la Tierra de la órbita que describen (perifoco) se encuentra aproximadamente a 35,770 *km*. sobre la superficie terrestre. El programa GOES mantiene dos satélites operando en conjunto para proveer la observación de la Tierra en una cobertura del 60%, tradicionalmente uno situado sobre el Atlántico (frecuentemente referido como GOES-Este) y el otro sobre el Pacífico (referido como GOES-Oeste).

Canal	Longitud de onda (μm)	Región del espectro	Unidad de medición	Resolución espacial (<i>km</i>)	Objetivos meteorológicos
1	0.55 – 0.75	Visible	Albedo (%)	1	Cobertura de nubes y caracterización de la superficie durante el día
2	3.8 – 4.0	Infrarrojo cercano	Temperatura (k)	4	Fase de nubes (día y noche)
3	6.5 – 7.0	Infrarrojo medio	Temperatura (k)	8 *	Niveles superiores de vapor de agua
3	5.7 – 7.3	Infrarrojo medio	Temperatura (k)	4 **	Niveles superiores de vapor de agua
4	10.2 – 11.2	Infrarrojo térmico	Temperatura (k)	4	Temperatura de la superficie del tope de la nube
5 ***	11.5 12.5	Infrarrojo térmico	Temperatura (k)	4	Temperaturas de la superficie del mar
6 ****	12.9 13.7	Infrarrojo térmico	Temperatura (k)	8	Detección de nubes

De GOES-8 a GOES-11/** GOES-12/** Válido de GOES-8 a GOES 11/**** Válido para GOES-12

Elaboración propia con datos de la página de Internet de GOES

Tabla 4.2. Características de los instrumentos de imágenes de GOES

El satélite GOES-10 el cual ahora opera a 135° de longitud oeste y que es conocido como GOES-Oeste, presenta cuatro sectores rutinarios de toma de lectura para la obtención de imágenes: *Pacific United States* con una duración en la toma de lectura de 6 minutos 35 segundos; *West Northern Hemisphere* con una duración en la toma de lectura de 10 minutos 15 segundos; *West Southern Hemisphere* con una duración en la toma de lectura de 7 minutos; *Full Disk* con una duración en la toma de 26 minutos 6 segundos (Figura 4.1).

Para GOES-Oeste el sector *Pacific United States* obtiene imágenes cada 30 minutos a las *hh:45* y *hh:15*; el sector *West Northern Hemisphere* obtiene imágenes cada 30 minutos a las *hh:30* y *hh:00*; el sector *West Southern Hemisphere* obtiene imágenes cada 30 minutos a las *hh:52* y *hh:22*; mientras que el sector *Full Disk* obtiene imágenes cada 3 horas iniciando a las 00:00 *Universal Time Clock UTC*.

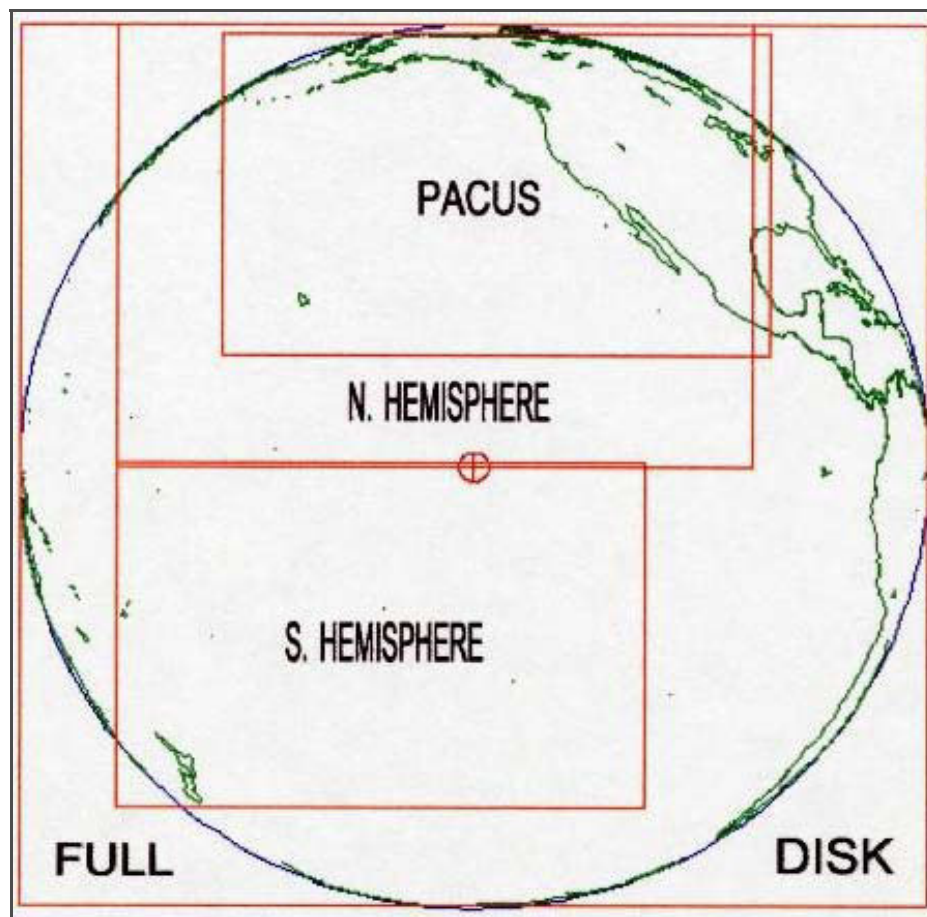


Figura 4.1. Estrategia rutinaria para la exploración de imágenes del GOES-Oeste

Por su parte el satélite GOES-12, que opera a 75° de longitud oeste, es conocido como GOES-Este. Dicho satélite posee cuatro sectores rutinarios de toma de lectura para la obtención de imágenes: *Continental United States* con

una duración en la toma de lectura de 4 minutos 48 segundos; *Northern Hemisphere Extended* con una duración en la toma de la lectura de 14 minutos 13 segundos; *Southern Hemisphere South* con una duración en la toma de la lectura de 4 minutos 48 segundos; *Full Disk* con una duración en la toma de la lectura de 26 minutos 05 segundos (Figura 4.2).

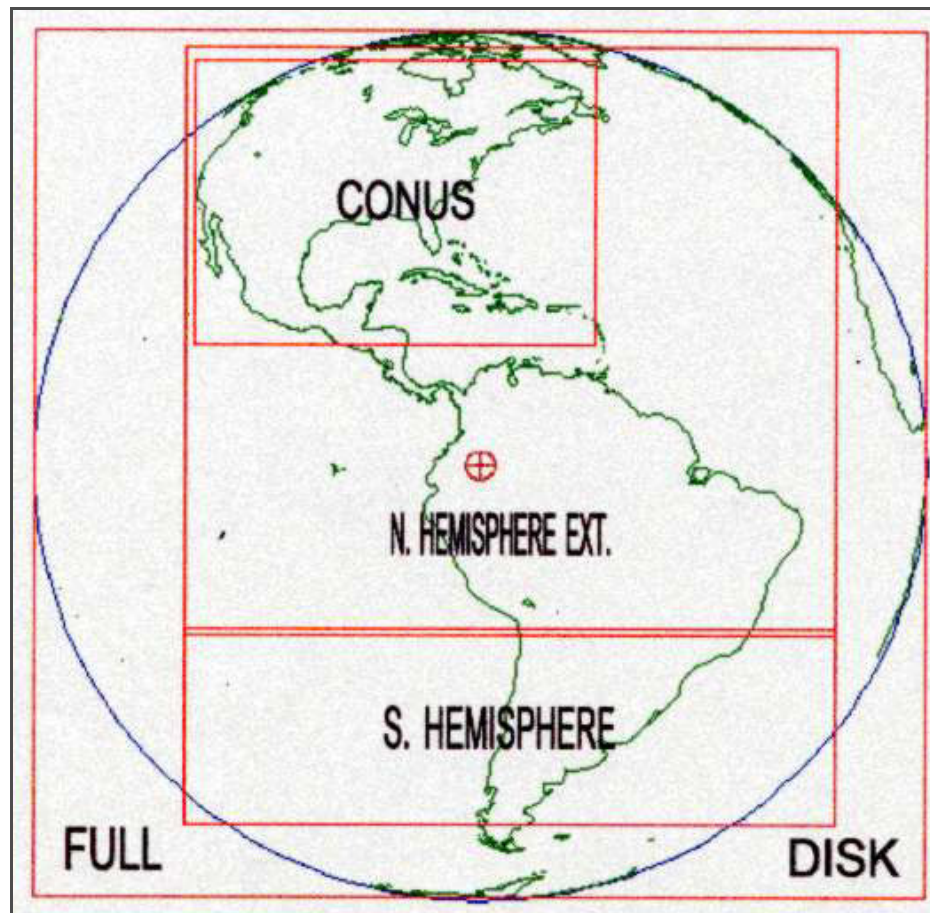


Figura 4.2. Estrategia rutinaria para la exploración de imágenes del GOES-Este

Para GOES-Este el sector *Continental US* obtiene imágenes cada 30 minutos a las *hh:00* y *hh:30*; por su parte el sector *Northern Hemisphere Extended* obtiene imágenes cada 30 minutos a las *hh:15* y *hh:45*; el sector *Southern Hemisphere South* obtiene imágenes también cada 30 minutos a las *hh:09* y *hh:39*; Por último el sector *Full Disk* obtiene imágenes cada 3 horas iniciando a las 02:45 UTC.

Las imágenes GOES empleadas para este trabajo corresponden a imágenes horarias *Northern Hemisphere Extended* del satélite GOES-12 cada *hh:45*, obtenidas del Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota del Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México. Dicho laboratorio obtiene desde el 27 de noviembre del año 2000 imágenes GOES para la República mexicana, sin embargo es a partir del 3 de abril de 2003, que se obtienen imágenes de manera regular en formato *hdf*, formadas de 4 ó 5 bandas, dependiendo de la hora del día y de su metadato.

4.5.2. Selección de productos del satélite TRMM

El satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), lanzado por el cohete H-II desde el centro espacial de Tenagashima en Japón, el 28 de noviembre de 1997, es la primera misión espacial dedicada a la medición de la precipitación. Desarrollado como un proyecto común entre Japón y los Estados Unidos de Norteamérica, el TRMM ha jugado un papel importante en el entendimiento y la supervisión de las variaciones ambientales de los últimos años.

El satélite TRMM tiene una órbita de alrededor de 350 *km*, una inclinación de unos 35° y un periodo orbital de 91.5 minutos; permitiéndole así volar sobre cada punto de la superficie de la Tierra a diferentes horas del tiempo local cada día. El TRMM posee cinco instrumentos de medición científica: el *Precipitation Radar* (PR), el *TRMM Microwave Image* (TMI), el *Visible and Infrared Scanner* (VIRS), el *Clouds and the earth's Radiant, Energy System* (CERES) y el *Lighting Imaging Sensor* (LIS).

Los tres instrumentos del TRMM para la medición de la lluvia (PR, TMI y VIRS), son empleados para obtener estimaciones de precipitación tropical y

subtropical, perfiles de lluvia y temperaturas del brillo. El TRMM tiene el único instrumento de microondas pasivo en una órbita inclinada y el primer radar activo en el espacio. Estos tres instrumentos proporcionan el mayor conjunto de datos de lluvia generados hasta ahora, para la generación de modelos de clima y estudios detallados de precipitaciones severas. Los otros dos instrumentos a bordo del TRMM (CERES y LIS) son parte del *Earth Observation System Program* y están dedicados, el primero a la medición de radiación en la Tierra y el segundo al estudio de la distribución global de relámpagos.

El *Precipitation Radar* (PR) es el principal instrumento de medición a bordo del TRMM. Los objetivos principales del PR son:

- Proporcionar la estructura 3-D de la precipitación

- Obtener medidas cuantitativas de las tasa de precipitación sobre la Tierra y los océanos

Para la estimación de tasas pequeñas de precipitación se aplican algoritmos convencionales usados en los radares en tierra, mientras que para tasas mayores de precipitación, es necesario hacer una corrección de la atenuación de la lluvia, mediante el uso de la trayectoria total de los ecos superficiales de la Tierra o el mar.

El TMI es un radiómetro de microondas pasivo dual polarizado de nueve canales con frecuencias en funcionamiento de 10.65 *GHz* , 19.35 *GHz* , 21.3 *GHz* , 37 *GHz* y 85 *GHz* . Este instrumento proporciona datos relacionados con una tasa de precipitación sobre los océanos principalmente, ya que sobre tierra los datos obtenidos son menos confiables, debido a que las emisiones superficiales no homogéneas hacen difícil la interpretación.

El VIRS es un radiómetro de exploración que mide la radiación de la escena en cinco bandas espectrales, que operan en la región del visible y el infrarrojo. Este instrumento proporciona el contexto de la nube dentro de la cual se hacen las observaciones del microondas pasivo y del radar, ya que sus datos son empleados en los algoritmos de la cantidad de lluvia basados sobretodo en los instrumentos pasivos y activos de microondas.

La combinación de datos de los instrumentos PR, TMI y VIRS son utilizados para derivar perfiles de precipitación más adecuados. En particular, la combinación de características de los datos de microondas con datos visibles e infrarrojos del instrumento VIRS, proporciona los medios por los que la precipitación es estimada con mayor exactitud, que por datos visibles e infrarrojos solamente.

Características	VIS	TMI	PR
Frecuencia / Longitud de onda	0.63, 1.6, 3.75, 10.8, 12 μm	10.65, 19.35, 37.0, 85.5 GHz polarización dual y 22.35 GHz polarización vertical	13.8 GHz polarización horizontal
Modo de escaneo	A través del carril	Cónico	A través del carril
Resolución espacial	2.1 km	Rangos de 5 km en 85.5 GHz a 45 km en 10.65 GHz	4.3 km en el nadir
Ancho de barrido	720 km	760 km	220 km

Elaboración propia con datos de la página de Internet de TRMM

Tabla 4.3. Características de los instrumentos del satélite TRMM

Las características de los instrumentos VIRS, TMI y PR son mostrados en la Tabla 4.3. Los datos de todos los instrumentos del satélite TRMM son transmitidos a la Tierra vía el *Tracking and Data Relay Satellite System* (TDRSS) para ser procesados por el *TRMM Science Data and Information System* (TSDIS) en productos estándares. Estos productos se transfieren al

Goddard Earth Science (GES) del *Distributed Active Archive Center* (DAAC) para su archivo y distribución. La Tabla 4.4 resume los productos estándares disponibles en el Goddard DAAC. Los productos del nivel 1 son las radiaciones calibradas del VIRS, las temperaturas del brillo del TMI y las mediciones de retorno de energía y reflectividad del PR. Los productos del nivel 2 son parámetros geofísicos derivados en la misma resolución y localización que los de los datos del nivel 1. Los productos del nivel 3 son parámetros promedio mapeados dentro de una malla espacio-tiempo uniforme.

Nivel	VIS	TMI	PR	Productos combinados
Nivel 1	Radiancias visibles e infrarrojas	Temperaturas del brillo	Retorno de energía del radar y reflectividad	N/A
Nivel 2	N/A	Perfiles de precipitación, agua hielo y superficies de lluvia	Superficies transversales, trayectorias de atenuación, tipos de precipitación, perfiles de las tasas de precipitación	Tasas de lluvia, tamaños de gotas, parámetros y trayectorias integradas de atenuación
Nivel 3	N/A	Precipitación mensual, tasa y frecuencia de lluvia	Superficie total de precipitación, perfiles de lluvia 2, 4, 6,10 y 15 <i>km</i> , capas de nieve y hielo, superficies con tasas de lluvia	Superficies con precipitación acumulada, precipitación mensual calibrada por pluviógrafos

Elaboración propia con datos de la página de Internet de TRMM

Tabla 4.4. Productos del satélite TRMM

Todos los productos estándares del TRMM están disponibles para su distribución en formato *hdf* y pueden ser obtenidos vía *ftp* en la página principal de Internet de TRMM. El acceso a los datos se realiza mediante el Goddard DAAC e incluye además de datos orbitales y en malla, productos de validación, datos de pluviógrafos y de satélites geoestacionarios compatibles con los productos estándares disponibles.

4.5.3. Los datos de la red de pluviógrafos digitales

El tipo de pluviógrafos empleados para la implementación de la red de pluviógrafos digitales del proyecto NAME, es de diseño cubo-balancín de la marca *Texas Electronics* modelo *TR-525USW*, el cual está calibrado a 0.254 *mm* por intervalo. Con la calibración de fábrica los pluviógrafos presentan una exactitud en la medición de 1% para tasas de precipitación de 25.4 *mm/h*; dicha calibración se puede realizar cada vez que se lleva a cabo la descarga y el mantenimiento de cada pluviógrafo. Con cada medición el pluviógrafo envía una señal electrónica, la cual es almacenada en un *Data Logger* HOBO de la empresa de computo *Onset*. La capacidad de almacenaje del *Data Logger* HOBO es de 8,000 eventos con un almacenaje efectivo de hasta 2,032 *mm* de precipitación, cantidad por demás alta comparada con la precipitación anual media de la región. La Figura 4.3, muestra los instrumentos de medición de la red de pluviógrafos digitales del NAME.

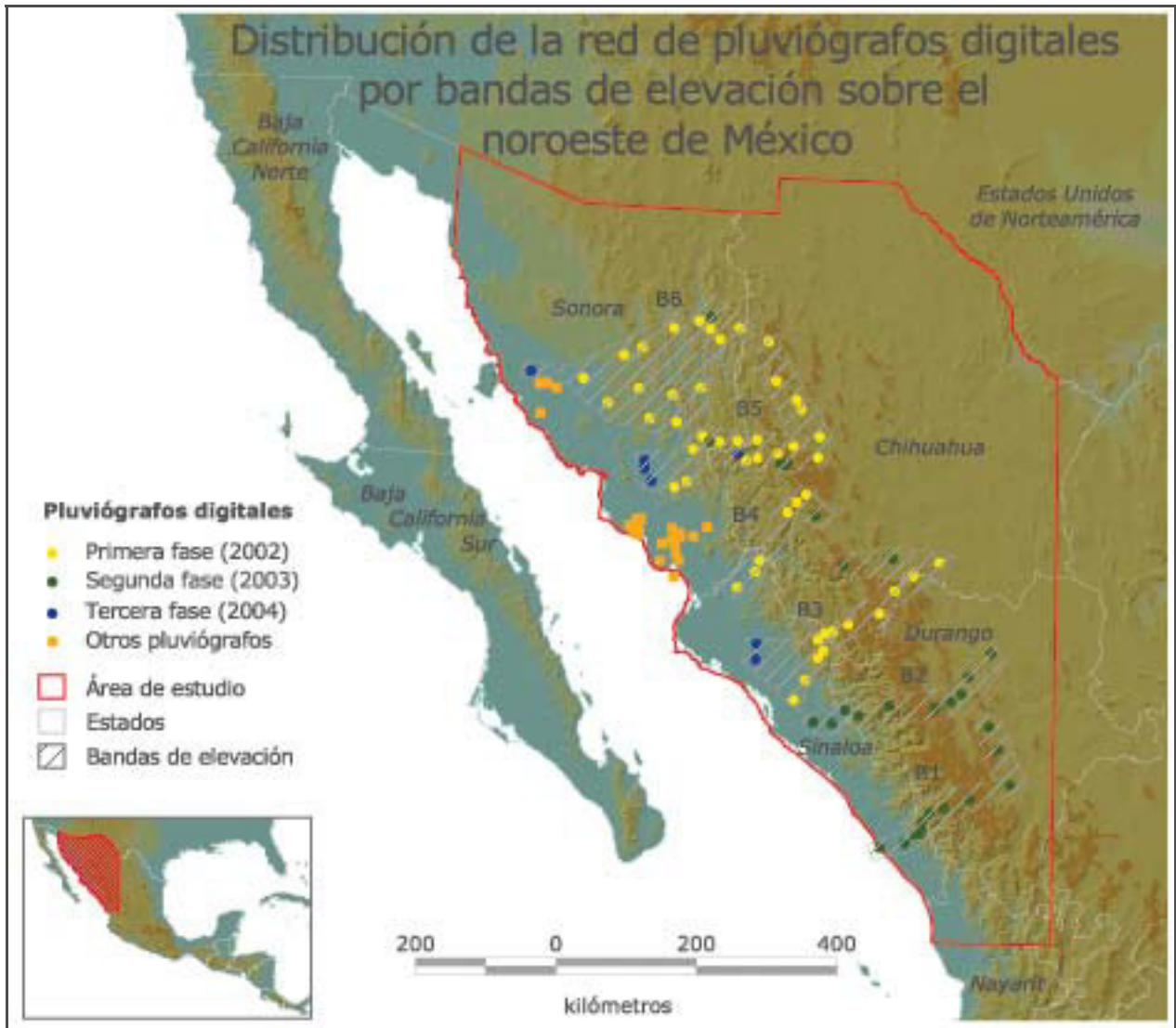


Figura 4.3. Instrumentos de medición del NAME

La configuración espacial de la red de pluviógrafos digitales del NAME, se realizó considerando los siguientes objetivos:

- Instalar, mantener y recoger los datos de lluvia en lugares accesibles por vía terrestre, tratando de cubrir zonas en donde se ejemplifiquen la intensidad y la influencia de la topografía sobre la precipitación en la Sierra Madre Occidental.

- Realizar estudios hidrológicos relevantes con los datos de lluvia, incluyendo análisis de intensidad, duración y frecuencia de la precipitación, además de su relación con el gradiente de topográfico.



Elaboración propia con datos del NAME y de SRTM a partir de (Gochis *et al.*, 2004)

Figura 4.4. Red de pluviómetros digitales del NAME por bandas de elevación

La localización de cada uno de los pluviómetros digitales, fue obtenida mediante el empleo de un GPS de mano de la marca *GARMIN* modelo *eTrex*. La precisión horizontal en la medición es de 15 *m* o menos dependiendo de las

distorsiones en la recepción de la señal, mientras que la precisión vertical es estimada en 15 *m*. El resultado de lo anterior, es una red de pluviómetros digitales que trata de cubrir el gradiente topográfico, mediante la distinción de seis bandas de estaciones, a lo largo de la ladera oeste de la SMO. Estas bandas de elevación están contenidas dentro de una pequeña región de la ladera oeste de la SMO en el noroeste mexicano, las montañas de la SMO representan en gran parte la transición escarpada del llano costero del Golfo de California a la periferia occidental de la meseta mexicana.

Por razones prácticas la distancia promedio entre las estaciones de la red de pluviómetros digitales del NAME es de algunas decenas de kilómetros a lo largo de las bandas de elevación mientras que es de centenas de kilómetros entre bandas contiguas (Figura 4.4).

Los datos de precipitación obtenidos por los instrumentos de medición de la red de pluviómetros digitales del proyecto NAME, son recolectados y almacenados en la página de Internet de la *Joint Office for Science Support* (JOSS), la cual proporciona servicios de ayuda administrativa, técnica y de investigación a la comunidad científica, con el fin de planeación y organización de programas y proyectos de investigación científica.

Cabe mencionar que en la página del NAME de la JOSS, se encuentran disponibles todos los datos de precipitación tomados por la red de pluviómetros digitales durante la duración de la etapa de toma de lecturas del NAME, comprendida de mediados de 2002 a principios de 2005. Los datos están disponibles en periodos de tiempo de 5, 15 y 30 minutos; 1, 3, 12 y 24 horas. La transmisión de datos se realiza vía correo electrónico mediante archivos comprimidos en formato de texto.

Capítulo 5

GEO-ENSAMBLE DE DATOS Y CONSTRUCCIÓN DE HIPÓTESIS

5.1. Geo-ensamble de los datos de precipitación

El geo-ensamble de los datos para la búsqueda de información útil acerca de los eventos de precipitación intensa en el noroeste de México contempla la integración de datos para la adecuada identificación de los patrones espacio-temporales de la precipitación, y la definición de recursos de información adicionales para la validación de las estimaciones de la cantidad de lluvia a través de la aplicación del proceso de percepción remota. De acuerdo con los criterios de geo-selección durante el proceso de abducción se determinaron que los mejores datos de entrada para tales fines son la red de pluviógrafos digitales del NAME, las imágenes diarias del satélite GOES y los productos orbitales del satélite TRMM.

Las estimaciones de la cantidad de lluvia a partir del proceso de percepción remota dependen en gran medida de las características de los recursos de información, sobre todo en lo referente a las escalas (resolución espacial y

frecuencia de observación) de las imágenes. Las imágenes GOES ofrecen la posibilidad de realizar estimaciones de precipitación a intervalos muy cortos durante todo el día. Junto con la disponibilidad de un modelo numérico unidimensional de nubes para la zona de estudio con aplicación directa a la *Convective-Stratiform Technique* (CST), esta frecuencia de observaciones permite tener potencialmente estimaciones a la escala en que operan los fenómenos de precipitación intensa. Los productos orbitales del satélite TRMM permiten la comparación de ambos, intensidad de precipitación y análisis de patrones espacio-temporales de las tormentas. A continuación se hace referencia a los métodos aplicados para el geo-ensamble de esta información.

5.1.1. Datos pluviográficos

Para la selección de datos de la red de pluviógrafos digitales, se eligió el periodo de observación que comprende del 27 de junio de 2003 al 1 de julio del mismo año. De acuerdo con el proceso de abducción para los años de toma de lecturas del NAME, estas son las fechas más representativas que corresponden a eventos de precipitación intensa característicos de la zona de estudio. A partir de un análisis exploratorio de las fechas anteriores, se seleccionó el día 28 de junio de 2003 como fecha de estudio para el presente trabajo. Dicha fecha corresponde al día con mayor representatividad espacial de lluvia registrada por los pluviógrafos dentro del periodo de tiempo definido anteriormente. Es decir se trata del día con mayor número de estaciones con algún registro de precipitación.

Es importante mencionar que para la temporada de calor del año 2003, aunque la red de pluviómetros digitales del NAME contaba ya con 87 estaciones totalmente instaladas, sólo 76 estaciones contaron con lecturas completas para la fecha de estudio. La base de datos de precipitación de la red de pluviógrafos digitales del NAME para el día 28 de junio de 2003, incluye 24 datos de intensidad de precipitación horaria en *mm / h* cada *hh:45* para cada

una de las 76 estaciones con lectura, el nombre y la ubicación geográfica de cada una de ellas.

5.1.2. Datos satelitales

El manejo dentro de la etapa de geo-ensamble de los datos satelitales, está dividido en dos partes. La primera parte se refiere al pre-procesamiento de los datos satelitales para su debida integración. Esta etapa incluye principalmente transformaciones espaciales tales como cambios de proyección y remuestreo entre otros. La segunda etapa dentro del geo-ensamble de los datos satelitales es la de transformación de los valores de las imágenes a variables biofísicas necesarias para el análisis de fenómenos de interés. Cabe mencionar, que aunque la parte de pre-procesamiento puede ser muy larga y tediosa, suele ser fácilmente sistematizada, de tal manera que sólo consume tiempo de procesamiento. No así la parte de transformación a variables biofísicas, en donde los procesos suelen estar marcados por la aplicación de modelos paramétricos difíciles de implementar.

En el caso específico de las imágenes GOES, empleadas en este trabajo para la obtención de estimaciones de precipitación, fueron obtenidas de tal forma que sólo fue necesario implementar dentro de la etapa de geo-ensamble la parte de pre-procesamiento. La conversión de los valores de números digitales de las imágenes a los valores de temperatura en grados *Kelvin* para los canales 2, 3, 4 y 6; y la conversión del canal 1 a albedo, se realiza dentro del sistema donde fueron tomadas las imágenes. En la Figura 5.1 se muestra el modelo cartográfico implementado para el pre-procesamiento de las imágenes del satélite GOES-12.

El modelo cartográfico realiza las transformaciones necesarias a los datos para la importación de las imágenes en formato *hdf* al formato *raster* de

ARCInfo, el cambio de coordenadas geográficas a la proyección Cónica Conforme de Lambert para la República Mexicana y el remuestreo bilinear de las imágenes a la resolución espacial de 1.0 *km* para el canal 1, 4.0 *km* para los canales 2, 3 y 4, y para el canal 6, 8.0 *km*. Lo anterior se realiza 24 veces, para cada una de las horas locales de la fecha de estudio.

En el caso del geo-ensamble, de los productos del satélite TRMM necesarios para llevar a cabo la evaluación de los patrones espacio-temporales de las estimaciones de precipitación con percepción remota, tampoco fue necesario implementar la parte de transformación a variables biofísicas, ya que los datos de los productos orbitales de SRTM están debidamente transformados. En particular se emplea el producto orbital TRMM *Precipitation Radar (PR) Profile* conocido también como TRMM_2A25, del cual se empelaron las órbitas 32025 y 32028. Dicho producto contiene una banda con celdas de posible precipitación y certeza de precipitación de acuerdo a precipitaciones clasificadas previamente como convectivas y estratiformes; obteniendo así una superficie con valores de precipitación convectiva probable, precipitación estratiforme probable, precipitación convectiva segura y precipitación estratiforme segura.

El modelo realiza la importación de la órbita en formato *hdf* al formato *raster* de ARCInfo, y la selección de las celdas con posible precipitación y certeza de precipitación de las bandas de acuerdo a precipitaciones clasificadas como convectivas y estratiformes; obteniendo así una superficie con valores de precipitación convectiva probable, precipitación estratiforme probable, precipitación convectiva segura y precipitación estratiforme segura. La Figura 5.2, muestra el modelo cartográfico implementado para el pre-procesamiento del producto orbital TRMM_2A25 del satélite TRMM. Dicho modelo realiza las transformaciones necesarias a los datos para la importación de las órbitas del

producto en formato *hdf* al formato *raster* de ARCInfo y el cambio de coordenadas geográficas a la proyección Cónica Conforme de Lambert para la República Mexicana.

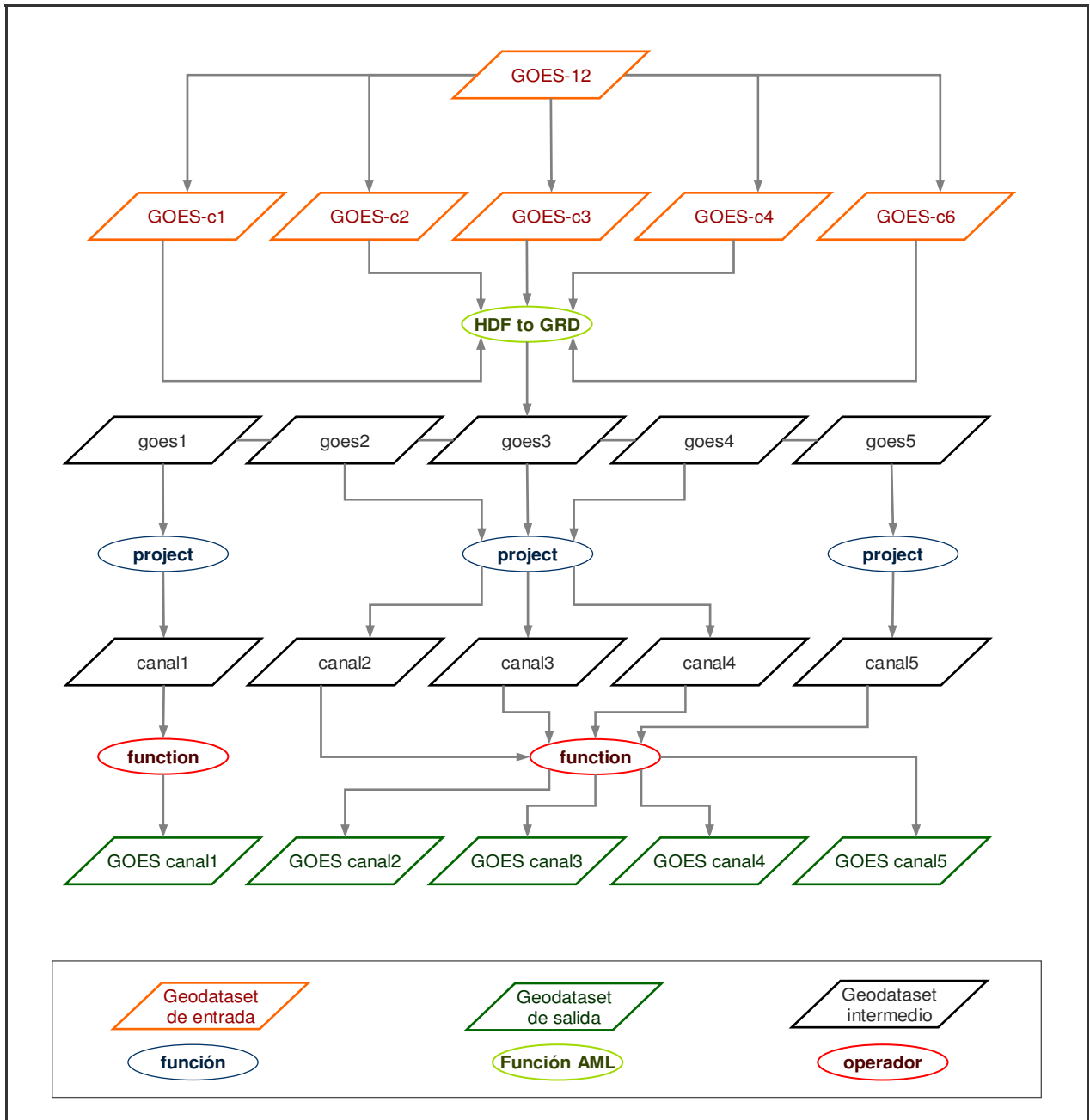


Figura 5.1. Modelo cartográfico para el geo-ensamble de datos del satélite GOES

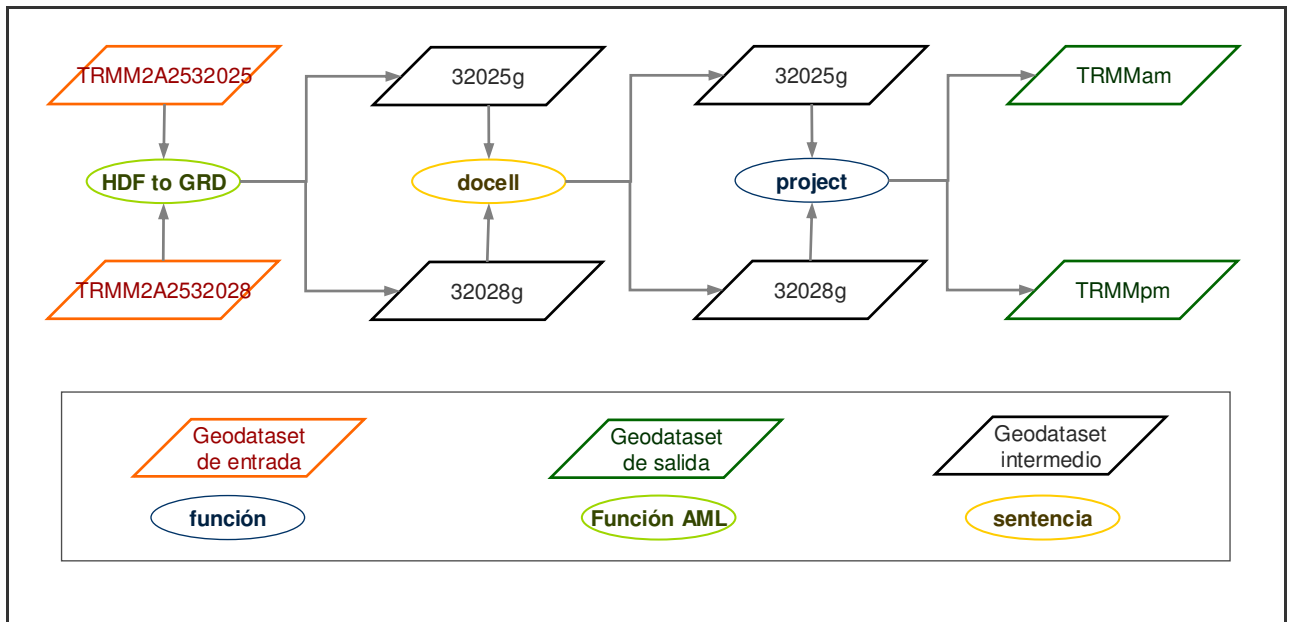


Figura 5.2. Modelo cartográfico para el geo-ensamble del satélite TRMM

5.2. Construcción de hipótesis

De acuerdo con el proceso de abducción y el geo-ensamble de los datos, es posible plantear mediante una hipótesis de trabajo, la idea de que las estimaciones de precipitación con percepción remota pueden generar mejores estimaciones de la cantidad de lluvia que las obtenidas mediante las estaciones de la red de pluviógrafos digitales. Lo que eventualmente se traduciría en una mejor identificación de patrones significativos acerca de la precipitación en el noroeste mexicano durante la temporada de calor.

En la siguiente sección se realiza un ejercicio de análisis exploratorio de los datos de los pluviógrafos digitales del NAME con el propósito de formalizar la hipótesis de trabajo. La hipótesis de trabajo, esta basada en la cuantificación de la capacidad de la red de pluviógrafos digitales para capturar la variabilidad espacio-temporal de las precipitaciones por convección en el noroeste mexicano.

5.2.1. Análisis exploratorio de los datos de precipitación

Con la intención de presentar una estimación sobre la probabilidad que tienen las redes de pluviógrafos de detectar precipitaciones intensas ocasionadas por la presencia de tormentas, es posible plantear una red hipotética distribuida en una malla regular con una distancia constante en ambas direcciones entre nodos D_x , D_y . Considerando además que las tormentas presentan un radio r constante y una distribución aleatoria en toda el área cubierta por la red de pluviógrafos, es posible calcular la probabilidad que existe de que dicha red registre la presencia de tormentas

$$P_{lluvia} = \left(\frac{\pi r^2}{D_x * D_y} \right)^n$$

Donde n es el número de tormentas en cada evento y P_{lluvia} es la probabilidad de que la red de pluviógrafos detecte a todas las tormentas.

De este caso hipotético es posible entender la complejidad del problema ya que en la realidad la distancia entre las estaciones de medición suele ser muy irregular, ya que generalmente distan mucho de ser mallas uniformes; además de que la estructura de las tormentas no es uniforme debido a que éstas pueden presentar altas variaciones. Éste es uno de los principales problemas asociados a la red de pluviógrafos digitales del NAME para capturar y en su caso, reproducir la variabilidad espacial y temporal de los eventos de precipitación ocurridos durante la temporada de calor en el noroeste mexicano.

A partir de las coordenadas de cada uno de las 87 pluviógrafos digitales instalados durante el proyecto NAME, se calculó la distancia a la que se encontraba el pluviógrafo más cercano para cada caso, con este dato se

calculó la distancia mínima promedio que es 25.3 km , siendo sus componentes D_x 8.071 km y D_y 24.003 km . Por otra parte en el capítulo uno se menciona que el radio promedio de las tormentas en la zona de estudio es de alrededor de 10 km de radio r . Aplicando todos estos valores a la fórmula anterior para un valor de n igual a uno, es posible calcular la probabilidad de que la red de pluviógrafos digitales detecte una tormenta, siendo P_{lluvia} 40.5% el valor calculado. Lo que quiere decir que para la temporada de calor del 2003, 59.5% de las veces que ocurrió una situación similar la segunda etapa de la red de pluviógrafos digitales del NAME no detectó una tormenta.

Con el empleo de imágenes GOES, se garantiza bajo ciertos criterios capturar la variabilidad espacio-temporal de los eventos de precipitación intensa generados por tormentas en el noroeste mexicano, ya que cada celda del canal infrarrojo térmico de GOES, con resolución de 4 km , contiene promedios espaciales de la temperatura del tope de la nube con los cuales es posible identificar tormentas convectivas y estimar precipitación.

5.2.2. Hipótesis de trabajo

De acuerdo con el ejercicio anterior podemos plantear la siguiente hipótesis de trabajo:

- Si D_x y $D_y \leq r$, entonces la probabilidad para capturar la variabilidad espacio-temporal de la precipitación por convección es alta.

La hipótesis anterior permite que mediante la identificación de patrones significativos se establezca una serie de parámetros que permitan evaluar la capacidad de la red de pluviógrafos del NAME para capturar y en su caso, reproducir la variabilidad espacial y temporal de los eventos de precipitación intensa por convección en el noroeste mexicano.

Capítulo 6

BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE PATRONES SIGNIFICATIVOS

6.1. Geo-análisis para la implementación de la técnica convectiva-estratiforme modificada

La identificación de patrones espacio-temporales necesarios para la búsqueda de información útil acerca de los eventos de precipitación intensa en el noroeste mexicano, debe de estar basada en la implementación de técnicas de análisis espacial que permitan la obtención de estimaciones de precipitación acerca de la cantidad de lluvia. Los resultados obtenidos deben arrojar información confiable acerca de la distribución espacial del fenómeno, su duración e intensidad. Dentro de la etapa de geo-análisis se incluye la comprensión y modificación de la técnica de estimación de precipitación con percepción remota seleccionada durante la etapa de geo-análisis. Dicha técnica debe generar estimaciones de la cantidad de lluvia que permitan la identificación de patrones significativos acerca de los eventos de precipitación intensa ocurridos durante el NAM en el noroeste mexicano, de tal forma que la información generada permita evaluar la red de pluviógrafos digitales del NAME en torno de su capacidad para capturar la variabilidad espacial de la precipitación por convección.

6.1.1. La versión original

En 1988 Rober F. Adler y Andrew J. Negri miembros del *Laboratory for Atmospheres* de la *NASA Goddard Space Flight Center* ubicada en Greenbelt, Maryland propusieron una técnica para la estimación de lluvia por convección (producida debajo de los yunques de sistemas convectivos maduros y que decaen) basada en imágenes infrarrojas del satélite GOES a la que nombraron *Convective Stratiform Technique* (CST). La técnica aplicada originalmente en la Florida, se basa en la búsqueda de temperaturas mínimas relativas con el fin de elegir candidatos a tormentas a los que se les asigna intensidad de lluvia y área de cobertura como una función de su temperatura. Los pasos detallados de la CST se enumeran a continuación (Adler and Negri, 1988).

Determinación de candidatos a núcleos convectivos. Empleando una temperatura umbral de 253 K , arreglos cuadrados de 50 x 50 kilómetros de la banda infrarroja de la imagen GOES son analizados para encontrar la posición del mínimo relativo T_{\min} . Si estos mínimos están formados por más de un píxel se utiliza la ubicación del centroide.

Cálculo del parámetro de pendiente. Con la intención de remover los mínimos que puedan corresponder a nubes *cirrus* muy delgadas que a pesar de ser altas y frías no producen lluvia, se calcula el parámetro de pendiente para cada uno de los T_{\min} . El parámetro de pendiente es definido como:

$$S = \bar{T}_{1-6} - T_{\min}$$

Donde \bar{T}_{1-6} es la temperatura promedio de los seis píxeles más cercanos al mínimo en las direcciones norte-sur este-oeste. Si T_{\min} está localizado en (i, j) e i aumenta al este y j al sur, entonces \bar{T}_{1-6} está dado por:

$$\bar{T}_{1-6} = \frac{(T_{i-2,j} + T_{i-1,j} + T_{i+1,j} + T_{i+2,j} + T_{i,j+1} + T_{i,j+2})}{6}$$

Cabe mencionar que el hecho que aparezcan cuatro píxeles en la dirección este-oeste se debe a que la técnica fue diseñada para imágenes GOES con resolución de 4 km en la dirección este-oeste y 8 km en la dirección norte-sur.

Discriminación entre cirrus y tormentas convectivas. Empleando datos de radar y la banda visible, se establece una relación empírica entre nubes *cirrus* y la actividad convectiva en el plano temperatura *vs* pendiente. Para cada valor de T_{\min} se obtiene el parámetro de pendiente S , el cual clasifica a los candidatos a núcleos convectivos en tormentas convectivas o en *cirrus* delgados no productores de lluvia. Una pendiente grande implica un mínimo mejor definido relacionado con mayor actividad convectiva. La ecuación para la función lineal de discriminación está dada por la ecuación:

$$S = 0.568(T_{\min} - 217)$$

Corrección del campo de visión. Debido a que mientras el satélite GOES tiene un campo de visión de aproximadamente 8 km y el modelo de nube empleado para la asignación de intensidad de lluvia y área de cobertura son representativos de una corriente ascendente de aproximadamente 1 km en la dirección horizontal, es necesario realizar una corrección de escala. Dicha corrección se aplica para poder comparar los dos tipos de datos mediante la ecuación lineal empírica

$$(T_{\min} - T_c) = 0.283 T_{\min} - 56.6$$

Donde T_c es la temperatura corregida y T_{\min} es la temperatura mínima para cada núcleo. Esta corrección se basa en una comparación de datos infrarrojos de GOES y TIROS-N AVHRR para toques de nube en tormentas.

Asignación de la intensidad y área de lluvia convectiva. Una vez que la ubicación de la celda convectiva ha sido determinada, los parámetros de lluvia se definen basados en los resultados del modelo unidimensional de nube. En dicho estudio los máximos de intensidad de lluvia y de volumen fueron calculados a partir de una secuencia de corridas del modelo como función del máximo en la altura de la nube (o el mínimo en la temperatura de la nube). Es importante aclarar que las simulaciones hechas con este modelo corresponden a perfiles observados durante la estación de verano en el estado de Florida en los Estados Unidos (Adler and Mack, 1984).

En la aplicación de la CST los resultados de Adler y Mack fueron modificados para utilizarse de la siguiente manera: El área de la tormenta convectiva A_r se asume que es cinco veces el área de la corriente ascendente simulada en el modelo:

$$A_r = 5\pi r^2$$

Donde r es el radio de la corriente ascendente. La intensidad promedio de lluvia R_{prom} sobre el área de lluvia de la celda es:

$$R_{prom} = \frac{VRR}{A_r}$$

Donde VRR es el volumen instantáneo de lluvia calculado de los resultados encontrados en las corridas del modelo. Se obtiene un ajuste lineal entre la temperatura corregida T_c y la intensidad de lluvia R_{prom} calculados en las diferentes corridas del modelo aplicado a Florida.

$$R_{prom} = 74.89 - 0.266 T_c$$

Un ajuste similar pero log-lineal entre T_c y A_r arroja:

$$A_r = e^{(15.27 - 0.0465 T_c)}$$

Empleando un tamaño de píxel infrarrojo constante, a los píxeles adyacentes a T_{min} les es asignado, en forma de espiral, el valor de R_{prom} , concluyendo en el momento en el que el valor de A_r es alcanzado.

Asignación de lluvia estratiforme. En primera instancia, es necesario determinar una temperatura umbral T_s para con ésta identificar la región estratiforme. Como la temperatura umbral debe de coincidir con la porción relativamente delgada de un yunque maduro, se calcula la temperatura moda $T_{mod a}$ en un área aproximada de $80 km$, por lado centrada en la ubicación de cada T_{min} cuyo parámetro de pendiente es menor o igual a 4 y que ha pasado la prueba de discriminación entre *cirrus* y tormentas. Cabe mencionar que sólo temperaturas menores a $253 K$ se incluyen en dicho cálculo, para evitar ruido proveniente de nubes bajas o del suelo. La temperatura umbral para la región estratiforme T_s se define como el promedio ponderado de las $T_{mod a}$ calculadas.

$$T_s = E[W_i T_{mod a(i)}]$$

$E[]$ es el valor promedio ponderado, donde el peso W_i es el número de píxeles infrarrojos a la temperatura $T_{mod a}$. Así píxeles infrarrojos con temperatura menor que T_s y que no hayan sido previamente asignados como lluvia convectiva serán asignados como lluvia estratiforme. En estos puntos la intensidad asignada es de 2 mm/h valor que según los autores coincide con las observaciones de que la lluvia estratiforme es aproximadamente un décimo de la lluvia convectiva promedio (en este caso 20 mm/h).

6.1.2. Modificaciones propuestas

A partir de su publicación la CST ha sido objeto de múltiples adaptaciones y modificaciones (Goldenburg *et al.*, 1990; Negri *et al.*, 1993; Bendix and Bendix, 1998; Reudenbach *et al.*, 2001; Oropeza, 2001; Fashé *et al.*, 2002; Islam *et al.*, 2002; Negri *et al.*, 2002a). Las adaptaciones siempre son necesarias ya que están relacionadas con el ajuste de la relación entre la temperatura de la superficie del tope de la nube y la intensidad de lluvia para las diferentes regiones del mundo donde ha sido empleada dicha técnica. Por otro lado, las modificaciones están relacionadas principalmente con las pruebas que se emplean para discriminar entre nubes que precipitan y nubes que no lo hacen y en cambiar los parámetros del modelo empleado tanto para la asignación de la intensidad como el área de lluvia.

Para este trabajo y debido a que la técnica va a ser probada dentro de la región noroeste de México, se considerarán las siguientes adaptaciones propuestas para la región, con el fin de obtener estimaciones de precipitación más precisas.

1. El valor de la temperatura umbral para la búsqueda de T_{min} (Negri *et al.*, 1993; Pellegrin, 1994).

2. El empleo de un modelo unidimensional de nube para ajustar la relación entre la temperatura de la superficie del tope de la nube y la intensidad de lluvia para el noroeste mexicano (Oropeza, 2001).

En cuanto a las modificaciones propuestas a la CST, están encaminadas en un sentido espacial, es decir de lo que se trata es de poner atención a la forma en la que el algoritmo realiza cada una de las tareas de búsqueda y obtención de los parámetros. Esto significa que lo que se modifica no son los parámetros, sino la manera en la que éstos son obtenidos dentro del algoritmo. A continuación, se enumeran a detalle las modificaciones propuestas a la CST:

1. Realizar la búsqueda de los T_{\min} a partir de filtrar la porción de imagen que resulta de aplicar una temperatura umbral a la imagen original. Lo anterior con el fin de que el filtro detecte mínimos relativos a partir de un T_{\min} dentro de cada una de las nubes definidas por la temperatura umbral y así evitar el empleo de arreglos cuadrados de búsqueda.
2. Incorporar el cálculo del parámetro de gradiente para cada T_{\min} . Esto permitirá que junto con el cálculo del parámetro de pendiente, la búsqueda de candidatos a núcleos convectivos sea más eficiente (Ba y Gruber, 2001).
3. Asignar la intensidad y el área de lluvia convectiva en función del gradiente de temperatura de la superficie del tope de la nube. Es decir, a partir de la posición de los T_{\min} asignados como núcleos convectivos, asignar el valor de R_{prom} para cada píxel en función de cómo aumenta el valor de temperatura de sus vecinos cercanos hasta completar toda el A_r correspondiente. Lo anterior permitirá evitar la asignación del área de lluvia convectiva en forma de espiral.

4. Obtener el valor de $T_{mod a}$ a partir de todos los valores de nube, para evitar el uso de búsquedas en áreas predefinidas.

Tanto las adaptaciones como las modificaciones consideradas arriba deben permitir la obtención de estimaciones de la cantidad de lluvia más precisas, de tal forma que se pueda generar mayor certidumbre acerca de las precipitaciones por convección en la zona de estudio. Por todo lo anterior, en lo siguiente, la técnica para estimación de precipitación empleada en este trabajo será referida como Técnica Convectiva Estratiforme Modificada (TCEM).

6.1.3. La Técnica Convectiva Estratiforme Modificada

Para la implementación de la TCEM, se construyó el modelo cartográfico mostrado en la Figura 6.1. Dicho modelo implementado para la obtención de estimaciones de precipitación convectiva y estratiforme, incluye los pasos que a continuación se detallan.

Selección de nubes del canal infrarrojo. A partir de la temperatura umbral de 253.15 K se procede a separar porciones de la imagen que corresponden a nubes que potencialmente precipitan. El valor umbral se considera el más apropiado tanto para la temporada de calor como para el noroeste mexicano (Negri *et al.*, 1993; Pellegrin, 1994).

Determinación de candidatos a núcleos convectivos. Se filtran todas las celdas asignadas como nubes mediante la implementación de un filtro de 5x5 el cual da como resultado para cada celda el promedio de temperatura de sus 24 vecinos cercanos T_{avg} . El tamaño del filtro fue determinado a partir de probar ventanas de varios tamaños; la ventana de 5x5 se considera adecuada para el tamaño y la forma promedio de las nubes en la zona de estudio.

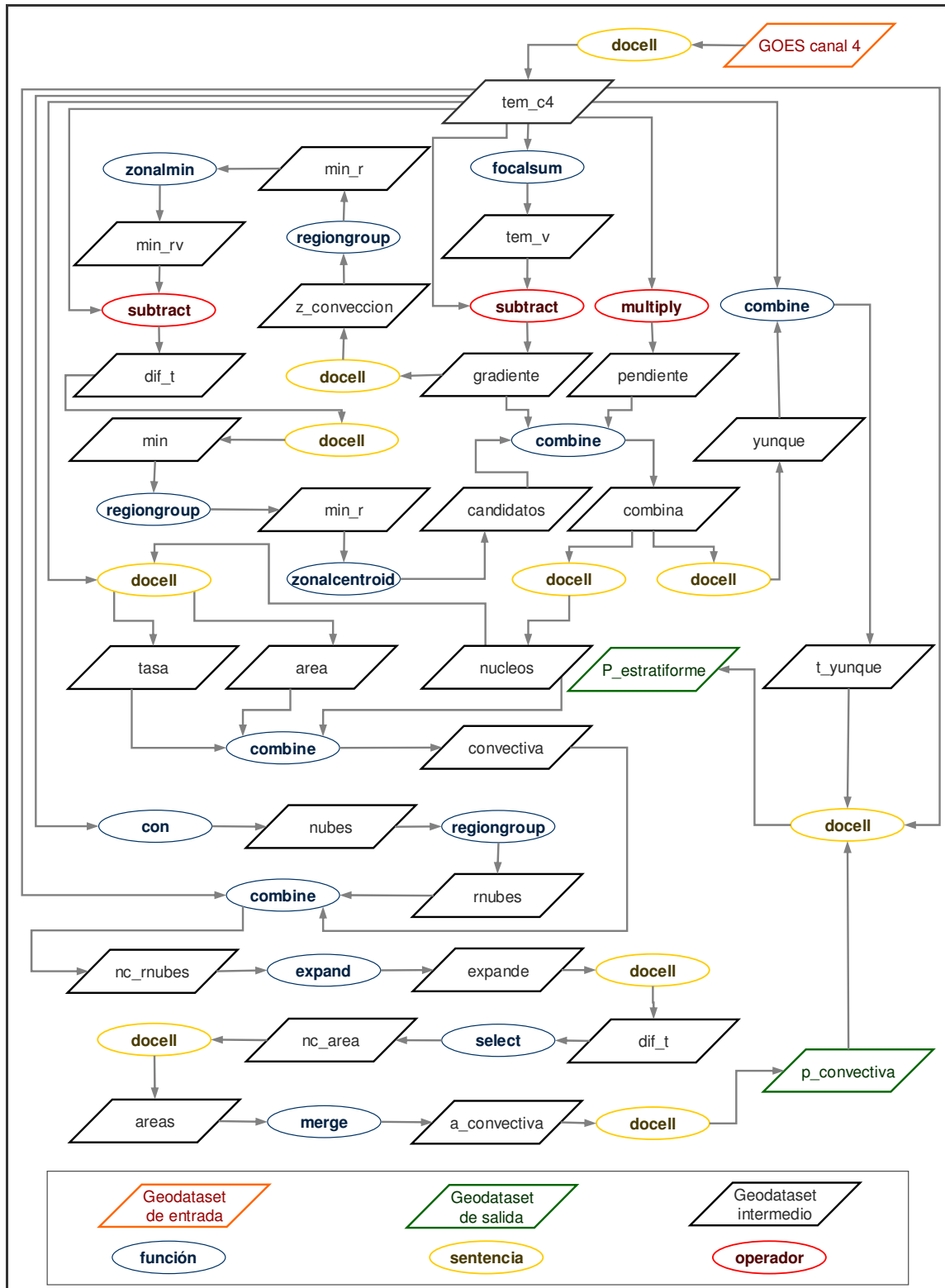


Figura 6.1. Modelo cartográfico para la obtención de estimaciones de precipitación

Se procede a seleccionar como regiones de posible convección todas las celdas cuyo valor de temperatura sea mayor que el valor promedio de sus 24 vecinos. Se seleccionan como candidatos a núcleos convectivos todos los mínimos relativos T_{\min} de cada una de las regiones de posible convección. Si los mínimos están formados por más de un píxel se utiliza la ubicación del centroide.

Cálculo del parámetro de gradiente. De acuerdo con parámetros anteriormente establecidos (Ba and Gruber, 2001) para cada uno de los T_{\min} seleccionados, se obtiene el parámetro de gradiente $G_{5 \times 5}$ definido como:

$$G_{5 \times 5} = T_{avg} - T_{\min}$$

Cálculo del parámetro de pendiente. De igual forma que el cálculo del parámetro de gradiente, se obtiene el parámetro de pendiente S para todos los T_{\min} seleccionados como candidatos a núcleos convectivos, mediante la función lineal de discriminación entre nubes *cirrus* y tormentas convectivas. Dicho parámetro se define por la siguiente ecuación:

$$S = 0.568(T_{\min} - 217.15)$$

Selección de núcleos convectivos. Mientras que un valor alto en el parámetro $G_{5 \times 5}$ está claramente asociado a nubes convectivas; un valor bajo de $G_{5 \times 5}$ corresponde a un gradiente de temperatura débil asociado con nubes *cirrus* que aunque frías, no precipitan. Todas las celdas previamente asignadas como T_{\min} cuyo parámetro $G_{5 \times 5}$ sea mayor que el parámetro S son asignadas como núcleos convectivos.

Cálculo de la tasa de lluvia instantánea y área de lluvia convectiva. Una vez que han sido determinados todos los núcleos convectivos con su respectiva temperatura T_{nc} para la imagen, los parámetros de lluvia (intensidad y área) se definen basados en los resultados de la implementación del modelo unidimensional de nube obtenido con radiosondeos diarios para 35 años durante la temporada en la estación Empalme ubicada el sur del estado de Sonora (Oropeza, 2001).

Con base en el resultado del modelo unidimensional de nube para el noroeste mexicano, se realiza un ajuste lineal entre la temperatura de la superficie del tope de la nube y la precipitación instantánea que una nube produciría cuando se desarrolla con las condiciones termodinámicas que registra cada radiosondeo. Con un coeficiente de correlación lineal de 0.3, la relación obtenida es la siguiente:

$$R_{prom} = 7.20 - 0.02T_{nc}$$

Para la asignación del área de lluvia convectiva, se asume que en el modelo unidimensional de nube para el noroeste mexicano, el área de la tormenta convectiva A_r es también cinco veces el área de la corriente ascendente simulada en el modelo, por lo que el área de lluvia convectiva se asigna como:

$$A_r = \rho^{(15.27 - 0.0465 T_{nc})}$$

Para efectos de la implementación del algoritmo y empleando un tamaño de píxel infrarrojo de $4 \times 4 \text{ km}$, se asigna un área constante para cada celda de 16 km^2 . Para todas las celdas asignadas como núcleos convectivos se determina

su tasa de lluvia instantánea R_{prom} y el número de celdas con precipitación convectiva C_{rain} definido como:

$$C_{rain} = \frac{A_r}{16}$$

Selección de celdas con precipitación convectiva para la asignación de tasa de lluvia instantánea. Para cada celda asignada como T_{nc} se obtiene la diferencia de temperaturas con respecto del resto de valores de la nube T_{dif} y se procede a asignar el número de celdas de su respectivo valor de C_{rain} . Conforme la diferencia de temperaturas aumenta, el cálculo de diferencias concluye en el momento en el que el número de celdas asignadas es igual al valor de C_{rain} . Lo anterior permite asignar la tasa de lluvia instantánea R_{prom} a toda el área de lluvia convectiva conforme aumenta el gradiente de temperatura.

Identificación del yunque estratiforme. Como el yunque estratiforme debe de coincidir con una región relativamente delgada de zonas de antigua o débil convección, se obtiene la temperatura probable del yunque estratiforme T_{ye} para aquellas celdas T_{min} cuyo parámetro de pendiente S es menor o igual a 4 y que no hayan sido asignados previamente como núcleos convectivos.

Cálculo de la temperatura umbral para la asignación de lluvia estratiforme. La temperatura umbral para la región estratiforme T_s se define como el promedio ponderado de todas las T_{ye} calculadas.

$$T_s = E[W_i T_{ye(i)}]$$

$E[]$ es el valor promedio ponderado, donde el peso W_i es el número de celdas a la temperatura T_{ye} . Así todas las celdas con temperatura menor que T_s y que no hayan sido previamente asignadas como lluvia convectiva serán asignadas como lluvia estratiforme a una tasa del 10% del valor que le correspondería como tasa de lluvia convectiva instantánea R_{prom} a la temperatura T_s .

6.1.4. Obtención de resultados

La aplicación de técnicas de estimación de precipitación con percepción remota, permiten la búsqueda de información útil acerca de la cantidad de lluvia en una región geográfica, ya que ofrece un mejor análisis del fenómeno de la precipitación. La Figura 6.2 muestra los resultados de la Técnica Convectiva Estratiforme Modificada aplicada a las imágenes GOES para el 28 de junio del 2003 en el noroeste mexicano.

Dicha figura es una secuencia de acumulados horarios de la cantidad de lluvia durante todo el día en el que se muestra información acerca de la intensidad, la duración y la distribución espacial de la precipitación para el día de mayor actividad convectiva durante la temporada de calor del 2003. Los resultados obtenidos permitirán, previa validación de las estimaciones, la identificación de patrones significativos acerca de los eventos de precipitación intensa ocurridos en el noroeste mexicano durante la temporada de calor.

La Figura 6.3, muestra la variación porcentual horaria del área de lluvia para precipitaciones clasificadas como convectivas y estratiformes para la fecha de estudio. De los resultados obtenidos se puede destacar que la precipitación estratiforme aporta en promedio el 85.1% del área total de lluvia. El valor observado a las 11 horas corresponde a valores de precipitación convectiva el Mar de Cortes.

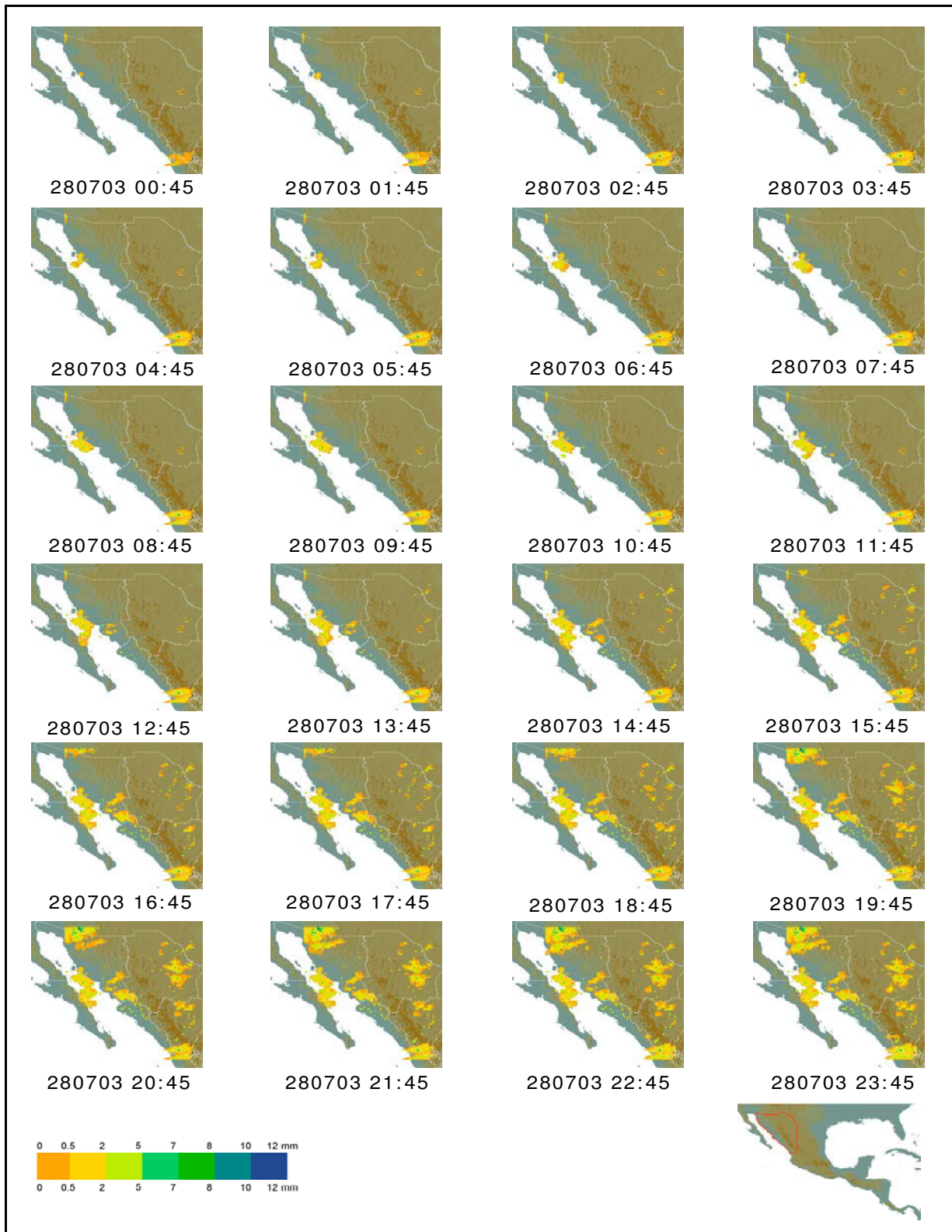


Figura 6.2. Precipitación acumulada en 24 horas

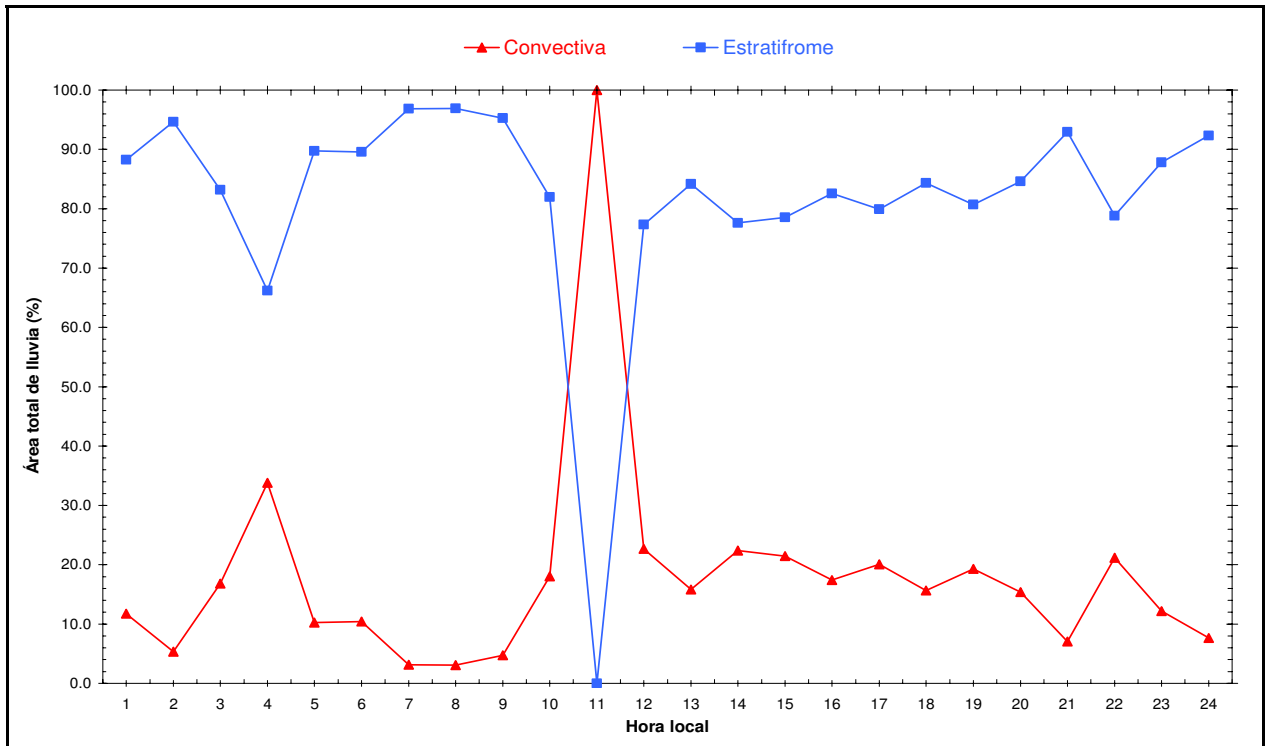


Figura 6.3. Variación porcentual horaria del área total de lluvia

La Figura 6.4, muestra la variación porcentual horaria del volumen de lluvia para precipitaciones clasificadas como convectivas y estratiformes para la fecha de estudio. De los resultados obtenidos se puede destacar que la precipitación convectiva aporta en promedio el 64.5% del volumen total de lluvia.

La Figura 6.5, muestra el porcentaje acumulado de área total y el volumen total de lluvia para la fecha de estudio. La gráfica muestra que a partir de medio día se presenta el 80% del área y cantidad de lluvia total.

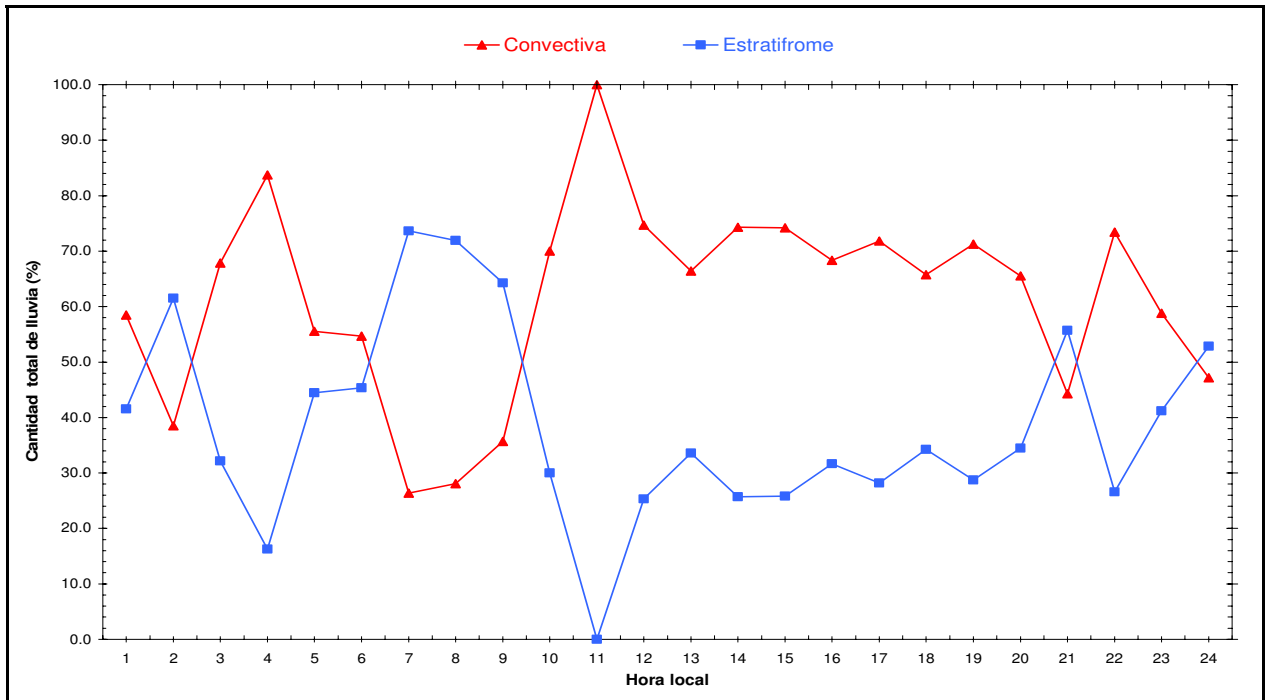


Figura 6.4. Variación porcentual horaria del volumen total de lluvia

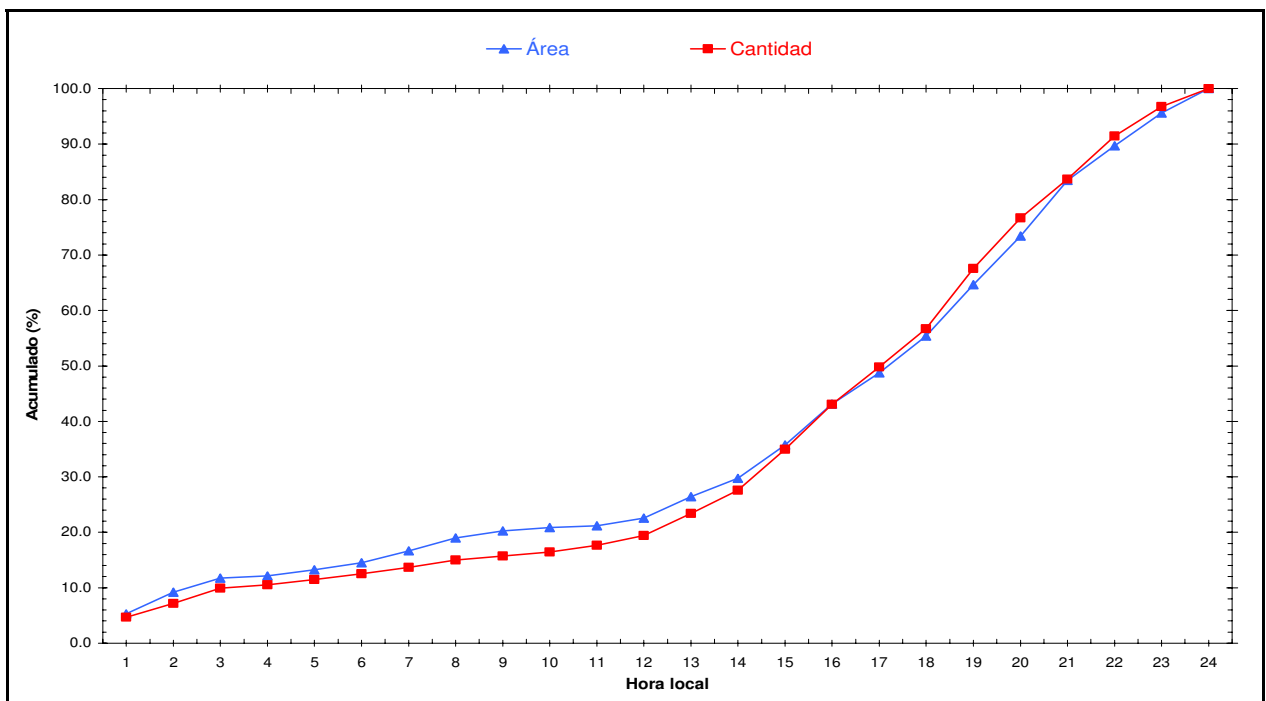


Figura 6.5. Porcentaje acumulado de área y volumen de lluvia

6.1.5. Validación de las estimaciones de precipitación

Para este trabajo en particular y de acuerdo con la etapa de geo-selección de datos, la validación de las estimaciones de precipitación generadas a partir de la implementación de la TCEM, es realizada mediante datos de la red de pluviógrafos digitales y productos orbitales de nivel 2 del satélite TRMM. La evaluación de los elementos que definen la cantidad de lluvia, se realiza en dos sentidos. Primeramente mediante la red de pluviógrafos digitales se evalúa la precisión de la intensidad y duración de las estimaciones de precipitación. Mientras que con los datos orbitales del satélite TRMM se evalúa la distribución espacial de la precipitación.

6.1.5.1. Validación con la red de pluviógrafos digitales

Al hacer comparaciones entre las estimaciones de satélite y datos de redes de pluviógrafos surge una incógnita que tiene que ver con las diferencias de escala espacial entre una imagen de satélite con representación de lo que en promedio ocurre con la lluvia en un área de aproximadamente 16 km^2 y la medición de un pluviógrafo representativa sólo de un área circular de aproximadamente 10 cm^2 . Existen varias posturas al respecto de este problema y diferentes autores han aplicado diferentes criterios que van desde comparar directamente los valores medidos por el pluviógrafo contra el píxel que incluye su posición geográfica, hasta comparar en una vecindad preestablecida el valor del píxel que más se asemeja al valor del pluviógrafo (Rosengaus *et al.*, 1993). La primera postura, aplicada en este trabajo, es la ideal siempre y cuando se cuente con una red de pluviógrafos densa de tal forma que capture la distribución espacial de las precipitaciones (Fashé *et al.*, 2002).

La Figura 6.6, muestra la comparación de los valores acumulados de precipitación de la red de pluviógrafos digitales y las estimaciones de

precipitación generadas mediante la TCEM para las 76 estaciones con datos válidos. Se observa la presencia de dos datos fuera de rango correspondiente a las estaciones 053 y 054. Mientras la red de pluviógrafos digitales registró datos de precipitación altos, 4.83 y 9.15 *mm* respectivamente, la TCEM no asignó precipitación. Lo anterior puede ser explicado por la presencia de topes de nubes con actividad convectiva muy intensa localizadas en la estratósfera en donde la temperatura de la superficie del tope de las nubes es mayor que la de nubes con menor actividad convectiva localizadas dentro de la tropósfera (Houze, 1997; McGregor and Nieuwolt, 1998; Weaver and Lindsey, 2004).

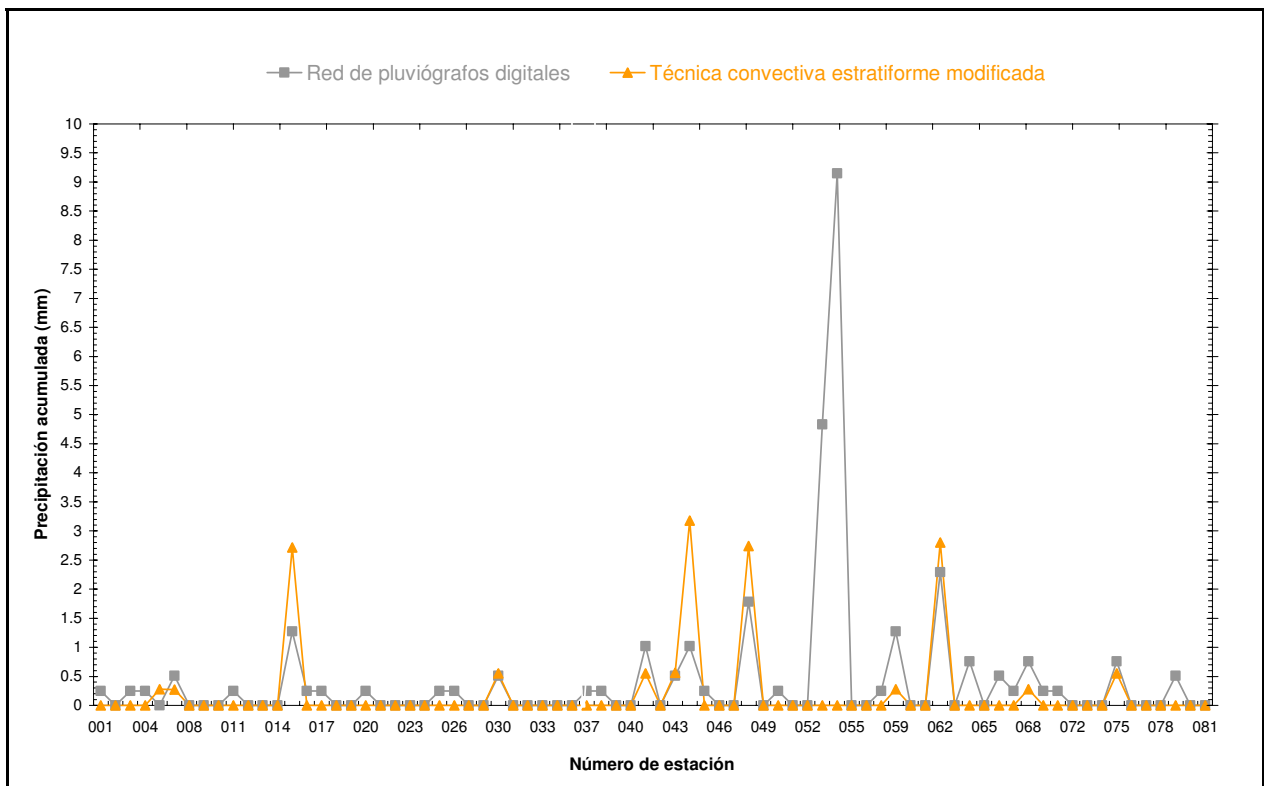


Figura 6.6. Valores de precipitación acumulada en 24 horas para la fecha de estudio

De los resultados obtenidos por la TCEM, se puede mencionar que las precipitaciones clasificadas como convectivas presentan una sobreestimación del 127% en promedio; mientras que las precipitaciones clasificadas como estratiformes presentan una subestimación del 32% en promedio. De acuerdo

con los trabajos anteriores para la zona de estudio, las variaciones porcentuales de los resultados obtenidos tanto para precipitación convectiva como para precipitación estratiforme, se encuentra dentro del rango de resultados esperados. Lo anterior sin contar que la aplicación de la TCEM en este trabajo, se realiza para un sólo día de condiciones extremas de precipitación, ya que se trata del día de mayor representatividad espacial para el periodo de máxima actividad convectiva de la temporada de calor 2003. En cuanto al no registro de precipitación, en 43 de las 76 estaciones no se registra lluvia por parte de la red de pluviógrafos, obteniéndose un 98% de coincidencia por parte de la TCEM.

6.1.5.2. Validación con datos orbitales TRMM

De acuerdo con los resultados hasta ahora obtenidos, la incertidumbre en cuanto a la distribución espacial de la lluvia es alta, ya que para este trabajo en particular, se tiene una probabilidad de detección de tormentas de apenas el 50% de acuerdo con la hipótesis de trabajo planteada en capítulos anteriores. Por lo anterior es necesario incorporar en la evaluación de la cantidad de lluvia otro tipo de datos satelitales (Bendix *et al.*, 2002; Furtado, 2004; Palmeira *et al.*, 2004; Steiner, 2004).

La evaluación de las estimaciones de precipitación obtenidas con percepción remota, se realiza mediante el uso de las órbitas 32025 y 32028 del producto orbital TRMM_2A25. La Figura 6.7 muestra junto con las órbitas 32025 y 32028 el resto de órbitas del satélite TRMM para el día 28 de junio del 2003.

La órbita 32025 es una imagen ascendente con toma de lectura de las 08:33:19 a las 10:05:42 hora local. La primera órbita permite hacer una evaluación para los datos de las 08:45 y 09:45 horas de tiempo local. En ambos casos el satélite TRMM detecta áreas de precipitación en la categoría de probable en el Mar de Cortés, coincidiendo al 74.3% con la precipitación

asignada como estratiforme y 57.7% con la precipitación asignada como convectiva por la TCEM. Para la precipitación con categoría de certeza la coincidencia es del 42.8% únicamente para la precipitación asignada como estratiforme por la TCEM.

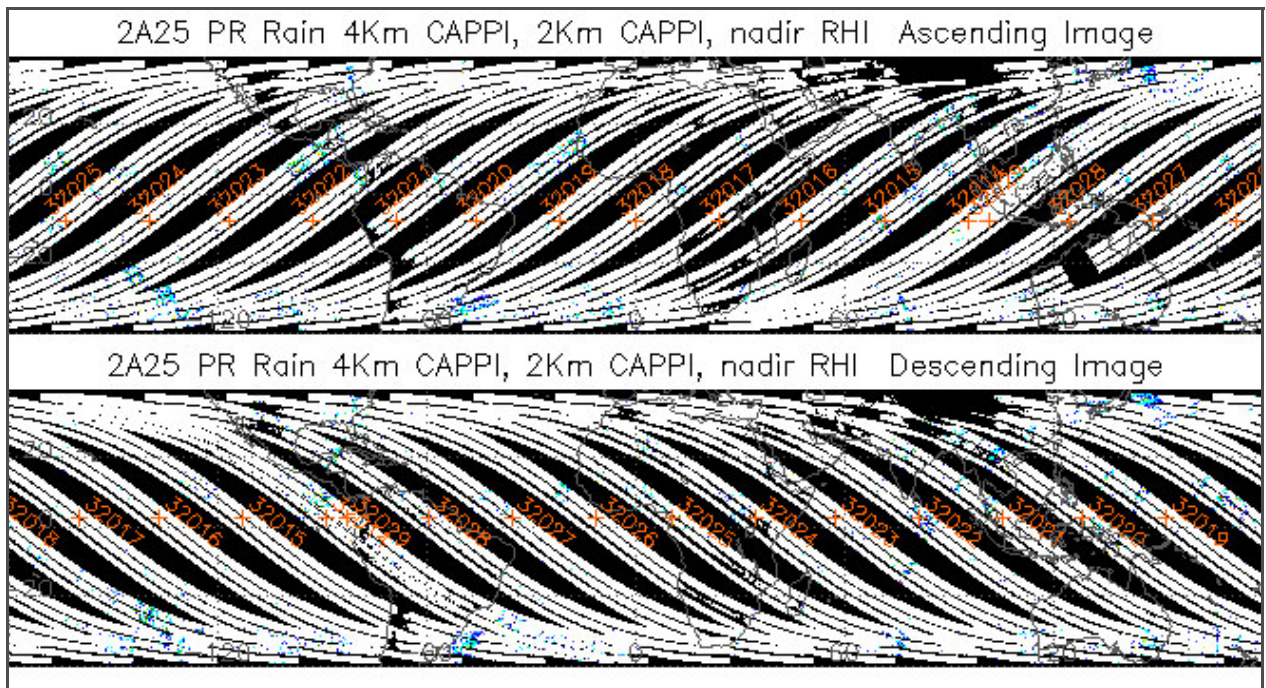


Figura 6.7. Órbitas disponibles del satélite TRMM para el día 28 de junio del 2003

La órbita 32028, es una imagen descendente con toma de lectura de las 13:10:28 a las 14:42:51 hora local. Esto permite hacer para la fecha de estudio una evaluación a medio día para los datos de las 13:45 hora local. Para esta hora el satélite TRMM sólo reporta precipitación convectiva en la categoría de probable con una coincidencia del 67.6% con la TCEM.

Tanto para la órbita 32025 como 32028 no hay coincidencia con mediciones de las estaciones de la red de pluviógrafos digitales del NAME. Para la primera órbita la precipitación ocurre en el Mar de Cortes frente a las costas de Sonora; mientras que para la segunda órbita la precipitación ocurre en la región noreste del estado de Chihuahua, fuera del área de medición de la red

de pluviógrafos. Lo anterior permite evaluar de manera parcial, la distribución espacial de la lluvia, dándoles mayor certidumbre a las estimaciones de precipitación obtenidas con percepción remota mediante la implementación de la TCEM.

6.2. Evaluación de la red de pluviógrafos digitales

A partir de la implementación de la Técnica Convectiva Estratiforme Modificada (TCEM) y tras la evaluación de los elementos que definen la cantidad de lluvia (intensidad, duración y distribución espacial), es posible identificar patrones significativos acerca de la precipitación ocurrida el día 28 de junio del 2003 en la región noroeste de México, de tal manera que la información obtenida permita realizar un cálculo más exacto de la capacidad que la red de pluviógrafos digitales del NAME tiene para detectar y en su caso, reproducir la distribución espacial de las precipitaciones convectivas ocurridas durante la temporada de calor en el noroeste mexicano. Los parámetros que permiten una mejor evaluación de la red de pluviógrafos son el número y radio de las tormentas identificadas en las estimaciones de precipitación con percepción remota

La Figura 6.8 muestra el número de tormentas detectadas cada hora por la Técnica Convectiva Estratiforme Modificada para la zona de estudio. Con un promedio de 8 tormentas detectadas para la fecha de estudio, en la gráfica se puede observar que de las 13:00 a la 23:00 horas se presenta un número de tormentas superior al promedio, observándose un máximo de 22 tormentas a las 15:00 horas tiempo local.

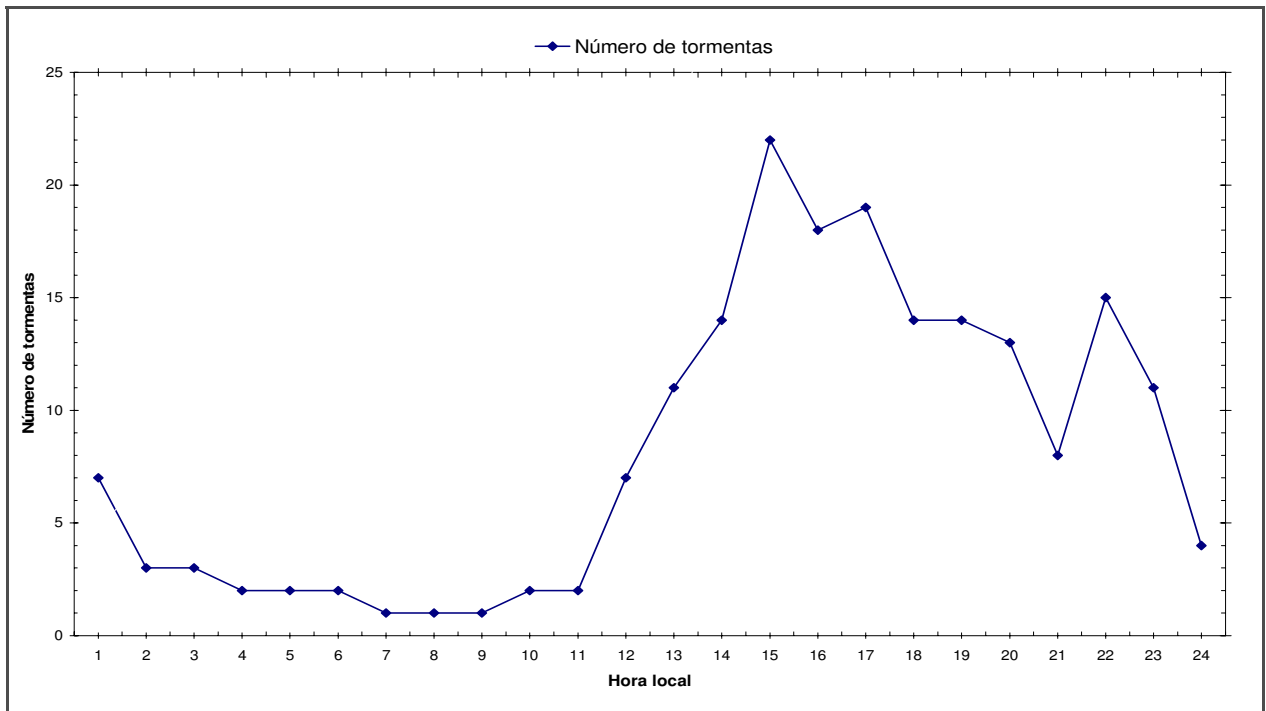


Figura 6.8. Número de tormentas detectadas por la TCEM

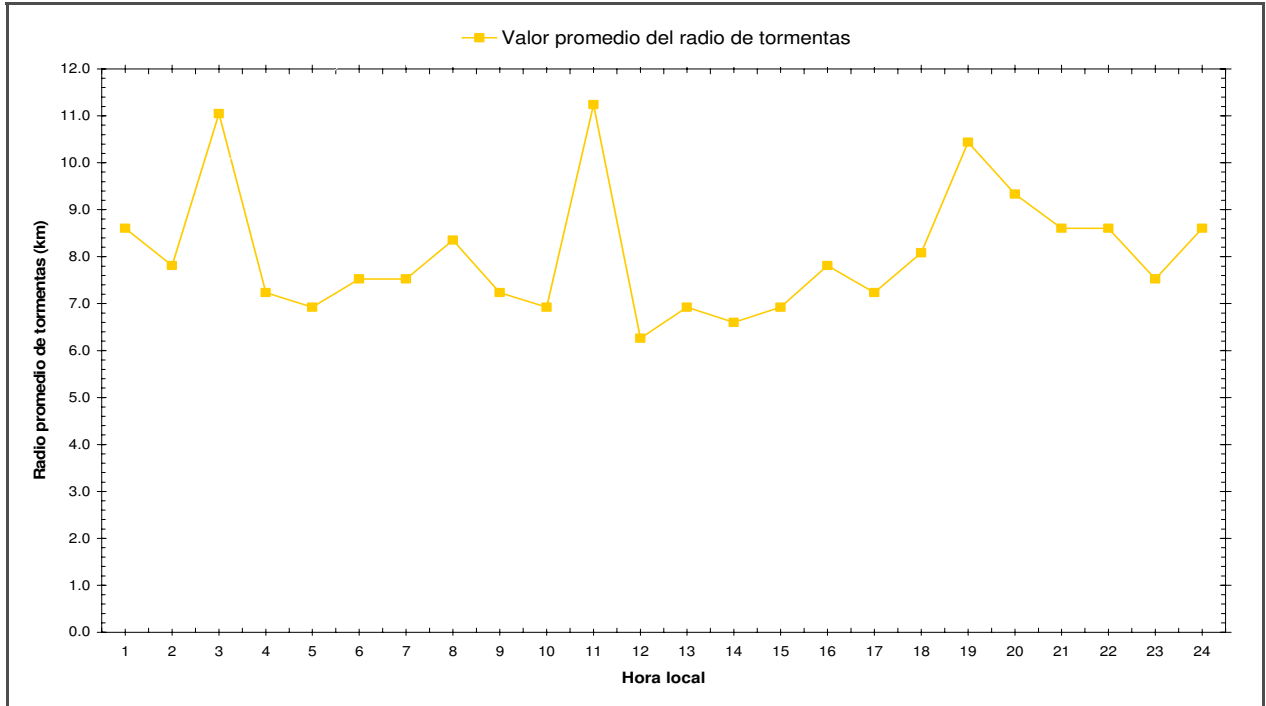


Figura 6.9. Valor promedio del radio de tormentas detectadas por la TCEM

Por su parte la Figura 6.9, muestra el valor promedio del radio de las tormentas detectadas cada hora por la Técnica Convectiva Estratiforme Modificada para la zona de estudio. Con los datos obtenidos se obtiene un valor promedio de 8.1 *km*, con un valor máximo de 11.2 *km* registrado a las 11:00 horas y un valor mínimo de 6.3 *km* registrado una hora después.

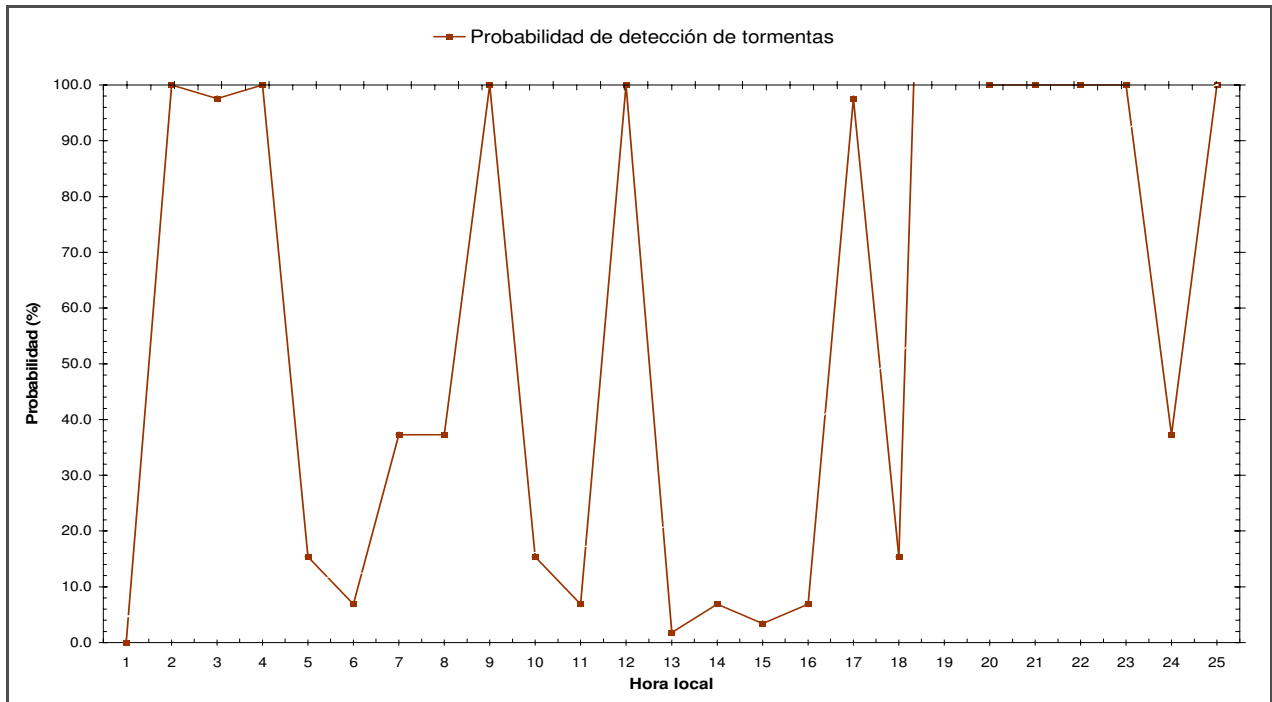


Figura 6.10. Probabilidad de detección de tormentas de la red de pluviógrafos digitales del NAME

Con los datos obtenidos en las Figuras 6.8 y 6.9, es posible calcular por hora la probabilidad de que la red de pluviógrafos digitales del NAME detecte tormentas (Figura 6.10). En la gráfica se observa que a partir de las 17:00 horas de tiempo local, la red tiene mayores probabilidades de detectar tormentas, ya que éstas se presentan con un radio mayor.

Capítulo 7

CONCLUSIONES

7.1. Comentarios finales

De acuerdo con los resultados obtenidos, las conclusiones de este trabajo de tesis, pueden dividirse en tres partes: La primera relacionada con el marco teórico empleado en este trabajo; la segunda dedicada a la obtención de estimaciones de precipitación con percepción remota y su proceso de validación; mientras que la tercera y última parte está dedicada a la evaluación de la red de pluviógrafos digitales del NAME para capturar y en su caso validar la variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones ocurridas durante la temporada de calor en el noroeste mexicano.

Con respecto del proceso de construcción de conocimiento geoespacial como metodología puedo concluir lo siguiente:

- La búsqueda de información útil basada en los procesos de KDD y GKDD, es una metodología alterna y emergente dentro de la Geomática que privilegia la búsqueda de información, no sólo a partir de una gran cantidad de datos geoespaciales, sino a partir del planteamiento específico de una identificación no exhaustiva de patrones significativos

de fenómenos geoespaciales; tal es el caso de la variable de precipitación abordada en este trabajo

En lo que se refiere a las estimaciones de precipitación con percepción remota generadas en este trabajo, puedo decir lo siguiente:

- El empleo de estimaciones de precipitación con percepción remota son una opción viable y complementaria en la estimación confiable de la cantidad de lluvia. Las estimaciones de precipitación generadas con sensores geostacionarios son adecuadas para incorporar la distribución espacial de la lluvia, ya que capturan de manera adecuada la variabilidad espacial y temporal de la precipitación. Sin embargo, y de acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo no es posible obtener una estimación precisa de la intensidad y duración de la lluvia utilizando solamente la temperatura del tope de las nubes.
- Las modificaciones propuestas a la Técnica Convectiva-Estratiforme perfeccionan en términos espaciales la búsqueda de mínimos relativos y la manera en la que se asigna el área de precipitación convectiva. Ya que se elimina la búsqueda de mínimos relativos en áreas predefinidas y se elimina la asignación en espiral de áreas de precipitación convectiva. Redituando lo anterior en una mejor identificación de patrones significativos; tal es el caso de los parámetros de número y radio de tormentas que potencialmente detecta el algoritmo.
- Es necesario incluir datos de radar para evaluar de forma más confiable la distribución espacial de las tormentas. En este sentido los productos orbitales del satélite TRMM evalúan de manera incompleta las estimaciones de precipitación con percepción remota generadas en este trabajo.

Finalmente con respecto a la evaluación de la red de pluviógrafos digitales del NAME a partir de la identificación de patrones significativos de las estimaciones de precipitación con percepción remota, puedo concluir los siguientes resultados:

- La búsqueda no exhaustiva de información útil permite conocer que en promedio, para el día 28 de julio de 2003, la probabilidad de la red de pluviógrafos digitales del NAME para capturar tormentas es del 54.5%. Esta probabilidad es ligeramente mayor a la obtenida mediante valores teóricos.
- De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo, para que la red capture de manera más adecuada las tormentas durante la temporada de calor, es necesario contar con un número mayor de estaciones a lo largo de la costa, colocadas a distancias no mayores a los 8 kilómetros, mientras que a lo largo de la ladera oeste de la Sierra Madre Occidental, la distribución de las estaciones puede ser menor conforme aumenta la pendiente, separadas a una distancia de 10 *km* en promedio.

7.2. Recomendaciones para el futuro

Debido a la complejidad que representa la búsqueda de información útil dentro del proceso de construcción de conocimiento geoespacial –en particular acerca del fenómeno de la precipitación- existen algunas consideraciones que a continuación acerca de la elaboración de trabajos futuros acerca de las estimaciones de precipitación con percepción remota

- Es necesario incorporar en las estimaciones de precipitación con percepción remota, protocolos que permitan la correcta evaluación de

los resultados obtenidos. En dichos protocolos se deben incluir datos de redes de pluviógrafos en campo, mediciones de radar y datos de satélites de tal forma que se puedan validar de la mejor manera posible los resultados obtenidos.

- Resulta evidente que los resultados obtenidos con una técnica de estimación de precipitación que emplea únicamente la relación entre temperatura del tope de las nubes y la intensidad y el área de las lluvias, siempre está sujeta a perder algunos eventos y sobre todo aquellos muy intensos que ocurren por encima de la troposfera. La incorporación de la información de sensores de radar a los modelos de asignación de intensidad y área de precipitación pueden ser empleados para obtener relaciones temperatura-lluvia más eficientes. En particular los productos orbitales del satélite TRMM pueden ser empleados como entrada para modelos de asignación de intensidad de precipitación convectiva y estratiforme (Negri *et al.*, 2002a).

- Es importante incluir dentro de las técnicas de estimación de precipitación con percepción remota, el seguimiento en el tiempo de la evolución de las tormentas. Esto permite definir el estado de la tormenta en cada paso de tiempo, brindando un criterio más para la correcta asignación de la intensidad y área de lluvia. Para llevar a cabo lo anterior es necesario contar con imágenes de satélite con al menos treinta minutos de diferencia entre una y otra.

- La incorporación de las estimaciones de precipitación con percepción remota, pueden ser empleadas para alimentar modelos lluvia-escorrentía, en los cuales la variabilidad de la precipitación, define en gran medida los resultados obtenidos (Fattorelli, *et al.*, 1996). En particular con las estimaciones de lluvia generadas con imágenes

geoestacionarias de los satélites GOES se pueden generar para áreas geográficas pequeñas, acumulados horarios y diarios para eventos específicos; mientras que con productos del satélite TRMM se pueden generar para áreas geográficas más grandes, promedios mensuales, anuales y multianuales.

BIBLIOGRAFÍA

Referencias Bibliográficas

- Aldridge, H. C. 2001. A rouge set based methodology for geographic knowledge discovery. **6th International Conference on Geocomputation**. Brisbane, Australia. (1-19).
- Arpinar, I. B., Sheth, A., Ramakrishnan, C., Usery, L. E., Azami, M. and Kwan, M. 2004. Geospatial Ontology Development and Semantic Analytics. **Handbook of Geographic Information Science**. Ed. J. P. Wilson and A. S. Fotheringham, Blackwell Publishing. United States. (1-21).
- Balda, G. S. e Vendrame, I. 2003. Adaptação da Técnica de Estimativa de Precipitação NAW para a Área de Abrangência do Radar de Bauru, SP. **Anais XI SBSR**. Belo Horizonte, Brazil. (1203-1210).
- Bandeem, W. R. and Katz, I. 1975. Active microwave sensing of the atmosphere. **Active microwave workshop report, NASA SP-376**. Washington, DC. 80p.
- Barret, E. C. and Martin, D. W. 1981. **The use of satellite data in rainfall monitoring**. Academic Press. United States. 340 p.
- Battan, L. J. 1973. **Radar observation of the atmosphere**. University of Chicago Press. United States. 323p.
- Bendix, A., Bendix, J., Gämmerler, S., Reudenbach, Ch. and Weise, S. 2002. The El Niño 1997/98 As Seen from Space - Rainfall Retrieval and Investigation of Rainfall Dynamics with GOES-8 AND TRMM Data. **Proceedings the 2002 EUMETSAT Meteorology Satellite Conference**. Dublin, Ireland. (647-652).

- Bishr, Y. and Werner, K. 2000. Ontology-Based Modelling of Geospatial Information. **3rd AGILE Conference on Geographic Information Science**. Helsinki, Finland. (1-4).
- Blok, C. 2003. Dynamic Visualisation Variables in Animation: Their use for the monitoring of spatial dynamics. **Proceedings of the 21st International Cartographic Conference 'Cartographic Renaissance'**. Durban, South Africa. (98-100).
- Brodeur, J. and Bédard, Y. 2002. Extending Geospatial Repositories with Geosemantic Proximity Functionalities to Facilitate the Interoperability of Geospatial Data. **Proceedings of ISPRS, SDH2002 and CIG Join International Symposium on Geospatial Theory, Processing and Application**. Ottawa, Canada. (1-6).
- Brodeur, J., Bédard, Y. and Proulx, M. J. 2000. Modelling Geospatial Application Databases using UML-based Repositories Aligned with International Standards in Geomatics. **Proceedings of Eighth ACM Symposium on Advances in Geographic Information Systems (ACMGIS)**. Washington, United States. (39-46).
- Bruckner, A. E. and Schneider, W. H. 2001. Using Geospatial Models and 3-D Visualization to Advance Decisionmaking and Communication of Remedial Solutions to Environmental Programs. **Technical paper for A&WMA 94th Annual Conference**. Orlando, Florida. (1-11).
- Buchanan, G., Blandford, A., Jones, M. and Thimbleby, H. 2001. Spatial Hypertext as a Reader Tool in Digital Libraries. **The First ACM+IEEE Joint Conference on Digital Libraries**. Virginia, United States. (24-28).
- Budak, A. I., Sheth, A. and Ramakrishnan, C. 2004. Geospatial ontology development and semantic analytics. **Geographic information science**. Edt.: J. P. Wilson & A. S. Fotheringham, Blackwell Publishing. United States. (1-21).
- Buttenfield, B. P., Gahegan, M., Miller, J. H. and Yuan, M. 2000. Geospatial Data Mining and Knowledge Discovery. **University Consortium for Geographic Information Science Research White Paper**. Washington, United States. (1-21).
- Buttenfield, B. P., Weber, C. R., MacLennan, M. and Elliott, J. D. 1991. Bibliography on Animation of Spatial Data. A Guide to Literature, Video and Movie Media. **Technical paper for National Center for Geographic Information and Analysis**. Department of Geography, State University at Buffalo. Buffalo, United States. (91-22).
- Cámara B. F. 1991. El Noroeste de México: Sus culturas étnicas. **Instituto Nacional de Antropología e Historia**. México. (125-135)

- Cannataro, M and Talia, D. 2003c. Towards the Next-Generation Grid: A Pervasive Environment for Knowledge-Based Computing. **Proceedings 4th IEEE Int. Conf. on Information Technology: Coding and Computing (ITCC2003)**. Las Vegas, United States. (437-441).
- Cannataro, M. and Comito, C. 2003. A Data Mining Ontology for Grid Programming. **1st Int. Workshop on Semantics in Peer-to-Peer and Grid Computing, in conjunction with WWW2003**. Budapest, Hungría. (1-20).
- Chasco, Y. C. 2003. **Econometría Espacial Aplicada a la Predicción-Extrapolación de Datos Microterritoriales**. Tesis Doctoral. Ed. Consejería de Economía e Innovación Tecnológica. Madrid, España. (7-26).
- Chou, Y.-H. 1997. **Exploring Spatial Analysis in Geographic Information Systems**. Ed. Thomson Learning. United States. 474 p.
- Cuauhtémoc L. y Graizbord, B. 2004. Bases para el Ordenamiento Ecológico de la Región del Mar de Cortes (Componente Social y Económico). **Resumen de la Memoria Técnica del Ordenamiento Ecológico del Mar de Cortes**. Baja California, México. (1-40).
- Di, L. 2003. From Geospatial data to Knowledge –The Service Framework, Implementation, and Research Issues. **Working paper Laboratory for Advanced Information Technology and Standards**. George Mason University. Arlington, United States. (1-33).
- Di, L., Chen, A., Yang, W. and Zhao, P. 2003. The Integration of Grid Technology with OGC Web Services (OWS) in NWGISS for NASA EOS Data. **Working paper Laboratory for Advanced Information and Technology Standards LATIS**. Seattle, United States. (24-27).
- Ester, M., Kriegel, H.-P. and Sander, J. 1999. Knowledge Discovery in Spatial Databases. **23rd German Conference on Artificial Intelligence (KI '99)**. Bonn, Germany. (1-14).
- Fashé, O. R., Rojas, J. A. y Eche, C. 2002. Estimación de la cantidad de lluvia utilizando imágenes digitales del satélite geoestacionario GOES-8 sobre Perú en abril del 2002. **X Simposio Latinoamericano de percepción Remota y Sistemas de Información Espacial**. Cochabamba, Bolivia. (1-8).
- Fattorelli, S., Casale, R., Borga, M. and Da Ros, D. 1996. Integrating radar and remote sensing techniques of rainfall estimation in hydrological applications for flood hazard mitigation. The european contribution: perspectives and prospects. **European Community**. Brusselss, Belgium. 77p.
- Friis-Christensen, A., Tryfona, N. and Jensen, C. S. 2001. Requirements and Research Issues in Geographic Data Modeling. **9th ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems**. Atlanta, United States. (1-7).

- Furtado, A. P. L. 2004. **Modelagem Geoestatística Aplicada à Integração entre Dados de Postos Pluviométricos e Radar Meteorológico**. Tese de Mestre em Ciências em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio De Janeiro. Brasil. 132p.
- Gahegan, M. 2001. Data Mining and Knowledge Discovery in the Geographical Domain. **National Academies White Paper. Intersection of Geospatial Information and Information Technology**. Pennsylvania, United States. (1-8).
- Garatuza-Payan. J. e Ibarra, F. P. 1993. Estimación de Precipitación en el Noroeste de México, Usando Imágenes del Satélite GOES. **VI Congreso Internacional de SELPER**. Cartagena, Colombia. (402-420).
- Kaushal, A. 2000. Emerging Information Technologies and Standards in Geomatics. **Conference on Geomatics in Electronic Governance**. Pune, Indian. (1-6).
- Kidder, S. Q. and Vonder-Haar, T. H. 1995. **Satellite Meteorology: An Introduction**. Academic Press. United States. 466p.
- Kuba, P. 2001. **Data Structures for Spatial Data Mining**. Faculty of Informatics Masaryk University. Brno, Czech Republic. (1-24).
- Leedy P. D. 1993. **Practical Research: planning and design**. Macmillan. United States. 355p.
- Levizzani, V. 1999. Convective Rain from a Satellite Perspective: Achievements and Challenges. **SAF Training Workshop-Nowcasting and Very Short Range Forecasting, EUMETSAT**. Madrid. Spain. (75-84).
- Levizzani, V., Amorati, R. and Meneguzzo, F. 2002a. A Review of Satellite-based Rainfall Estimation Methods. **Working Paper Multiple-Sensor Precipitation Measurements, Integration, Calibration and Flood Forecasting, MUSIC**. Bologna, Italy. (1-70).
- Levizzani, V., Rosenfeld, D., Cattani, E., Melani, S., Torricella, F. and João, C. M. 2002b. Multispectral Observations of Cloud Top as a Powerful Tool for Rainfall Estimations. **1st Workshop International Precipitation Working Group**. Madrid, Spain. (1-6).
- Li, Y., Benwell, G., Whigham, P. and Mulgan, N. 2000. An Agent-Oriented Software Engineering Paradigm and the Design of a New Generation of Spatial Information System. **12th Annual Colloquium of the Spatial Information Research Centre University of Otago**. Dunedin, New Zealand. (1-15).
- McGregor, G. R. and Nieuwolt, S. 1998. **Tropical Climatology**. Ed. Jhon Wiley & Sons. United Kingdom. 339 p.

- Miller, H. J. 2001. Geographic Data Mining and Knowledge Discovery. **Handbook of Geographic Information Science**. Ed. Harvey J. Miller and Jiawei Han. United States. 372p.
- Miller, H. J. and Han, J. 1999. Discovering Geographic Knowledge in Data Rich Environments. **Report of a Specialist Meeting Held under the Auspices of the Varenus Project**. Kirkland, United States. (1-63).
- Negri, A. J., Adler, R. F. and Xu, L. 2002b. A TRMM-calibrated infrared technique for global rainfall estimation. **1st Workshop International Precipitation Working Group**. Madrid, Spain. (1-9).
- O'Sullivan, D. y Unwin, D. J. 2003. **Geographic Information Analysis**. Ed. Jhon Wiley & Sons, INC. United States. 436 p.
- Oropeza, R. F. 2001. **Una Parametrización de la Estimación de Lluvia con base en Imágenes de Satélite**. Tesis de Maestro en Ciencias en Física de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 94p.
- Palmeira, F. L. B., Morales, C. A., França, G. B. and Landau, L. 2004. Rainfall Estimation Using Satellite Data for Paraíba do Sul Basin (Brazil). **Geo-Imagery Bridging Continents XXth ISPRS Congress**. Istanbul, Turkey. (1-6).
- Pellegrin, I. F. 1994. **Estimación de precipitación en el Noroeste de México utilizando imágenes de satélite**. Tesis de maestría. Instituto tecnológico de Sonora. 112p.
- Ramapriyan, H. K., McConaughy, G. R., Lynnes, C. S., Harberts R., Roelofs, L., Kempler S. J. and McDonald, K. R. 2002. Intelligent archive concepts for the future. **IDU/AR Workshop 2002**. (1-6).
- Reudenbach, C. and Bendix, J. 2002. Satellite Based Rainfall Retrieval with METEOSAT, GOES and MSG in the Mid-Latitudes and the Tropics. **1st Workshop International Precipitation Working Group**. Madrid, Spain. (1-10).
- Rivera, A. J. J. 2001. **Parámetros de Imagen y Sinópticos en la Predicción de Lluvia**. Tesis de Doctor en Ciencias Físicas. Universitat Politècnica de Catalunya. España. 86p.
- Roddick, J. F. 2002. Research Issues in Knowledge Discovery, Management and Visualization. **Report Innovation Lab**. Australia. Australia. (1-4).
- Roldan Q. J., Calmus T. y Shaaf P. 2000. Evidencias isotópicas de las diversas fuentes para el batolito de Sonora en el noroeste de Sonora. **UNAM Cuarta reunión sobre la geología del noroeste mexicano y áreas adyacentes**. México. (109-110).

- Scofield, R. A. and Kuligowski, R. J. 2002. Status and outlook of operational satellite precipitation algorithms for extreme precipitation events. **16th Conference on Hydrology**. Orlando, United States. (1-9)
- Seliga, T. A., Aron, G., Aydin, K. and White, E. 1991. Storm runoff simulation using radar estimated rainfall rates and a unit hydrograph model (Syn-Hyd) applied to the Greve watershed. **Proceedings 25th Conference on Radar Meteorology**. Paris. 3p.
- Sevruk, B. 1982. Method of correction for systematic error in point precipitation measure for operational use. **WMO Operational Hydrology Report**. 91p.
- Valencia M. M., Vargas N. P. y García R. M. 2000. Geología y geoquímica del Batolito Costero de Sonora. **UNAM Cuarta reunión sobre la geología del noroeste mexicano y áreas adyacentes**. México. (138-139).
- Yao, X. 2003. Research Issues in Spatio-Temporal Data Mining. **White Paper to the University Consortium for Geographic Information Science (USGIS). Workshop on Geospatial Visualization and Knowledge Discovery**. Lansdowne, United States. (1-6).
- Zawadski, I. 1984. Factors affecting the precision of radar measurements of rain. **Preprints 22nd Conference of Radar Meteorology**. Zurich. 5p.

Publicaciones Periódicas

- Adler, R. F. and Mack, R. A. 1984. Thunderstorm Cloud Height-Rainfall Rate Relations for Use with Satellite Rainfall Estimation Techniques. *American Meteorological Society. Journal of Climate and Applied Meteorology*. **23**:280-296.
- Adler, R. F. and Negri, A. J. 1988. A Satellite Infrared Technique to Estimate Tropical Convective and Stratiform Rainfall. *American Meteorological Society. Journal of Applied Meteorology*. **27**:30-51.
- Arkin, P. A. 1979. The relationship between fractional coverage of high cloud and rainfall accumulations during GATE over the B-scale array. *American Meteorological Society. Monthly Weather Review*. **107**:1382-1387.
- Ba, M. B. and Gruber, A. 2001. GOES Multispectral Rainfall Algorithm (GMSRA). *American Meteorological Society. Journal of Applied Meteorology*. **40**:1500-1514.
- Baldwin, M. E. and Lakshmivarahan, S. 2002. Rainfall Classification Using Histogram Analysis: An Example of Data Mining in Meteorology. **Intelligent Engineering Systems Through Artificial Neural Networks**. **12**:429-434.

- Barlow, M., Nigam, S. and Berbery, E. H. 1998. Evolution of the North American Monsoon System. *American Meteorological Society. Journal of Climate.* **11**:2238-2257.
- Barret, E. C. 1970. The estimation of monthly rainfall from satellite data. *American Meteorological Society. Monthly Weather Review.* **98**:322-327.
- Bédard, Y., Gosselin, P., Rivesta, S., Proulx, M., Nadeau, M., Lebel, G. and Gagnon, M. 2003. Integrating GIS Components with Knowledge Discovery Technology for Environmental Health Decision Support. *International Journal of Medical Informatics.* **70**:79-/94.
- Bellerby, T., Todd, M., Kniveton, D. and Kidd, C. 2000. Rainfall Estimation from a Combination of TRMM Precipitation Radar and GOES Multispectral Satellite Imagery through the Use of an Artificial Neural Network. *American Meteorological Society. Journal of Applied Meteorology.* **39**(12):2115-2128.
- Bendix, J. and Bendix, A. 1998. Climatological Aspects of the 1991/93. El Niño in Ecuador. *Bulletin de L'Institut Francaise d'Etudes Andines.* **27**(3):655-666.
- Boken, V. K., Hoogenboom, G., Hook, J. E., Thomas, D. L., Guerra, L. C. and Harrison, K. A. 2004. Agricultural Water Use Estimation Using Geospatial Modeling and a Geographic Information System. *Agricultural Water Management.* **67**(3):185-199.
- Cannataro, M and Talia, D. 2003a. The Knowledge Grid. *Communications of the ACM.* **46**(1):89-93.
- 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.
- Douglas, R., Maddox A., Howard K. and Reyes S. 1993. The Mexican monsoon. *American Meteorological Society. Journal of Climate.* **6**: 1665-1677.
- Fayyad, U., Piatetsky-Shapiro, G. and Smyth, P. 1996. The KDD Process for Extracting Useful Knowledge from Volumes of Data. *Communications of the ACM.* **39**(11):27-34.
- Fayyad, U., Piatetsky-Shapiro, G. and Smyth, P. 1996. From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases. *American Association for Artificial Intelligence.* **1**:37-54.
- Feidas, H. and Cartalis, C. 2005. Application of an automated cloud-tracking algorithm on satellite imagery for tracking and monitoring small mesoscale convective cloud systems. *International Journal of Remote Sensing.* **26**(8):1677-1698.

- Follansbee, W. A. 1973. Estimation of average daily rainfall from satellite cloud photographs. **NOAA Tech. Memo.** NESS 44, Washington, DC. 39pp.
- Fu, Y. and Liu, G. 2003. Precipitation Characteristics in Mid-Latitude East Asia as Observed by TRMM PR and TMI. *Meteorological Society of Japan. Journal of the Meteorological Society of Japan.* **81**(6):1353-1369.
- Gochis, D. J., Jiménez, A., Watts, C. J., Garatuza-Payan, J. and Shuttleworth, W. J. 2004. Analysis of 2002 and 2003 Warm-Season Precipitation from the North American Monsoon Experiment Event Rain Gauge Network. *American Meteorological Society. Monthly Weather Review.* **132**:2938-2953.
- Gochis, D. J., Leal, C. J., Shuttleworth, W. J., Watts, C. J. and Garatuza-Payan, J. 2003. Preliminary Diagnostics from a New Event-Based Precipitation Monitoring System in Support of the North American Monsoon Experiment. *American Meteorological Society. Journal of Hydrometeorology.* **4**:974-981.
- Goldenburg, S.B., Houze Jr., R. A. and Churchill, D. D. 1990. Convective and stratiform components of a winter monsoon cloud cluster determined from geo-synchronous infrared satellite data. *Meteorological Society of Japan. Journal Meteorological Society of Japan.* **68**:37-63.
- Houze Jr., R. A. 1997. Stratiform Precipitation in Regions of Convection: A Meteorological Paradox?. **Bulletin of the American Meteorological Society.** **78**(10):2179-2197.
- Islam, M. N., Islam, A. K. M. S., Hayashi, T., Terao, T. and Uyeda, H. 2002. Application of a Method to Estimate Rainfall in Bangladesh Using GMS-5 Data. **Journal of Natural Disaster Science.** **24**(2):83-89.
- Kilonsky, B. J. and Ramage, C. S. 1976. A technique for estimating tropical open-ocean rainfall from satellite observations. *American Meteorological Society. Journal of Applied Meteorology.* **15**:972-975.
- Krajewski, W. F., Lakshmi, V., Georgakakos, K. P. and Jain, S.C. 1991. A Monte Carlo study of rainfall sampling effect on a distributed catchment model. **Water Resources Research.** **27**:119-128.
- Kuligowski, R. J., Davenport, J. C. and Scofield, R. A. 2005. The Hydro-Estimator technique for high-resolution geostacionary satellite rainfall estimates. *Manuscript in preparation. Weather Forecasting.*
- Leal, J y Watts C. 2003. El monzón mexicano. *IMADES. Entorno.* Vol. 10.
- Legendre, P. 1993. Spatial Autocorrelation: Trouble or new paradigm. **Ecological Society of America.** **74**(6):1659-1673.
- Méndez, S. E. 2000. Ciudades y Arquitecturas del Noroeste Mexicano. **Región y Sociedad.** **12**(20):3-43.

- Michaud, J. D. and Sorooshian, S. 1994. Effect of rainfall-sampling errors on simulations of desert flash floods. ***Water Resource Research***. **39**:2765-2775.
- Negri, A. J. and Adler, R. F. 1993. An Intercomparison of Three Satellite Infrared Rainfall Techniques over Japan and Surrounding Waters. *American Meteorological Society*. ***Journal of Applied Meteorology***. **32**:357-373.
- Negri, A. J., Adler, R. F. and Xu, L. 2002a. A TRMM-Calibrated Infrared Rainfall Algorithm Applied over Brazil. ***Journal of Geophysical Research***. **107**(20):1-15.
- Negri, A. J., Adler, R. F., Maddox, R. A., Howard, K. W. and Keehn, P. R. 1993. A Regional Rainfall Climatology over Mexico and the Southwest United States Derived from Passive Microwave and Geosynchronous Infrared Data. *American Meteorological Society*. ***Journal of Climate***. **6**:2144-2161.
- Petty, G. W. 1995. The Status of Satellite-Based Rainfall Estimation over Land. *Elsevier Science*. ***Remote Sensing Environment***. **51**:125-137.
- Ramírez, H. J. 2004. Conceptos de Probabilidad en Hidrología. Conceptos Básicos. ***Hidrología***. **1**:1-21.
- Ramis, C., Romero, R., Homar, V., Alonso S. and Alarcón M. 1998. Diagnosis and numerical simulation of a torrencial precipitation event in Catalonia (Spain). ***Meteorology and Atmospheric Physics***. **69**: 1-21.
- Reudenbach, C., Heinemann, G., Heue, E., Bendix, J. and Winiger M. 2001. Investigation of Summertime Convective Rainfall in Western Europe Based on a Synergy of Remote Sensing Data and Numerical Models. ***Meteorology and Atmospheric Physics***. **76**:23-41.
- Rosengaus, M. M., Valdez M. A., Velázquez A. J. y García R. F. 1993. Calibración de un modelo de estimación de precipitación acumulada diaria a partir de imágenes infrarrojas GOES. *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*. ***Informe Técnico del Grupo de Huracanes y Fenómenos Hidrometeorológicos Extremos***. Vol. 8
- Scofield, R. A. and Oliver, V. J. 1977. A scheme for estimating convective rainfall from satellite imagery. ***NOAA Tech. Memo***. NESS 86, Washington, DC. 47pp.
- Scofield, R. A. 1987. The NESDIS operational convective precipitation estimation technique. *American Meteorological Society*. ***Monthly Weather Review***. **115**:1773-1792.
- Smith, B. and Mark, D. M. 2001. Geographical Categories: An Ontological Investigation. ***International Journal Geographical Information Science***. **15**(7):591-612.

- Steiner, M. 2004. Comments On “Modeling of Convective–Stratiform Precipitation Processes: Sensitivity to Partitioning Methods”. *American Meteorological Society. Journal of Applied Meteorology*. **43**:958-961.
- Stensrud, D. J., Gall, R. L. and Nordquist, M. K. 1997. Surges over the Gulf of California during the Mexican Monsoon. *American Meteorological Society. Monthly Weather Review*. **125**:417-437.
- Stout, J. E., Martin, D. W. and Sikdar, D.N. 1979. Estimating GATE rainfall with geosynchronous satellite images. *American Meteorological Society. Monthly Weather Review*. **107**:585-598.
- Tsonis, A. A. and Isaac, G. A. 1985. On a new approach for instantaneous rain area delineation in the midlatitudes using GOES data. *American Meteorological Society. Journal of Applied Meteorology*. **24**:1208-1218.
- Vicente, G. A., Scofield, R. A. and Menzel, W. P. 1998. The Operational Infrared Estimation Technique. *Bulletin of the American Meteorological Society*. **79**(9):1883-1898.
- Weaver, J. F. and Lindsey, D. 2004. Some Frequently Overlooked Severe Thunderstorm Characteristics Observed on Goes Imagery: A Topic for Future Research. *American Meteorological Society. Picture of the Month*. **132**:1529-1533.

Fuentes Electrónicas

- Di, L. 2005. Geospatial Semantic Web Research at LAITS. Consultado en: 2005. Disponible en: http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/nga/docs/Di_Position.pdf
- Gahegan, M., Wachowicz, M., Harrower, M. and Rhyne, M. T. 2005. The Integration of Geographic Visualization with Knowledge Discovery in Databases and Geocomputation. *ICA Commission on Visualization: Working Group on Database-Visualization Links*. Consultado en: 2005. Disponible en: <http://www.geovista.psu.edu/sites/icavis/pdf/knowledge0900.pdf>
- GPM, 2005. Global Precipitation Measurement. Consultado en: 2005. Disponible en: <http://gpm.gsfc.nasa.gov>
- INE, 2004. Panorámica del agua en el Noroeste de México. Vínculo y límite de las actividades humanas. Consultado en: 2004. Disponible en: http://www.ine.gob.mx/enautica/download_colmex/cap1-7.pdf
- Kidd, C. 2005. Validation of Satellite Rainfall Estimates over the Mid-Latitudes. Consultado en: 2005. Disponible en: http://www.bom.gov.au/bmrc/SatRainVal/Kidd_Monterey_paper.doc

USGS, 2005. Availability of USGS Geospatial Data. Consultado en: 2005. Disponible en: <http://nationalmap.gov/gio/status.html>