



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

***Propuesta de una metodología para
la integración de datos de precipitación:
Caso de estudio
Cuenca del Usumacinta***

**Para obtener el Grado de
Ingeniero Geomático**

Omar Ortiz Meraz

2011

Director de la Tesis : M.G. Juan Manuel Núñez Hernández

Dedicatoria

A mis padres, Emma y Ramiro quienes me han apoyado desde siempre, a mis profesores Clemencia y Juan Manuel por enseñarme mi oficio. A mis amigos y familiares quienes han creído en mi: Emma, Manuel, Arturo, Alma, Margarita, Carlos, Luis, Martha, Luis Arturo, Beto, Vane, Gera, Marco, Clau, Sofi, Gaby, Luisa, Juan Pablo, Natalia y Esteban. A Mariana, Bárbara, Xavier, Christopher, David, Arturo, Brenda, Bere, Kuri, Mar, Lis, Rafa, Lily, Tanya, Ulises, Pam, los profes: Juan, Jose Samano, Valverde, Vivky, Otavio y Arnulfo; mis compañeros de taekwondo. Mis compañeros del instituto de geografía. Mis profesores del cuam: Pepe, Paco, Viclhis, Nuri, Javier, Paco. Y a todas las personas que me ayudaron a ser quien soy.

Introducción.....	4
Objetivo General	5
Objetivos Particulares.....	5
Hipótesis propuesta por Núñez-Coronel.....	6
Organización del trabajo.....	7
Capitulo 1: El estudio de la precipitación en México.....	9
1.1 Antecedentes	9
1.2 Meteorología y Climatología	10
1.3 La meteorología y su papel en el ciclo de energía global	13
1.4 El agua en la circulación atmosférica	13
1.5 Nubes y precipitación	16
1.5.1 Procesos de precipitación	19
1.5.1.1 Proceso de precipitación en nubes calidas	20
1.5.1.2 Proceso de precipitación en nubes frías.....	21
1.5.2 Lluvia y llovizna	21
1.5.2.1 Lluvia de Convección.....	22
1.5.2.2 Lluvia ciclónica	23
1.5.2.3 Lluvia orográfica.....	23
1.6 Circulación atmosférica en México	24
1.6.1 Precipitación en México y temporada de secas.....	26
1.6.2 Comportamiento de la precipitación en la temporada invernal en México	28
Capitulo 2: Elementos para la integración de datos.....	31
2.1 Definición	31
2.2 Insumos para la integración.....	33
2.2.1 Elementos meteorológicos y climatológicos	33
2.2.3 Medición de precipitación	36
2.2.4 Tipos de Instrumentos para el registro de la lluvia.....	38
2.3 Elementos de la percepción remota	40
2.3.1 Definición de percepción remota.....	40
2.3.2 Datos obtenidos a partir de satélites meteorológicos	42
2.3.3 Satélites polares.....	43

Datos Clave.....	45
2.3.4 Satélites Estacionarios.....	48
2.3.5 TRMM	52
2.3.5.1 Instrumentos y productos del TRMM	55
2.3.5.1.1 Precipitation Radar	55
2.3.5.1.2 TMI	55
2.3.5.1.3 VIRS	56
2.3.5.1.4 CERES	57
2.3.5.1.5 LIS	58
2.3.5.1.6 Productos	58
2.3.5.1.7 3B42.....	59
2.3.5.1.7.1 HighQuality (HQ) microwaveestimates.....	59
2.3.5.1.7.2 Variable Rain Rate (VAR) IR estimates	61
2.3.5.1.7.3 Combinación de estimados HQ y VAR.....	62
2.3.5.1.7.4 Reescalando a la escala mensual	63
Capítulo 3: Métodos de integración de datos	64
3.1 Conceptos básicos de la integración de datos	66
<u>3.2</u>Kriging	67
3.2.1 Kriging ordinario.....	69
3.2.2 CoKriging ordinario.....	73
3.3 Moran.....	74
3.3.1. Desarrollo de Moran.....	76
Capitulo 4: Caso de Estudio: La Cuenca del Usumacinta en México	80
4.1 Zona de estudio	80
4.2 Descripción del Proyecto.....	82
4.3 El papel de la distancia de la precipitación a la costa en la temporada de estiaje	84
4.4 Elaboración de la hipótesis	85
4.5 Hipótesis Propuesta.....	87
4.7 Metodología.....	88
4.7.1 Elaboración de la propuesta de metodología	88

4.7.2	Preparación de los datos de estaciones	90
4.7.3	Preparación para los insumos 3B42	94
4.7.4	Creación del insumo peso/distancia para la línea de costa-rugosidad	95
4.7.5	Integración de datos	95
4.8	Análisis de resultados	97
4.8.1	Varianza explicada	97
4.8.2	Presentación de resultados	99
Capítulo 5: Conclusiones		102
5.1	Sobre la hipótesis de Núñez y Coronel	102
5.2	Sobre la metodología propuesta	104
5.3	Sobre los resultados obtenidos en este ejercicio	106

Introducción

El presente trabajo retoma la hipótesis “Calibración de datos de la plataforma TRMM empleando regresión espacial en México” propuesta por Coronel & Núñez en 2007 con la finalidad de realizar un estudio de precipitación que explicita la componente espacial del fenómeno, la cual es frecuentemente ignorada en muchos de los tratados sobre el tema.

En esta oportunidad se ha planteado desarrollar una hipótesis para la temporada de secas e implementar una instrumentación que permita hacer uso de la dicha hipótesis para obtener los productos de precipitación que incluyan la componente espacial, cuidando siempre que esta propuesta constituya un sistema eficiente en tiempo y en uso de recursos de cómputo; así mismo la instrumentación hará

posible una modelación acorde a los patrones meteorológicos que se presentan en México.

Objetivo General

Proponer un método que genere información sobre la precipitación en México y que describa los procesos que ocurren entre las escalas meteorológica y climatológica durante la temporada de secas.

Objetivos Particulares

Revisar los componentes que integran la hipótesis “Calibración de datos de la plataforma TRMM empleando regresión espacial en México” propuesta por Coronel & Núñez en 2007.

Identificar qué elementos son factibles de incorporar a la hipótesis “Calibración de datos de la plataforma TRMM empleando regresión espacial en México” propuesta por Coronel & Núñez en 2007 con la finalidad de adecuarla a la temporada de secas.

Construir una hipótesis para la integración de datos de precipitación en temporada de secas en la Cuenca del Usumacinta, basada en los dos objetivos anteriores.

Diseñar una instrumentación que permita realizar de forma automática la aplicación de dicha hipótesis durante varios periodos de tiempo.

Ejecutar la instrumentación sobre datos relativos a la primera temporada de lluvias –Enero, Febrero y Marzo– del año 2004 en la Cuenca del Usumacinta.

Determinar el grado de efectividad de la propuesta metodológica para la integración de datos de precipitación en temporada de secas en la Cuenca del Usumacinta.

Hipótesis propuesta por Núñez-Coronel

“Núñez y Coronel realizaron una evaluación de diferentes fuentes de datos disponibles en México sobre la precipitación. Entre estos recursos, destacan los productos 3B42 del programa Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) que ofrecen estimaciones trihorarias de precipitación en un formato adecuado y medianamente accesible. La principal aportación sobre la evaluación de las bases de datos del programa TRMM es que las estimaciones del producto 3B42 capturan adecuadamente la estructura espacial y temporal de la precipitación, al compararse con promedios areales de acumulados de 8 días a nivel de unidades hidrológicas, los cuales fueron interpolados a partir de datos de estaciones meteorológicas para el verano de 2002, en México. No obstante, existen

deficiencias en cuanto a la intensidad estimada en los productos de TRMM. Estos hallazgos sugieren que puede ajustarse la intensidad de precipitación de los productos 3B42 mediante la calibración con datos de estaciones meteorológicas y variables auxiliares.” – Coronel & Núñez, 2007

Organización del trabajo

En el primer capítulo de este trabajo se explica a grandes rasgos el fenómeno de la precipitación, sus procesos de formación y una vista general del fenómeno a nivel global desde una perspectiva de la meteorología. Posteriormente se abordan las características climáticas y meteorológicas de México, los patrones locales de varias regiones y la variabilidad temporal que se ha registrado desde la implementación de un sistema de estaciones meteorológicas y climatológicas a nivel nacional, principalmente en la época de secas.

El segundo capítulo define el concepto de integración de datos, y se enlistan y explican los insumos que se utilizan en la hipótesis propuesta, como son las estaciones meteorológicas y climatológicas, sus instrumentos y la forma en que operan; seguido de una explicación de los esfuerzos internacionales a partir del análisis espacial para recolectar datos desde plataformas en órbita acerca de temas de climatología, meteorología, ciclos como el del agua y el carbón. También se

aborda específicamente la misión de Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), operada por la National Aeronautics and Space Administration (NASA), en lo referente a los satélites afines al tema tratado en este trabajo.

En el tercer capítulo se desarrollan los métodos para la integración de datos. Aquí se describen desde conceptos básicos como la dependencia espacial, hasta los métodos avanzados que se utilizarán para la propuesta metodológica, como el índice de Moran y el método de interpolación utilizado —Kriging. Este último, cabe mencionar, comprende una estructura espacial, cualidad indispensable para el enfoque del presente trabajo.

El capítulo cuarto aborda el caso de estudio sobre la Cuenca del Usumacinta, donde se expone el marco teórico y se desarrolla la forma en la que se desarrolló la propuesta para la metodología. Además se expone un diagrama de flujo de la propuesta, seguido de los resultados obtenidos en el ejercicio y una descripción de estos. Finalmente, en el capítulo quinto se enlistan las conclusiones obtenidas a lo largo del desarrollo de este trabajo, relativas a la hipótesis propuesta, a la metodología propuesta y a los resultados obtenidos.

Capítulo I

El estudio de la precipitación en México

1.1 Antecedentes

Al enfriarse el vapor de agua contenido en la atmosfera comienza el proceso de cambio de estado, de gaseoso a líquido y en ciertas ocasiones a sólido. Este proceso en el cual el vapor se convierte en agua se denomina condensación y para que éste se dé deben de cumplirse al menos uno de dos factores: enfriamiento y disminución de volumen.

El primero es el que tiene más causas, entre ellas están la acción directa, la irradiación, la mezcla y la expansión adiabática. Por acción directa se define el momento en que la superficie del suelo y elementos cercanos a la nube pierden calor por estar cubiertos por la misma. Entonces la parte inferior de ésta se enfría junto a los elementos a su alrededor.

La condensación por irradiación se presenta en las capas bajas de aire, cuando éstas se detienen y el cielo está despejado. Por otra parte, se le denomina mezcla al fenómeno típico de una clase especial de niebla, cuando varias masas de aire con

diferente temperatura y humedad interactúan y se condensa el vapor de agua alojado en las mismas. Por último, cuando el gas se expande sin recibir calor del exterior se considera que al elevarse se expande de forma adiabática. (Seller&Robinson,1986)

1.2 Meteorología y Climatología

Si bien los conceptos clima, tiempo o, de forma más específica, intemperie, y climatología, son afines existe una gran diferencia entre ellos. Comenzamos por explicar el concepto de clima. La raíz de la palabra es griega y significa inclinación, referida a la de los rayos solares; se trataba de explicar su efecto sobre la tierra mediante una designación de franjas o anillos terrestres delimitados a partir del ecuador por paralelos.

Pero no fue hasta avanzado ya el siglo XIX que se creó una mejor definición para este concepto, el austríaco Van Hann (1839-1921) formula una célebre definición de clima, *“entendiendo por tal el conjunto de fenómenos que caracterizan el estado medio de la atmósfera en un punto de la superficie terrestre”*; en ese momento se entiende que la identificación del clima se logra a través de largas series de observaciones suficientemente amplias de sus elementos.

En contraste con la acepción de clima, la de tiempo sugiere, en primera aproximación, una idea de fugacidad. Así, pues, se habla de tiempo para referirse al ambiente que depara a un lugar el conjunto de condiciones atmosféricas durante un período generalmente corto, que puede durar veinticuatro horas,

aproximadamente, sin perjuicio, en todo caso, de ciertas persistencias o frecuencias estacionales decisivas para caracterizaciones y clasificaciones.

Actualmente no existe una definición unánimemente compartida de climatología a nivel mundial, la más sencilla es “la ciencia de los climas, que los investiga en su doble vertiente básica y aplicada”.

Cabe destacar que dentro de la climatología existen dos subdivisiones principales: analítica y sintética, ambas engloban un buen número de clasificaciones de acuerdo la definición de clima realizada en su momento por Hann en su “*Handboekder Klimatologie*”: conjunto de fenómenos meteorológicos que caracterizan el estado medio de la atmósfera en un punto cualquiera de la Tierra, mantenida por de Martonne y actualizada por algunos autores contemporáneos.

En lo que se refiere al concepto del tiempo, éste no es una abstracción sino auténtica realidad, resultante de los efectos del conjunto interactivo e interdependiente de elementos climáticos. Es necesario realizar la identificación y catalogación de los tipos de tiempo para, por medio del estudio de su ritmo y frecuencia, definir el clima.

Pero el estudio del tiempo es deber de la meteorología; el vocablo meteoro es de origen griego y significa, literalmente, alto o elevado en el aire. Conviene advertir que, actualmente, dicho término se define como el estudio de los fenómenos que se producen en el ámbito durante un lapso de tiempo muy corto.

A pesar de ser estrechamente solidarias e inseparables, la meteorología y la climatología no dejan de ser disciplinas distintas. Sin embargo, ya en una primera aproximación aparecen rasgos diferenciadores: los cultivadores de la meteorología han sido y son físicos; los de la climatología son geógrafos. Existen, asimismo, diferencias de objeto, perspectiva y finalidad. El objeto de estudio de la meteorología es el tiempo, mientras lo que preocupa a la geografía es conocer el ritmo o la sucesión habitual de esos estados de la atmósfera. El meteorólogo suele trabajar con datos al día, y busca hacerlo en tiempo real, aunque ello no excluya complejos programas informáticos encaminados a mejorar la previsión de fenómenos; en cambio, el climatólogo maneja series muy amplias de datos — provenientes de la meteorología — no menores de una treintena de años.

Sin embargo, hasta hace poco tiempo la componente espacial no era considerada como elemento determinante para el análisis de los fenómenos atmosféricos. La propuesta que se trabaja en este proyecto trata de integrar datos desde el punto de vista espacial, a un modelo de ajuste de tipo meteorológico para complementar de forma integral las observaciones realizadas mediante plataformas espaciales.

Para describir en forma completa lo que ocurre con la lluvia en una región geográfica es necesario contar con información sobre tres características fundamentales: intensidad, duración y distribución espacial; elementos que se pueden obtener de forma constante y con un patrón de análisis estándar mediante misiones de observación de la Tierra desde el espacio.

1.3 La meteorología y su papel en el ciclo de energía global

El papel de la meteorología, específicamente en cuanto al estudio de la precipitación, tiene un gran aporte dentro del análisis del ciclo de la energía a nivel mundial, ya que permite desarrollar conocimiento sobre cómo y dónde se ubican los procesos de intercambio de energía dentro de los movimientos atmosféricos y del ciclo del agua, así como los efectos en los diferentes sistemas climáticos en el mundo.

Una de las funciones que tiene el agua como componente del ciclo de energía del planeta es desempeñarse como agente regulador de la temperatura, merced a la presencia de este líquido y a su interacción con los diferentes medios, en los cuales se han desarrollado innumerables ecosistemas que sostienen la vida en el planeta.

Mediante la integración del análisis espacial en el ejercicio de medición y caracterización de la lluvia es posible aportar resultados más puntuales que ayuden a mejorar diversos aspectos de las industrias que dependen de este fenómeno y a apoyar los esfuerzos por comprender y proteger las zonas naturales y las especies que las habitan.

1.4 El agua en la circulación atmosférica

Para el estudio de ésta ha sido necesario segmentar nuestro planeta, ya que resulta más sencillo trabajar por secciones o áreas para el estudio de la precipitación. Una de las formas en las que podemos dividir la superficie de la tierra es de acuerdo con su temperatura, debido a la gran influencia que ejerce sobre muchos elementos, incluida el agua. Al poner en práctica dicho seccionamiento se generan

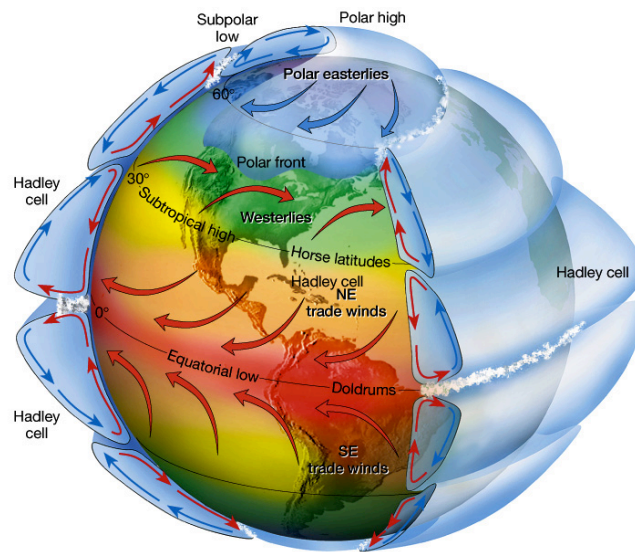
zonas polares, templadas y tropicales, cada una con sus respectivos fenómenos atmosféricos característicos. Estas variaciones climáticas obedecen a la radiación proveniente del sol, que se ve afectada por la inclinación del eje terrestre y del movimiento de traslación que da origen a las estaciones del año. (Olivier&Hidore, 2002)

Otro factor muy importante es el hecho de que los océanos cubren la mayor parte de la superficie del planeta, sobretodo en las zonas cercanas a los trópicos. Hay que recordar que no sólo podemos encontrar agua en su forma líquida, también existe en forma de vapor circulando por el aire, distribuida a lo largo de toda la atmósfera. Mediante la interacción de sendas formas se producen muy variados fenómenos como precipitaciones, huracanes, sequías, entre otros.

La circulación del vapor de agua en la atmósfera a través del viento añade una componente de distribución espacial un tanto aleatoria. Con el modelo de vientos medios planetarios, también conocido como Circulación General de la Atmósfera, se representa el promedio de vientos observados en un largo periodo de tiempo y se establecen los movimientos de la atmósfera a mayor escala. La actual circulación en cualquier momento puede diferir significativamente del modelo promedio(Balling&Cerveny 2005) lo que hace necesaria la creación de modelos o sistemas que permitan caracterizar dichas variaciones.

Una forma de esquematizar esto es mediante el modelo tricelular de Carl G. Rossby postulado en 1947 (Gil &Olcina, 1999)que muestra cómo se distribuyen los movimientos de las masas de aire en la atmosfera. Rossby propone que cada

hemisferio está dividido en tres celdas: la primera, llamada de Hadley, abarca las zonas tropicales y subtropicales; la segunda, de nombre Ferrel, cubre la parte de latitudes medias del planeta; y la última, denominada Polar, que comprende las latitudes extremas.



Sistema de Celdas de Hadley¹ Fig.1

Y dentro de estas celdas se presentan interacciones internas, como son los vientos que interactúan del centro a un extremo de una celda, que pueden ser de circulación superficial (Alisios, del Este o Polares); o vientos de altura (del Oeste, corrientes de chorro, etcétera) (Oliver y Hidore 2002).

¹ <http://www.geology.um.maine.edu/ges121/lectures/20-monsoons/hadley.jpg>

En cada hemisferio se encuentran dos zonas de alta presión y un cinturón de baja presión. A su vez, en el círculo ecuatorial, se sitúa un cinturón de baja presión. Es importante considerar que todos los elementos se desplazan de acuerdo con la temporada del año de que se trate. Lo cual se ve inmediatamente reflejado en los fenómenos asociados a esto, incluyendo la precipitación, la cual puede variar en sus patrones temporales y espaciales.

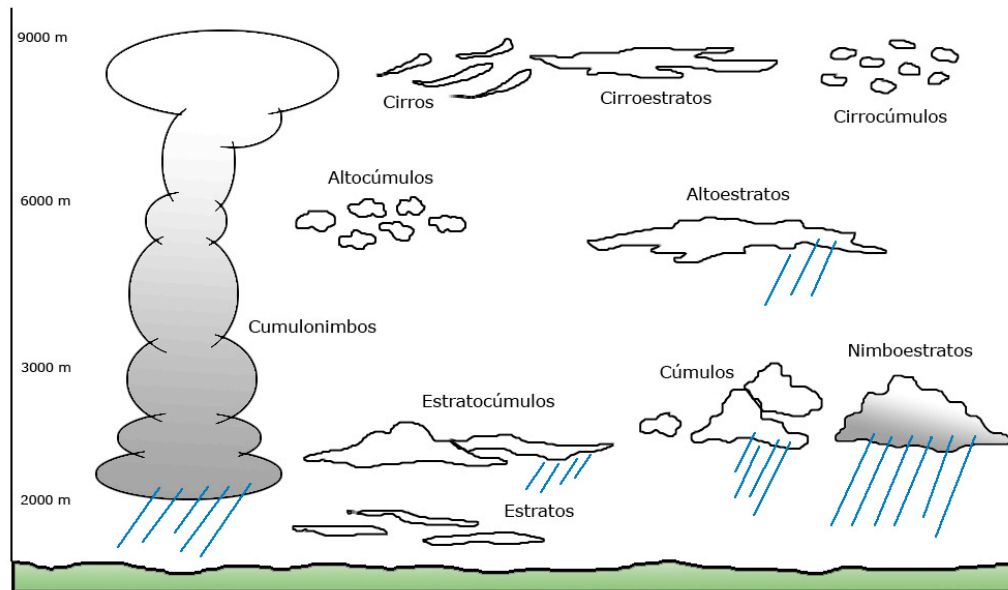
Dentro de la circulación atmosférica destaca la presencia de la precipitación como resultado de la condensación del vapor de agua albergado en la atmosfera. Del mismo dependen en gran medida todas las formas de vida. En el caso particular del hombre, de la lluvia dependen los cultivos, la distribución de la población y de la industria, y un sin fin de componentes que forman parte de la existencia de la raza humana.

1.5 Nubes y precipitación

Para que se desencadene la precipitación es necesario que existan nubes en las cuales se realizan los procesos de condensación y sublimación; ambos son determinados por las características físicas de las nubes, cuya clasificación es la siguiente (Gil&Olcina,1999):

1. **Cirrus** – de tipo fibroso, deshilachadas, filamentosas, intensamente blancas y sin sombras.
2. **Stratus** – que van en forma de capa o estrato continuo sin forma especial.
3. **Cumulus** - de forma apilotada o globular, con cimas recortadas y redondeadas y sombra propia.

4. **Nimbuz** – oscuras y amorfas, que precipitan.



Principales tipos de nubes.² Fig. 2

Y al combinar estas clasificaciones podemos generar diez combinaciones que son las internacionalmente admitidas.

Los rasgos más destacados de los diez géneros nubosos son los siguientes.

- Cirrus: nubes tenues con aspecto fibroso o filamentoso. Durante el día de color blanco sin sombras y en el atardecer toman colores amarillentos o rojizos. Por la noche se tornan grises.
- Cirrostratus: En forma de velo o manto, cubren total o parcialmente todo el cielo sin ocultar el sol o la luna.

² <http://ventanaabiertyblog.files.wordpress.com/2010/06/tipos-de-nubes2.jpg>

- Cirrocumulus: En manto o velo continuo y blanquecino, sin sombras propias. Se conocen como cielos aborregados.
- Altostratus: En manto o velo de color gris o en tonalidades que van del blanco al azul. De tipo fibroso o uniforme.
- Alto cumulus: En forma de banco o manto, de color blanco o gris, con sombras propias y en disposición regular.
- Nimbostratus: Es una capa gris nubosa, normalmente sombría. Suficientemente espesa para ocultar el sol. De aspecto borroso a causa de lluvia o nieve.
- Stratocumulus: Es un manto uniforme de nubes grises o blanquecinas, a veces con partes oscuras. Tienen forma de losas o rodillos, rara vez son fibrosas.
- Stratus: Capa nubosa de color gris, con base uniforme. Puede dar lugar a lloviznas prismas de hielo o nieve.
- Cumulus: Nube separada normalmente densa y contornos bien delimitados, que se desarrollan verticalmente. Las partes que son iluminadas por el sol poseen un blanco brillante. La base es oscura y horizontal.
- Cumulusnimbus: Muy densa y de gran dimensión vertical. Generalmente la parte superior es lisa y fibrosa. Por debajo es sombría y normalmente es acompañada de precipitaciones muy aparatosas pero de corta duración. En los trópicos alcanzan hasta los 20km de altura.

También es posible clasificarlas nubes tomando en cuenta la altura a la que se ubican: altas, medias, bajas y de desarrollo vertical. Mediante este argumento es como los sistemas de análisis meteorológico colocados en órbita realizan sus estimaciones. Debido a que usualmente la altura está ligada a la temperatura, la lectura de ésta permite deducir el tipo de nube y la cantidad de precipitación. Las excepciones son generadoras de ruido e incertidumbre, normalmente inducen estimaciones por debajo de los valores reales.

1.5.1 Procesos de precipitación

Graham Summer (1988), señala que sólo una pequeña parte de las nubes produce lluvia y de ésta una proporción considerable nunca toca el suelo, ya son pocas las gotas o cristales de lluvia sobreviven el viaje hacia la superficie terráquea. Entre las dificultades que debe sortear la lluvia en ese trayecto se pueden encontrar los vientos que corren por dentro de la misma nube, por ejemplo, en el caso de las nubes de convección (ej. cúmulos, nimbus y cumulusnimbus) se experimentan vientos ascendentes por la interacción con los frentes fríos de aire.

Las gotas y cristales que sí logran efectuar la travesía a la tierra lo hacen mediante el incremento de su propio volumen originado por mecanismos que se desarrollan al interior de las nubes.

Es posible resumir en dos procesos la forma en la que las gotas de lluvia adquieren el tamaño necesario para precipitar (coalición). El primero se describe de la siguiente manera: dos gotas de tamaño similar caen a una misma velocidad describiendo una trayectoria paralela. Al viajar de esta forma ambas gotas crean

un vacío entre ellas por una reducción en la presión del aire entre ambos cuerpos. Esto hace que al cabo de suficiente distancia recorrida las gotas terminen por unirse.

El segundo proceso consiste en que, debido a los movimientos del aire dentro de la nube, misma que tiene diferentes zonas, cada una con sus propias condiciones particulares (velocidad de viento, temperatura, presión barométrica etc.), las gotas de lluvia incrementan su carga estática por lo que se ven atraídas entre sí. Cabe mencionar que la presencia de un proceso no indica la ausencia del otro.

1.5.1.1 Proceso de precipitación en nubes cálidas

A pesar de su nombre las nubes cálidas precipitantes se encuentran por debajo de la isoterma de los 0°C, situación que hace que sólo tengan gotas en una fase estable. Normalmente estas nubes se localizan a una altitud media y están limitadas en su extensión vertical (ej. nubes de tipo stratus o nimbostratus). Generalmente, al encontrarse en zonas tropicales, las nubes cálidas pueden tener una altitud mayor, situación que va ligada al incremento en la cantidad de lluvia precipitada. Esto debido a que el fondo de la nube se mantiene a la misma altura a pesar de que su techo se encuentre a mayor altitud.

Al momento en que la nube cálida baja su temperatura a 0°C y se vuelve una nube cálida precipitante, las gotas internas de ésta se superenfían³ lo cual favorece los procesos de coalescencia descritos anteriormente. Durante estos procesos es común

³ Permanencia de un cuerpo en estado líquido a temperatura inferior a la de solidificación.

que las gotas en la nube choquen entre sí, lo que puede o no producir gotas más grandes.

1.5.1.2 Proceso de precipitación en nubes frías

Para que se considere una nube precipitante fría su temperatura debe de estar entre los 0°C y los -40°C. Estas nubes contienen un sistema con presencia de agua en estados sólido y superenfriado, lo cual provoca colisiones del líquido en ambos estados.

La forma de los cristales está determinada por la temperatura a la que ocurre el proceso de su formación, por ejemplo, los cristales con forma de prisma generalmente se construyen entre 0°C y -4°C; mientras que las placas hexagonales se forman entre -4°C y -10°C; las formas más complicadas se generan entre los -10°C y -20°C.

1.5.2 Lluvia y llovizna

La precipitación puede venir en muchas formas, desde cristales sólidos de hielo hasta en lluvias con gotas súper finas –llovizna. A continuación se anotan las diferencias entre las gotas de lluvia y las de llovizna.

La lluvia como tal es la forma de precipitación más común en gran parte del mundo y se puede producir por nubes de tipo convectivo de altitud media con techos bajos, (nubes de tipo altostratos), hasta por nubes de desarrollo vertical (nubes de tipo cumulusnimbus) que precipitan “regaderazos” de lluvia. En latitudes cálidas el proceso de construcción de gotas de lluvia precipitantes es la coalición. Sin

embargo, existen otros procesos menos frecuentes como la acreción y la agregación, cada uno da como resultado diferentes tamaños de gota. (Mason & Andrews 1960)

Aunque para la generalidad de las personas no existe una diferencia notable entre las gotas de lluvia y las de llovizna, la diferencia es bastante obvia y detectable a simple vista. Las gotas de llovizna tienen un diámetro menor a los 0.5 mm, y las gotas de lluvia lo tienen mayor a esta medida. Normalmente la llovizna se presenta en nubes con poco volumen, de baja altura, en regiones razonablemente frías del mundo; la mayoría corresponde nubes calidas precipitantes (que se encuentran a 0°C).

1.5.2.1 Lluvia de Convección

Este tipo de lluvia se produce por un ascenso rápido de aire caliente al encontrar una masa de aire frío que lo obliga a este movimiento. Siempre está asociada a nubes de tipo cumulus o cumulusnimbus. En general este tipo de lluvia se caracteriza por operar en áreas relativamente pequeñas, frecuentemente de decenas de kilómetros cuadrados, con posibilidad de llegar a los pocos cientos.

Estos fenómenos normalmente son parte de tormentas eléctricas o de tormentas de mucha intensidad –también llamadas regaderazos. Comúnmente se les mide en mesoescalas, donde varias precipitaciones de convección, que ocurren al mismo tiempo, pueden formar parte de ciclones tropicales.

Comunmente las lluvias de convección son de duración muy corta, con periodos de vida entre media y doce horas. Esto debido a que los fenómenos normalmente son de carácter *in situ*.

1.5.2.2 Lluvia ciclónica

Este tipo de lluvia se produce principalmente como efecto secundario a la circulación atmosférica durante un sistema ciclónico, produciendo grandes cantidades de lluvia en áreas igualmente grandes –de varias decenas de kilómetros. La principal característica de estos sistemas es la considerable convergencia horizontal que toma lugar en la troposfera. En la parte temporal estos eventos son normalmente medidos en escala de horas y su intensidad generalmente tiende a ser poco intermitente y homogénea, aunque existe la posibilidad de chubascos ocasionales.

1.5.2.3 Lluvia orográfica

Como su nombre lo indica, este tipo de lluvia tiene su origen por la interacción de las nubes con la orografía de la zona. Generalmente esta interacción ocurre con una barrera topográfica de gran tamaño, por lo que la lluvia tiene una componente espacial muy limitada. Este proceso incluye forzar el aire contra una barrera que desata los procesos de condensación y los generadores de gotas de lluvia precipitantes.

Otra manera en la que se puede dar esta lluvia es mediante el encuentro de una masa de aire contra una barrera de viento. La intensidad de este tipo de fenómeno tiende a variar mucho de acuerdo con las condiciones locales. Por ejemplo, una cordillera de buen tamaño producirá cantidades considerables de lluvia.

1.6 Circulación atmosférica en México

Como es sabido, México ocupa una porción de las zonas tropicales y subtropicales del hemisferio norte. La parte sur del territorio nacional recibe la presencia de los vientos alisios debido a que corresponde a la zona tropical; en tanto que la porción norte se localiza dentro de la faja subtropical de alta presión⁴. Frecuentemente, en septiembre se presentan ciclones tropicales originados en el mar de Las Antillas y en el océano Pacífico. Éstos ocasionan diferentes afectaciones en el país ya que muchas de sus trayectorias corren paralelas a las costas o se internan en el continente (Hernández et al 2002).

En la parte fría del año es notoria la afluencia de vientos del oeste a lo largo de todo el territorio nacional, aunque éstos comúnmente se ven frenados por la naturaleza montañosa del terreno. También en esta época se aprecia la entrada de

⁴ Sección de la atmósfera correspondiente a las zonas tropicales donde hay presencia constante de altas presiones por parte de la atmósfera

sur se presentan los Vientos Alisios⁸ y los Vientos del Oeste⁹. En Verano la ZIC se desplaza hacia el norte, por lo que dominan los vientos del este o sureste provenientes del océano Atlántico.

Otro factor relevante es la presencia de los ciclones y tormentas tropicales generados en los océanos Atlántico y Pacífico, junto con las depresiones ciclónicas que atraviesan la parte norte del país.

1.6.1 Precipitación en México y temporada de secas

Las zonas más lluviosas se encuentran al sur del paralelo 22°N y comprenden las pendientes montañosas de las porciones centrales y sur del Golfo de México; aquí es posible encontrar mediciones superiores a los 1,500 mm, merced a su exposición directa a los vientos húmedos del mar, asociados a los vientos alisios, los nortes y los ciclones tropicales (Hernández et al 2007).

Durante el verano se observa un movimiento anticiclónico con dirección hacia el norte. La cantidad de lluvia aumenta proporcionalmente con las perturbaciones ciclónicas originadas en el mar de Las Antillas. Éstas son más comunes hacia el final del verano e inicio del otoño. Como resultado se tiene un aumento de precipitación en los meses de septiembre y octubre. Al llegar la mitad fría del año se aprecia una disminución en la intensidad de lluvia.

⁸ Vientos que soplan hacia el ecuador y con dirección opuesta a la rotación.

⁹ Vientos provenientes de los círculos polares con dirección oeste.

En general, se puede decir que a lo largo del año la precipitación es mucho mayor en la parte del Golfo de México que en la del océano Pacífico; en tanto que en la costa del Golfo es fácil encontrar sitios donde se registren más de 2,000 mm, en el Pacífico es difícil encontrar lugares específicos en los cuales se llegue a esta marca.

Hay, sin embargo, zonas de la sierra de Chiapas donde la precipitación llega a ser mayor a 3,500 mm a pesar de que tiene un relieve muy elevado y que las lluvias reciben la influencia de los ciclones tropicales, tanto del Pacífico como del Golfo de México. En este caso, la máxima precipitación también se presenta en septiembre.

Las cuencas interiores reciben menos de 1,000 mm de lluvia anual. Entre éstas se cuentan la depresión de Chiapas, la cuenca del río Balsas y las cuencas de los ríos Verde (San Luis Potosí), Mixteco (Oaxaca-Puebla), Tlapaneco (Guerrero), Tehuantepec (Oaxaca) y Papaloapan (Veracruz), (García, 1979).

La parte sur de la altiplanicie mexicana recibe de 600 a 1,000 mm de lluvia anual. En su mayoría se trata de precipitaciones de convección y orográficas. Su nivel máximo se alcanza hacia el mes de julio, en pleno verano. Durante la parte fría del año se llegan a presentar nevadas en las zonas más elevadas.

A principios de otoño, durante el mes de septiembre, tanto en el Golfo como en el Pacífico, la precipitación aumenta por la aparición de los ciclones tropicales en ambas zonas. Esto da como resultado que en el eje *neo-volcánico* se presenten lluvias entre 1,200 y 1,500 mm. La parte norte de la altiplanicie es una zona de escasa precipitación. Su aridez obedece a su posición en la franja subtropical. Aquí se reciben menos de 300 mm al año. El rasgo orográfico más importante de esta

zona es la meseta llamada altiplanicie mexicana, su altura es superior a los 1,500 m y abarca buena parte del territorio nacional. Está limitada al oeste por la Sierra Madre Occidental, que se extiende desde el paralelo 20ºN hasta la frontera norte; al sur, por el eje *neo-volcánico* (zona metropolitana de la Ciudad de México); al este por la Sierra Madre Oriental. Y en las partes más elevadas de las montañas del centro, oeste y sur del país la precipitación es mayor a 1,000 mm anuales durante el verano.

Al sureste de la República Mexicana se encuentra el Istmo de Tehuantepec. Se extiende a través de los estados de Oaxaca, Chiapas, Tabasco y Veracruz, hasta la península de Yucatán. Los puntos más elevados de esta región no superan los 300 m de altura, aquí la precipitación fluctúa entre 500 y 1,500 mm (Sánchez 1929).

La península de Baja California es otra zona con poca precipitación. En ella se registra menos de 300 mm al año, exceptuando los territorios más altos de su sierra que reciben entre 400 y 600 mm durante el mismo lapso. Destaca el hecho de que es la única región de México que tiene su nivel máximo de lluvias durante el invierno.

1.6.2 Comportamiento de la precipitación en la temporada invernal en México

De acuerdo con la clasificación de *García (1979)* hay tres regímenes de lluvia:

Régimen de lluvias de verano. El nivel de lluvias es, por lo menos, diez veces mayor que el mes más seco y, naturalmente, el mes con más precipitación se encuentra en la mitad cálida del año.

Régimen de lluvias de invierno. El mes más lluvioso se encuentra en la mitad fría del año y se registran cantidades de precipitación, por lo menos, tres veces más intensa que durante el mes más seco.

Régimen de lluvias intermedio. Corresponde a la media entre los anteriores, con la variante lluviosa todo el año.

La mayoría del territorio mexicano presenta regímenes de lluvias de verano e intermedio, salvo en la parte norte de la península de Baja California, que se caracteriza por un claro régimen de lluvias de invierno.

En este sentido, destacan los estudios realizados por la Maestra Enriqueta García. En su publicación “Distribución de la precipitación en la República Mexicana” la Mtra. García (1979) hace notar que el porcentaje de lluvia invernal –precipitación en época de estiaje –puede ser muy variable. De acuerdo con dicho estudio la mayoría de las estaciones climatológicas del territorio nacional presentan variaciones que fluctúan entre 0 y 10% de la precipitación anual durante la época invernal.

Un número mucho más reducido de estaciones registra márgenes entre 10 y 18% de lluvia invernal; y sólo una cantidad de estaciones poco considerable muestra porcentajes mayores de 18%. Estos dos grupos generalmente entran en el régimen

de lluvia invernal. Aquellos lugares del segundo grupo que no corresponden al régimen de lluvia invernal, normalmente tienen estos registros debido a la presencia de “nortes”. Las estaciones situadas en la península de Baja California, al norte del paralelo 26°N, llegan a presentar porcentajes de lluvia invernal superiores a 36%. El estudio de estos comportamientos es tarea principal de dos ciencias, la climatología y la meteorología.

Capítulo 2

Elementos para la integración de datos

2.1 Definición

Es posible definir este concepto como la combinación de información—datos—proveniente de diferentes orígenes con la capacidad de proveer un resultado unificado. (Lenzerini, 2002). Esta práctica se ha vuelto cada vez más común conforme avanza el desarrollo científico.

Con la finalidad de producir información más rica en contenido y calidad se recurre a la integración de fuentes de datos. Con esto se logran solventar las carencias que se pudieran encontrar en una sola fuente. La forma en que las diferentes fuentes de datos se integran varía según la necesidad específica, pero el principio general es el mismo.

Se toman las fuentes de datos y mediante el análisis, espacial o categórico, se produce un nuevo producto que incluye información de los insumos originales. Ya de forma más específica, la forma cómo se integra la información puede clasificarse de las siguientes maneras(Zielger&Dittrich, 2004):

Integración manual: El usuario realiza el proceso de forma manual mediante diferentes tipos de interfaces.

Interacción de igual a igual: La integración es realizada mediante un identificador común en ambas bases de datos.

- Interfaz común para el Usuario: Se trata de homogenizar las fuentes de datos para la integración.
- Integración por aplicación: El proceso se realiza mediante paquetería de forma automática.
- Integración mediante middleware: Se realiza mediante varias aplicaciones, incluyendo bases de datos.
- Integración por datos de acceso uniforme: Se utiliza una prueba lógica para realizar el proceso sobre un mismo nivel de acceso.

Para este trabajo se optó por utilizar la integración manual, en ésta los usuarios interactúan directamente con las fuentes de información y seleccionan la información relevante para después integrarla. Es necesario que los usuarios tengan conocimiento de diferentes tipos de interfaces, lenguajes de cómputo para realizar selecciones y lenguajes de programación. Se recomienda también que se

tengan conocimientos de lógica, localización, representación de datos y semántica de datos.

Otra forma utilizada en este proyecto fue conexiones de igual a igual, este tipo de integración es de carácter descentralizado, ya que en forma autónoma los nodos correspondientes buscan sus pares. Éstos pueden ser información categórica, o espacial o ambas. En este trabajo estos son los dos principales métodos utilizados para la integración, aunque existen muchos más.

2.2 Insumos para la integración

2.2.1 Elementos meteorológicos y climatológicos

Se considera una estación meteorológica a cualquier instalación con la instrumentación necesaria para recabar información meteorológica y climatológica que represente los fenómenos ocurridos en la atmósfera.

La estación meteorológica para funcionar siempre debe encontrarse a la intemperie en las zonas donde se requiera conocer los patrones de los fenómenos ocurridos en la atmósfera, con la posibilidad de localizarse en tierra firme o sobre una plataforma aérea o marina.

Lo anterior va ligado a la finalidad de la estación, los tipos más comunes que podemos encontrar son: convencionales, automatizadas, observatorios astronómicos y boyas, principalmente. Cada una con características que le permiten ofrecer datos acordes a su fin.

Los datos se registran en diferentes intervalos de tiempo, que son determinados por el tipo de estación y su localización. Comúnmente los datos que se recopilan corresponden a temperatura, presión atmosférica, dirección y velocidad del viento, evaporación y precipitación. A continuación se describen con detalle estos elementos.

La temperatura es una propiedad física de los objetos, está relacionada con la transferencia de energía térmica entre diferentes sistemas. Es una medida de la energía cinética de las partículas que componen el objeto de interés.

En el Sistema Internacional de Unidades está definida la unidad de temperatura como Kelvin. Sin embargo, es muy común que se utilice la escala Celsius (o centígrada) y, en Estados Unidos de América, la escala Fahrenheit. Para todas las escalas la unidad es el grado.

En la escala Celsius de temperatura, el cero corresponde a la temperatura del punto de congelamiento del agua, y el 100 a su temperatura de ebullición, ambos a nivel del mar.

Otro elemento que queda registrado es **la presión atmosférica** la cual se define como la fuerza ejercida por la atmósfera por unidad de área sobre cualquier superficie. Ésta equivale al peso de una columna de aire que se extiende desde un nivel determinado hasta el límite superior de la atmósfera.

Es posible expresar la presión ejercida mediante la medición en varias unidades de medida: hectopascales, milibares, pulgadas o milímetros de mercurio (Hg). La

unidad estándar en meteorología es el hectopascal ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ y $1 \text{ hecto} = 100$), ya que las diferencias en presión son del orden de 100 Pa, por lo que es más práctico utilizar esta unidad, que equivale a un milibar.

El movimiento del aire en la atmósfera, mejor conocido como **viento**, está sujeto a los efectos de la presión atmosférica. De hecho, el viento es resultado de las diferencias de presión que se manifiestan en la atmósfera. La mayoría de los movimientos de aire de interés en meteorología exhiben velocidades horizontales del orden de 10 m/s, mientras las que se presentan en sentido vertical son del orden de 1 cm/s, por lo que comúnmente al hablar de viento nos referimos siempre a una corriente horizontal o a la componente horizontal de una corriente atmosférica.

Las tres características registradas del viento que se miden son la dirección, la rapidez y el tipo (ráfagas y rachas); ellas se miden mediante veletas y anemómetros a baja altura, mientras que los de gran altitud se detectan con globos piloto o radio-sondeos.

En las mediciones del viento se registra su rapidez y su dirección. La dirección es posible expresarla en grados sexagesimales según un código alfabético que indica la dirección geográfica desde donde sopla el viento (N: Norte; E: Este; S: Sur; W: Oeste, y las direcciones intermedias, como NE o SSW).

También queda registrada en las estaciones **la evaporación**, la cual se define como el cambio de estado consistente en el paso de un líquido al estado de vapor, de forma gradual, que se presenta en la superficie del líquido y con una temperatura

menor a la de ebullición. La razón por la que se presenta la evaporación está en la teoría cinética molecular de la materia. Las moléculas que integran un líquido tenderán a escapar de él, pero sólo lo consiguen aquellas que disponen con energía suficiente para vencer la atracción de las otras moléculas del líquido. Al perder estas moléculas el líquido pierde energía, por lo que se enfría, de modo que para mantener su temperatura y proseguir la evaporación es preciso aportar calor.

Es posible que en la atmósfera el vapor de agua que se encuentra en la misma pase de estado gaseoso a líquido o sólido, y a su caída al terreno por acción de la gravedad se le conoce como **precipitación**. Ésta puede ser en forma de gotas de agua, nieve o, incluso, granizo.

2.2.3 Medición de precipitación

En las mediciones de precipitación se mide la tasa de acumulación de lluvia o nieve por unidad de área horizontal. Una acumulación de 1 mm corresponde a un volumen de 1 l/m².

Normalmente los registros deben de llevarse a intervalos de tiempo regulares, los cuales pueden ser horarios (cada hora), cada tres horas o diariamente (World Meteorological Organization (WMO)). Pero para algunos fines es necesario el tomar observaciones en periodos de tiempo aún más breves o más largos. Es común que en algunos climas desiertos los periodos sean de semanas, meses o inclusive años.

Debido a las condiciones que pueden afectar el fenómeno de precipitación es importante contar con metadatos que permitan conocer meticulosamente lo sucedido en la estación, de tal forma que sea posible evaluar y procesar correctamente los datos. Actualmente se cuenta con un rico contenido en metadatos en las estaciones más recientes.

Para obtener resultados más confiables se recomienda tomar los siguientes parámetros para la elección del lugar del instrumento de forma que el viento produzca los menores estragos y se tenga una muestra confiable de datos.

1. Elegir áreas con densidad de vegetación homogénea, sobre todo que la altura del follaje sea constante.
2. En caso de que no sea posible cumplir el punto anterior procurar aislar el instrumento lo suficiente para que las variaciones en la vegetación no produzcan errores.
3. Utilizar protección contra el efecto del viento.
4. La superficie alrededor debe de ser cubierta con pasto corto, graba, arena o cualquier material lo suficientemente poroso para que no rebote el agua precipitada al hacer contacto con el mismo.

Las mediciones al ser puntuales son comúnmente sujetos de análisis espacial, ya que con los instrumentos sólo se puede determinar cuánto ha precipitado en un punto específico y durante un periodo de tiempo definido (Garreaud & Meruane 2005). El comportamiento de los patrones de precipitación frecuentemente se ven

afectados por los rasgos geomorfológicos del terreno, como las cadenas montañosas y los valles.

De forma masiva se utilizan varios tipos de pluviómetros, sin embargo todos comparten la característica de que en su diseño se trata de minimizar el efecto del viento sobre el mismo, ya que puede ser un factor importante en la variación de datos entre diferentes modelos de pluviómetros.

Los diferentes métodos y diseños de pluviómetros tienen como objetivo obtener una muestra que permita representar de forma precisa y confiable lo sucedido en la zona de influencia de la estación. La elección sobre dónde colocar el instrumento también es un factor importante para el funcionamiento del mismo (Sevruk&Zahlavova 1994).

2.2.4 Tipos de Instrumentos para el registro de la lluvia

Pluviómetro: Sirve para medir la cantidad de lluvia caída en un intervalo de tiempo determinado. Para ello dispone de una probeta graduada donde se efectúan las lecturas directamente en milímetros o en litros por metro cuadrado. Está formado por un vaso cilíndrico que recoge el agua que le aporta el embudo o probeta graduada.

Pluviómetro de báscula: Es un pluviómetro de amplia utilización en estaciones meteorológicas automáticas, tiene un sistema de registro que incluye dos pequeños recipientes que alternan sus posiciones para recibir el agua que se recibe de la zona de captación (báscula). La capacidad de llenado de cada recipiente equivale a una cierta cantidad de precipitación. Cuando uno de los recipientes se llena, el sistema se vuelca por gravedad, vaciándose el recipiente lleno y quedando el otro en posición de llenado. Mediante un contacto eléctrico se registra la frecuencia de volcamiento, la cual es proporcional a la intensidad de la precipitación.

Mediante este tipo de instrumentos sólo se logra captar la parte cuantitativa del fenómeno, ya que la naturaleza de estos instrumentos es puntual, por lo que la parte de distribución espacial queda desatendida.

Constantemente son desarrollados nuevos métodos, más precisos, que permiten realizar mediciones más confiables. Sin embargo, su adopción no puede ser inmediata debido al gran número de instalaciones necesarias para realizar estudios y diagnósticos a gran escala. Es posible encontrar nuevos sistemas en eventos organizados por el WMO (*Slovak Hydrometrical Institute & Swiss Federal Institute of Technology, 1993 & WMO 1998*).

2.3 Elementos de la percepción remota

2.3.1 Definición de percepción remota

La observación remota de la superficie de la tierra y los fenómenos que en ella ocurren constituyen el marco de estudio de la percepción remota. Este término fue acuñado en la década de los sesentas para designar cualquier medio de observación mediante el cual se obtenía información a distancia.

En un sentido amplio, la percepción remota no sólo engloba los procesos que permiten obtener imágenes, sino también su posterior tratamiento, operación e interpretación(Chuvieco, 2008).

A continuación se definen los elementos necesarios para el ejercicio de la percepción remota:

- Fuente de energía, que supone el origen de la radiación electro-magnética que detecta el sensor. Puede tratarse de una fuente de radiación externa a éste, en cuyo caso se habla de un sistema pasivo. La fuente de energía más obvia es el sol, pero también puede realizarse la percepción remota a partir de la energía emitida por los mismos objetos observados, o desde fuentes artificiales.
- Objeto de estudio, el cual normalmente consiste en: cubierta terrestre, masas de vegetación, suelos y construcciones humanas, entre otros. El objeto debe emitir o reflejar energía electro-magnética para ser estudiado

con medios de percepción remota, ya que esta energía, al ser captada por un sensor, describirá las características físicas del emisor.

- Sistema sensor, compuesto de un sensor, propiamente dicho, y de una plataforma que lo alberga. Normalmente esta plataforma es un vehículo aéreo o espaciales.
- Sistema de recepción-distribución, lugar donde la información proveniente del sistema sensor se recibe, procesa y se transmite a los usuarios interesados.
- Interprete, herramienta que despliega y computa la información objeto de estudio para que el usuario interactúe con ésta.

Como es de imaginarse, la percepción remota va ligada directamente con el avance científico y tecnológico, por lo que su papel en los estudios interdisciplinarios ha crecido vertiginosamente en las últimas décadas, incrementando la calidad y cantidad de información disponible.

Esta información, que en los inicios de la percepción remota se limitaba para uso militar o muy restringido, actualmente goza de una amplia distribución, principalmente a través de Internet, donde los usuarios civiles tienen la oportunidad de trabajar y difundir información y productos generados a partir de percepción remota.

2.3.2 Datos obtenidos a partir de satélites meteorológicos

Otra forma de obtener información sobre la cantidad de agua precipitada es mediante la observación a través de sistemas de satélites artificiales que orbitan la tierra, pues éstos permiten tomar lecturas globales, debido a que la precipitación, a diferencia de otros elementos climatológicos como la presión atmosférica o la temperatura—aun sin barreras geográficas—, puede variar considerablemente en uno o pocos kilómetros de distancia.

Es por eso que la discontinuidad espacial de la precipitación es muy difícil de registrar con equipo climatológico tradicional. Con los sistemas de monitoreo meteorológico y climatológico basados en sistemas ópticos y de radar, disponibles en plataformas espaciales, es posible tener un panorama amplio y significativo de este fenómeno.

Para resolver esta carencia de información espacial el gobierno de los Estados Unidos de América creó una constelación de satélites entre los que se encuentra el *Vanguard 2*, el *TIROS-1* e integró el *Earth Observing System* (EOS) como un brazo de la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) (Nasa 2011).

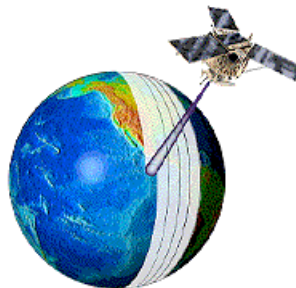
El EOS consiste en una serie de proyectos y misiones planeadas a largo plazo con la finalidad de analizar la superficie terrestre y todos los fenómenos relevantes que ocurran en la misma. Entre los objetos de estudio están los ciclos de energía (agua, carbón, etc.), cambio climático, monitoreo de la cobertura vegetal, etc.

Dentro del EOS existen varias misiones con fines meteorológicos y climatológicos, algunos de los instrumentos son únicos y se instalan en un solo satélite mientras, que otros son colocados en varios de ellos con el fin de tener redundancia y mayor volumen de datos.

En general es posible clasificar los satélites mediante varios criterios, tomando en cuenta su altura, equipamiento, nacionalidad, entre otros aspectos. A continuación se describen con base a su órbita.

2.3.3 Satélites polares

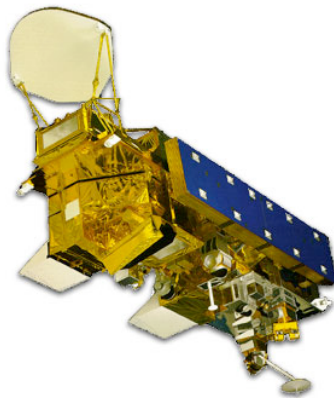
Los satélites de órbita polar son comúnmente desarrollados con fines científicos y realizan mediciones relacionadas con fenómenos específicos. Normalmente trabajan de forma independiente o en grupos muy reducidos. Están diseñados con el fin de dar una cobertura total de la superficie terrestre, lo que permite una resolución espacial muy fina, y, en ciertos casos, de pocos centímetros por píxel. Esto implica sacrificar la resolución temporal, ya que para que los satélites tomen sus lecturas en determinado punto de la superficie terrestre deben efectuar varias órbitas alrededor de la tierra.



Orbita Polar ¹⁰ Fig. 4

La órbita polar implica que el satélite vuele dentro de la atmósfera en una dirección norte o sur, casi perpendicular al ecuador. El movimiento de rotación de la tierra produce en la órbita del satélite un desplazamiento lateral.

Un buen ejemplo para este tipo de satélites es el **Aqua**. Fue desarrollado por la NASA mediante el EOS y, como su nombre indica, se trata de un satélite cuyo objeto de estudio es el agua. Se lanzó desde la base aérea *Vandenberg* en California sobre un Delta II durante mayo de 2002, está colocado a una altura de 705 km y se diseñó para una vida útil de 6 años, aún cuando todavía opera(NASA 2011).



Satélite Aqua ¹¹ Fig. 5

El Aqua cuenta con varios sistemas: *Atmospheric Infrared Sounder, Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System, Advanced*

¹⁰ <http://geocities.ws/redescefetpi/gifs/satelites/stripe.gif>

¹¹ www.aqua.nasa.gov

Microwave Sounding Unit, Clouds and Earth's Radiant Energy System, Humidity Sounder for Brazil y el Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer.

Como ya se mencionó el Aqua y sus instrumentos tienen como objeto de estudio principal el agua en sus diferentes estados y los sistemas en los que interactúa. La información producida incluye datos de la superficie de los océanos, evaporación y temperatura; vapor de agua en la atmósfera, nubes y precipitación; humedad del terreno; cobertura de nieve y hielo oceánico y continental.

Aunado a los datos anteriores, el Aqua cuenta con el equipo para la medición de elementos que actúan indirectamente en el ciclo del agua como aerosoles en la atmósfera, cobertura de vegetación, plancton y otros elementos orgánicos disueltos en los océanos, temperatura en la atmósfera y en la superficie continental.

Datos Clave

Misión conjunta con Brasil y Japón

Órbita

Tipo: Cercano-polar, helio sincrónica

Altitud: 705 km

Cruce Ecuatorial: 1:30pm (sur a norte)

Inclinación: 98.2°

Periodo: 98.8 Minutos

Ciclo de Repetición: 16 días (233 revoluciones)

Dimensiones: 4.8x16.7x8 m

Massa: 2,934 kg

Sistema de electricidad: 4,600W

Esperanza de vida diseñada: 6 años

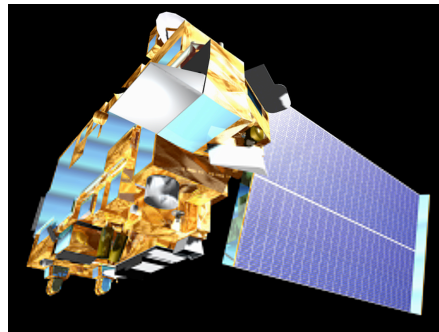
Promedio de datos transferidos: 89 Gb/día

Almacenamiento abordo: 136 Gb

Tabla 1

Un objetivo puntual de esta misión es determinar si el ciclo del agua se ha acelerado o ha sufrido modificaciones y, en su caso, el origen de las mismas. Otro es la determinación específica del desempeño de las nubes en los ciclos de energía que ocurren en nuestro planeta.

Otro buen ejemplo es el satélite **Terra**, de origen multinacional, desarrollado en conjunto por la *Canadian Space Agency* (CSA), la *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) y la NASA con la finalidad de realizar estudios sobre la superficie terrestre, en conjunto con otros satélites del EOS. El Terra fue diseñado con intenciones similares al AQUA con el cual funciona como contraparte para el estudio de la superficie continental. Tiene la finalidad de realizar estudios con eficiencia sobre agricultura, calidad del aire, manejo del carbón, manejo de costas, manejo de ciclos de energía, seguridad nacional, manejo de especies y salud pública entre otros.



Satélite Terra ¹² Fig.6

¹² www.terra.nasa.gov

Los objetivos particulares descritos por la NASA para este satélite son ofrecer una cobertura global de la tierra, incluyendo océanos, continentes, capas de nieve y hielo; temperatura, uso de suelo y vapor de agua; mejorar la habilidad de diagnóstico con respecto a la huella de las actividades humanas sobre el sistema natural y colaborar en la predicción y elaboración de modelos climáticos; colaborar en el desarrollo de tecnologías que permitan la predicción y modelación de desastres naturales; y comenzar con el monitoreo planeado a largo plazo para evidenciar los cambios en el ambiente y en el clima.

El Terra cuenta con cuatro instrumentos para este fin: *Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES)*, *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)*, *Measurements of Pollution in The Troposphere (MOPITT)*, y *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)*.

El satélite también fue lanzado desde *Vandenberg Air Force Base* en California en 1999. Fue diseñado para volar a una altura de aproximadamente 700 km y una vida útil de 6 años, pero continua funcionando.

Datos Clave

Misión conjunta con Japón y Canadá

Órbita:

Tipo: Cercano Polar, Helio sincrónica

Cruce Ecuatorial: 10:30 am

Altitud: 750 km

Inclinación: 98.1°

Periodo: 98.88 minutos

Repetición de Ciclo: 16 día

Dimensiones: 2.7x3.3x6.8 m

Masa: 5,190 kg

Fuente de Poder: 2530 W

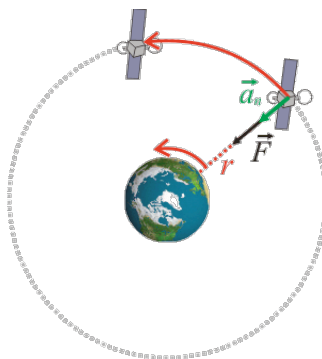
Esperanza de vida diseñada: 6 años

Tabla 2

2.3.4 Satélites Estacionarios

La principal función de los satélites estacionarios está ligada a la necesidad de realizar observaciones continuas y permanentes sobre de un mismo espacio geográfico. Estos artefactos vuelan en la atmósfera a una velocidad y con una dirección que los hacen parecer estáticos desde la superficie terrestre.

La idea original de aprovechar este tipo de recursos fue de Herman Potočnik en 1928, cuando propuso esta operación para un satélite de comunicaciones. Posteriormente, en 1945, Arthur C Clarke sentó las bases de este principio, de hecho, actualmente se denomina cinturón de Clarke a la zona en la atmósfera terrestre —alrededor de los 36 000 km de altura sobre el nivel del mar—, donde se desarrollan las órbitas geoestacionarias.



Orbita Geoestacionaria ¹³ Fig. 7

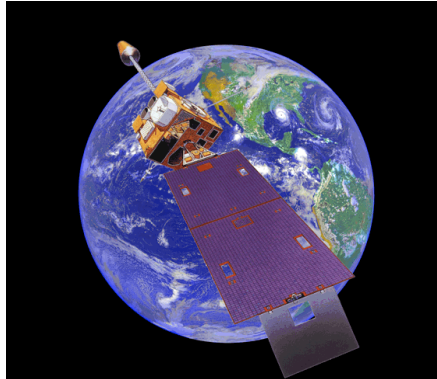
Generalmente los satélites geoestacionarios son de tipo meteorológico o de comunicaciones, ya que este tipo de órbita permite realizar ambas funciones de forma muy eficiente.

Como característica general, los satélites climatológicos geoestacionarios tienen una pobre resolución espacial comparada con su resolución temporal que es considerablemente muy fina. Mientras que en la escala espacial se habla de pixeles que abarcan kilómetros de área, en la temporal se realizan tomas cada pocos minutos.

Es frecuente que este tipo de satélites trabajen en grupos grandes e incluso mezclando familias y misiones con el fin de obtener productos más ricos en datos. Y es común que las misiones produzcan varias generaciones de satélites con el fin de ofrecer una continuidad garantizada.

Para el continente americano se cuenta con el *Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES)* que es una de las misiones del EOS. El primer satélite GOES-A, posteriormente renombrado GOES-1, fue lanzado en octubre de 1975, desde Cabo Cañaveral, Florida. Posteriormente, en 1977 y 1978 fueron lanzados los GOES-2 y GOES-3, cuyo diseño era prácticamente igual al de los *Synchronous Meteorological Satellite (SMS)*.

¹³ http://acer.forestales.upm.es/basicas/udfisica/asignaturas/fisica/dinam1p/sabiasgrav_files/geoest.gif



Satélite GOES ¹⁴ Fig.8

Los siguientes 4 satélites, los GOES-4 al GOES-6 fueron basados en los primeros tres, pero éstos ya contaban con equipo mucho más sofisticado. La mayor ventaja radicaba en que contaban con el *Visible Infrared Spin Scan Radiometer* (VISSR) y el *Atmospheric Sounder* (VAS), con los cuales se alcanzó la capacidad de analizar la temperatura y humedad atmosférica y la posibilidad de crear mapas de distribución tridimensional de nubes.

En 1986 fue lanzado el GOES-7 el cual fue el primer satélite con capacidad de detectar señales de auxilio de diferentes fuentes, como aviones o barcos.

El GOES-8 fue lanzado en abril de 1994, y pertenece a una nueva generación de vehículos espaciales, ya en la clasificación de los GOES - I-M. Una de las grandes diferencias entre éste y sus predecesores estriba en la habilidad para obtener imágenes ópticas y de sonar al mismo tiempo, lo cual enriquecía mucho la cantidad y la calidad de la información recolectada.

¹⁴ www.nasa.gov/goes-n

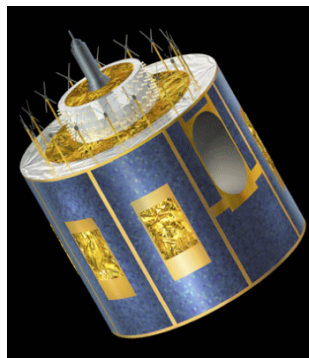
La segunda generación de satélites se completa con GOES -9 lanzado en 1995 y el GOES-10 en 1997. En funcionamiento se encuentran GOES-11 (2000) y GOES-12 (2001). En la familia de la tercera generación están GOES-13 (2006) y GOES -14 (2009), éste último, en periodo de descanso listo para substituir el próximo satélite que salga de funcionamiento. Finalmente, el GOES -15 (2010) se encuentra en periodo de pruebas.

En general la carga útil de todos los satélites consiste. por una parte, en un equipo óptico que se dedica a recolectar la luz reflejada por la superficie terrestre y los sistemas de tormenta y cuerpos nubosos; por otra, en un sonar que recopila datos de temperatura y humedad, temperatura de las partes altas de las nubes y la distribución de ozono. A su vez la información se apoya en mediciones hechas con instrumentos en tierra.

Para cubrir Europa, África y el medio Oriente se cuenta con el **METEOSAT**. Esta misión tiene fines meteorológicos y climatológicos y consta de varios satélites desarrollados y operados por la *European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites* (EUMETSAT). A lo largo del METEOSAT se han colocado dos generaciones de satélites en órbita, la primera consta de una familia de siete satélites—el primero de ellos colocado en órbita en noviembre de 1997 (Meteosat- 1); el resto de los satélites fueron lanzados en 1981, 1988, 1991, 1993 y 1997, todos siguiendo la numeración natural.

Actualmente opera la segunda generación de METEOSAT, en Agosto de 2002 fue lanzado el Mesteosat-8 y en diciembre de 2005 el Meteosat-9. Ambos incluyen una

serie de mejoras a sus antecesores como son el *Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager* (SEVIRI) que es un instrumento óptico diseñado para observar en 12 canales, tres en el visible y nueve en el infrarrojo; y el *Geostationary Earth Radiation Budget* (GERB), un radiómetro diseñado para registrar las radiaciones en onda corta y onda larga emanadas por la tierra.



Satélite METEOSAT ¹⁵ Fig. 9

Colocado en coordenadas geográficas 0º norte y 0º este en una órbita geoestacionaria, el METEOSAT tiene una visión completa de los continentes europeo y africano, y de buena parte de la península arábiga. En la resolución espectral toma imágenes cada 15 minutos, lo que permite tener un monitoreo constante meteorológico.

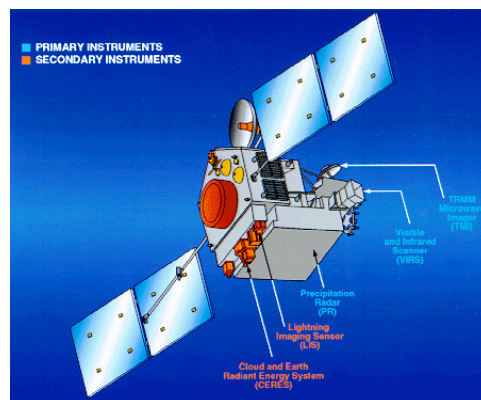
2.3.5 TRMM

Mediante la colaboración entre los gobiernos Japonés y Norteamericano, específicamente entre la *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) y la NASA se

¹⁵ <http://www.meteosat.com/>

desarrolló la *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) y en su momento de lanzamiento lo equiparon con una serie de instrumentos de avanzada. El TRMM ofrece una cantidad considerable de información y datos sobre los diferentes sistemas de precipitación desde una escala global.

Concebido durante la década de los 80s y desarrollado durante esa y la siguiente década en las instalaciones *Goddard Space Flight Center* (GSFC) fue lanzado a órbita posteriormente por la JAXA en el *Tanegashima Space Center* en noviembre de 1997.



Satélite TRMM ¹⁶ Fig. 10

El satélite fue diseñado para volar a una altura promedio de 350 km sobre el nivel del mar, con un cubrimiento de $\pm 35^\circ$ a partir del ecuador, con una vida calculada de 3 a 5 años. En agosto de 2001 se decidió aumentar la altura del mismo 50 km para disminuir el desgaste y consumo de combustible al mantenerse en órbita.

¹⁶ trmm.gsfc.nasa.gov/

Los objetivos específicos definidos por la NASA para esta misión consistieron en obtener datos de varios años de la zona tropical y subtropical y el análisis de los mismos; y mejorar el entendimiento de las interacciones entre la superficie continental y la oceánica en conjunto con la atmósfera y los fenómenos derivados de ésta.

EL TRMM fue el primer satélite en incorporar instrumentos radiométricamente activos y pasivos, mediante los cuales se posibilitó recabar elementos para un mejor entendimiento del ciclo hidrológico y sus interacciones con el resto del planeta.

Datos Clave
Misión Conjunta con Japón
Órbita:
Tipo: No Helio sincrónica
Altitud: 350km aumentado a 402km
Inclinación 35°
Periodo: 91 minutos
Ciclo de Repetición: Cambia cada 24 horas
Dimensiones: 5.2m alto
Masa: 3512 kg
Sistema de poder: 1100 W
Esperanza de vida: 3 años (operando hasta la fecha)

Tabla 3

2.3.5.1 Instrumentos y productos del TRMM

2.3.5.1.1 Precipitation Radar

Es el primer radar en ofrecer información tridimensional de los sistemas de tormentas y su distribución. Diseñado por el *Japanese National Institute of Information and Communication Technology* (NICT) en conjunción con la JAXA, cuenta con un arreglo de 128 elementos que operan a 13.8Ghz en fase activa. La antena permite realizar un barrido de 215 m o $\pm 17^\circ$

2.3.5.1.2 TMI

Es un sensor pasivo desarrollado para obtener información cuantitativa de los sistemas precipitantes. Mediante mediciones de alta precisión el TMI es capaz de visualizar vapor de agua y agua almacenados en las nubes.

La forma en que el TMI observa se basa en la reflectividad energética del agua, la cual varía en función del estado físico de ésta. Cuando un cuerpo de agua es observado por el instrumento se aprecia “muy frío”, independientemente de su temperatura real; mientras que un grupo de gotas suspendidas en la atmósfera lucirán “calientes”, ya que será posible detectar la temperatura real de las mismas.

El TMI realiza el proceso mediante el uso cinco frecuencias, a diferencia de sus predecesores que sólo utilizaban cuatro: 10.7, 19.4, 21.3 , 37 , 85.5 GHz, con éstas

le es posible obtener una respuesta lineal para las precipitaciones intensas comunes en el trópico.

Con el TMI la NASA tiene, por primera vez, la oportunidad de obtener información suficiente para determinar el papel de la lluvia tropical en el ciclo del agua y su rol en el equilibrio climático a nivel mundial. Este es considerado un instrumento muy eficiente, pues tiene requerimientos muy bajos de energía y ocupa un espacio reducido en el satélite, sin descuidar la precisión y la calidad de los datos recolectados.

2.3.5.1.3 VIRS

El *Visible and Infrared Scanner* es uno de los principales instrumentos a bordo del TRMM. Se trata de otro sensor pasivo que actúa como observador de los sistemas de precipitación. Complementa la información obtenida junto con los demás instrumentos a bordo del propio TRMM y los instalados sobre otras plataformas. Tiene un rango espectral de observación entre los 0.63 y 12 micrómetros y, como su nombre lo indica, registra la mayor parte de su información en el rango infrarrojo del espectro, por lo que, dependiendo de las condiciones, será posible obtener no sólo información meteorológica —mediante lecturas térmicas en las nubes—, sino también la temperatura de la superficie de la tierra.

La forma mediante la cual es discriminada la temperatura de las nubes se fundamenta en el hecho de que, entre mayor es la altitud de las nubes más baja es

su temperatura. Así mismo, entre más baja es la temperatura de los cuerpos nubosos, se incrementa la probabilidad de precipitación.

Cabe destacar que la calidad de la información obtenida yace, en parte, en la habilidad para monitorear de forma continua desde una posición geoestacionaria, y en la capacidad de comparación de datos con los obtenidos por otros instrumentos a bordo del TRMM.

El VIRS utiliza un espejo rotatorio que le permite realizar barridos en un área de 833 km con un píxel, en el punto nadiral, de 2.4 km.

2.3.5.1.4 CERES

El *Clouds and the Earth's Radiant Energy System* (CERES) es uno de los instrumentos más utilizado por el EOS de la NASA, pues este se encuentra en un número considerable de satélites en órbita, incluyendo el TRMM. Éste consiste en un radiómetro con tres termovisores. Opera en tres espectros: uno, general de los 0.3 a los 100 micrómetros; otro, de onda corta de 0.3 a 5 micrómetros; y el último, de 8 a 12 micrómetros, denominado onda larga.

Mediante la información obtenida por el CERES es posible determinarlas propiedades físicas de los cuerpos nubosos mediante imágenes de alta resolución, como son la altitud, la densidad y el tamaño de las gotas de lluvia almacenadas en la misma.

2.3.5.1.5 LIS

EL Lightning Imaging Sensor es un sensor que permite localizar descargas eléctricas en la atmósfera en la región tropical del planeta. Es uno de los instrumentos más pequeños del TRMM y realiza sus observaciones durante lapsos de 80 segundos, durante los cuales puede determinar la capacidad de la nube para realizar descargas.

2.3.5.1.6 Productos

Del TRMM es posible obtener muchos y diferentes productos, los cuales se clasifican de acuerdo con el nivel de procesamiento requerido para su elaboración. En el primer nivel se encuentran los insumos directamente obtenidos de los diferentes instrumentos. Éstos se georeferencian para su utilización y se les procesa para disminuir el ruido generado en el momento de registro; se les podría considerar como productos “crudos”.

En el segundo nivel se sitúa el resultado de la unión y la corrección de los insumos del primer nivel. Normalmente los productos de este nivel se caracterizan por gestionar una limpieza o depuración de datos, normalmente proveniente de un mismo satélite.

En el tercer nivel se caracteriza por la unión de varios productos del primero y segundo niveles. En esta categoría se encuentra el 3B42, el insumo utilizado en este trabajo.

2.3.5.1.7 3B42

El propósito del algoritmo 3B42 es producir información valiosa a partir de los diferentes instrumentos a bordo del TRMM, fusionando datos del sector infrarrojo del espectro de alta calidad, la raíz cuadrada media [root-mean-square (RMS)] de la precipitación, y las estimaciones de error de las lecturas de precipitación.

Por emplear una resolución espacial de $\frac{1}{4}^{\circ} \times \frac{1}{4}^{\circ}$ geográficos y una resolución temporal de 3 hr, el 3B42 constituye una excelente referencia para la finalidad de este estudio, con suficiente calidad y cantidad de información espacio-temporal.

Este producto 3B42 se genera en cuatro etapas: 1) (HQ) las estimaciones por microondas son calibradas y combinadas, 2) (VAR) las estimaciones hechas mediante la información en infrarrojo son calibradas con el producto del primer paso, 3) (HQ-VAR) la información de los primeros dos pasos es fusionada, 4) se reescala a periodos mensuales.

2.3.5.1.7.1 High Quality (HQ) microwave estimates

Este primer paso consiste en que toda la información recabada mediante los sensores de microondas pasivas se promedia a un $\frac{1}{4}^{\circ}$ geográfico espacialmente y un rango de ± 90 minutos del tiempo nominal de observación. Todos los estimados son ajustados utilizando un histograma de precipitación armado de información coincidente. El algoritmo toma como base de calibración el TRMM Combined Instrument (TCI), sin embargo si la coincidencia con el TMI o con otro sensor no es

suficientemente rica, se establece una calibración TCI-TMI y posteriormente se estiman los resultados calibrados del TCI.

La relación espacial entre TCI-TMI es de 1°x 1° geográficos por cada mes de información recolectada para identificar las diferentes climatologías. El trabajo preliminar muestra que las calibraciones del TMI comparada con otros sensores es adecuada para representar la climatología basada en coeficientes que abarcan grandes extensiones de área. Para la calibración TMI-SSM/les necesario separar por regiones, 40°-30°N, 30°-10°N, 10°N-10°S, 10°-30°S, 30°-40°S y una sola área continental para cada una de las temporadas trimestrales.

Las calibraciones TMI-AMSR-E y TMI-AMSU-B son repartidas espacialmente en un solo ajuste climatológico para la parte continental de la superficie terrestre, y otro para la oceánica. La calibración AMSU-B tiene dos problemas iniciales: el primero radica en que el algoritmo del National Environmental Satellite, Data, and Information Service (NEDIS) fue cambiado en 2003 para tener dos juegos de datos en dos periodos de tiempo; el segundo estriba en que los dos periodos del AMSU-B se presenta una ocurrencia fraccional de la precipitación en la zona subtropical que es notablemente deficiente.

Después de una extensiva serie de pruebas se juzgó que para el océano era más eficiente desarrollar calibraciones regionalizadas en zonas donde la precipitación lo amerita. En todos los casos la calibración es una ecualización sencilla de histogramas.

El intervalo de calibración elegido es de un mes, para asegurar la estabilidad y representatividad, salvo en el caso del TMI-AMSE-E que requiere períodos de dos meses.

Una vez que los estimados TMI-AMSU-B y TMI-AMSE-E están calibrados para cada período, con una cantidad menor de 40% de pixeles ambiguos, la retícula es probada con la mejor información disponible, aunque es común que en las ventanas temporales de tres horas se presenten 1 y 0.

Cuando presenta una variedad significativa, de acuerdo con los parámetros de construcción del 3B42, se promedian los datos disponibles del TCI, ajustado sucesivamente mediante TMI, TCI ajustado mediante AMSRE- E y del TCI ajustado mediante el SSM/I.

2.3.5.1.7.2 Variable Rain Rate (VAR) IR estimates

El segundo paso del 3B42 utiliza dos tipos de datos en infrarrojo para crear el juego de datos de cada tres horas, en un área de $\frac{1}{4}^{\circ} \times \frac{1}{4}^{\circ}$ geográficos. Los histogramas son ecualizados con los insumos del High Quality micro wave estimate (HQ) y se agrupan por períodos de un mes para crear coeficientes útiles en calibraciones espaciales que conviertan el infrarrojo Tbs a índices de precipitación. En el HQ la calibración para los intervalos de IR es de un mes.

La elección de la escala temporal tienen como objeto mantener los juegos de datos con valores dependientes e independientes para obtener calibraciones temporales

confiables. Una segunda detección mensual ofrece un mejor control de insumos para elementos ambiguos en los datos de acumulación de precipitación en microondas, comparada con la detección automática.

Es bien sabido que no existen precipitaciones de $\frac{1}{4}^{\circ} \times \frac{1}{4}^{\circ}$ geográficos. En promedio el T_b es mayor que el valor del umbral local, que coincide con la frecuencia de la precipitación en el Infrarrojo y en las microondas.

Para los valores más fríos de T_b s se asignan incrementos en las tasas de datos de precipitación utilizando ecualización de histogramas. Aquellas celdas en la retícula que carecen de datos coincidentes a lo largo del mes —usualmente debido a datos ambiguos o mala edición— son sujetas a coeficientes de calibración por sistemas de rellenado suave de histogramas de coeficientes de datos en la vecindad.

2.3.5.1.7.3 Combinación de estimados HQ y VAR

Es frecuente que sea complicado combinar diferentes estimados de precipitación, por ello la finalidad del algoritmo es ofrecer el mejor estimado de precipitación para cada celda de la retícula por cada periodo de observación.

De hecho, el proceso de combinación de microondas pasivas es relativamente fácil ya que los sensores en general son muy similares a los sensores GORF que son muy usados.

Este, sin embargo, no es el caso para las estimaciones HQ y VAR. Actualmente se adopta un procedimiento para combinar los valores HQ y VAR basado en las

características físicas de los estimados HQ, donde cada datos es vaciado en la celda correspondiente y los huecos son rellenados con estimaciones VAR. Este esquema, construido por juegos de datos estadísticos y heterogéneos, aporta el mejor estimado local a expensas de las series de tiempo.

2.3.5.1.7.4 Reescalando a la escala mensual

El paso final para generar el 3B42 es el uso indirecto de los datos del umbral de lluvia. Sin embargo, la experiencia nos dice que escalas temporales menores de un mes no proveen suficientes datos, ni densidad de los mismos, necesarias para garantizar su inclusión en el algoritmo.

Este problema se resolvió en el GPCP One-Degree Daily combinando juegos de datos escalados a periodos de tiempo más cortos que, compilados, arrojan como resultado un mes.

De forma similar en 3B42 se toman los estimados para cada 3 hr de HQ y VAR y se suman para obtener un compilado mensual.

Capítulo 3

Métodos de integración de datos

Entender los sistemas y patrones de distribución espacial es un tema de gran interés en varias áreas del conocimiento, por ello se han desarrollado técnicas que permiten explicar y medirlos de forma ordenada y tangible. Todo esto se expresa a través de propiedades y relaciones en el campo espacial, los cuales pueden estudiarse de forma directa.

Es posible clasificar estos análisis en las siguientes categorías:

- **Eventos o patrones de puntos:** este tipo de fenómeno se expresa como su nombre lo indica, a través de puntos, e identifica ubicaciones específicas, como pueden ser acontecimientos precisos o localización de objetos u especies determinadas.
- **Superficies continuas:** Constan de conjuntos de datos que se relacionan entre sí y tienen una distribución regular o irregular. Usualmente

este tipo de datos van ligados a estudios geológicos, topográficos, ecológicos etc.

- **Áreas con datos puntuales o con tasas globales:** este tipo de datos normalmente va asociado a censos, ya sean poblacionales, económicos o de cualquier otro tipo de variedad que venga de una serie de puntos en el espacio con información local. Pero que por razones de confidencialidad o por un manejo más sencillo de la información se realizan tablas con datos globales, usualmente agrupados en polígonos cerrados. (Nina Siu-ngan Lam).

En los estudios sobre datos puntuales cobra aún mayor importancia el análisis de la localización de los mismos. El objetivo central consiste en encontrar la distribución espacial de los datos, si es aleatoria o, por el contrario, tiene patrones bien definidos; si presenta aglomeraciones o si tiene una distribución ordenada y proporcional.

En contraparte, en el análisis de superficies se busca reconstruir el total de la información a partir de los datos existentes con un grado considerable de certidumbre y similaridad a los datos reales en campo que no fueron levantados.

En los análisis de áreas de tasas globales, normalmente delimitados por polígonos —regulares o no— donde es posible que exista una homogeneidad, los cambios y patrones se presentan en los límites y fronteras de éstas. Pero la homogeneidad no

es forzosa, ya que es frecuente abordar este tipo de información de varias maneras, hasta encontrar una solución que acomode para cada caso de estudio.

3.1 Conceptos básicos de la integración de datos

La dependencia espacial es un concepto clave para cualquier análisis espacial. Éste va ligado a la primera ley de la geografía de Tobler *“Todo está relacionado con todo, pero las cosas cercanas lo están más”* (Tobler 1979).

Posteriormente se puede hablar de la autocorrelación espacial, que es una expresión computacional. Este término viene del concepto estadístico de la correlación, el cual se usa para medir el nivel de relación entre dos variables aleatorias. El prefijo *auto* indica que se busca la correlación de un objeto con si mismo. Este puede ser un determinado tipo de lecturas que se presenta en diferentes puntos de espacio. Existen varios métodos para medir este factor, pero todos parten de la misma base, el comparar un valor con el de sus vecinos.

Otro resultado de la dependencia espacial es la inferencia espacial generada, la cual crecerá proporcionalmente a la independencia de las muestras evaluadas, por lo que una selección homogénea que tenga alta dependencia espacial no servirá para explicar los fenómenos como sí lo sería una selección heterogénea.

Todas estas características fueron utilizadas en el proceso de este trabajo y es importante mencionar que se requieren resultados positivos, o parcialmente positivos, para realizar una integración entre las diferentes fuentes de datos

utilizadas, de tal modo que el resultado sea una superficie correcta y representativa.

3.2 Kriging

De los métodos de interpolación espacial, la técnica conocida como Krigin es una buena opción dentro de las correspondientes a las regresiones lineales, debido a su variación mínima y alto grado de precisión(Stein 1991).

El método Kriging es una técnica de interpolación convencional, lineal, que permite estimar valores desconocidos dentro de una vecindad determinada. Fue desarrollado por el sudafricano Danny G. Krige, quien la utilizaba principalmente en la minería. Recibió su nombre por ser aplicada por Matheron en 1963 al cambiar la forma en la que se practica la estadística (Matheron 1971).

Actualmente existen variantes de este método que permiten trabajar la información de forma más precisa, o que cumplen con ciertas condiciones durante el cálculo de la misma.

Adicionalmente, hay que tener en cuenta que el valor faltante por calcular dependerá directamente de las relaciones espaciales existentes en la localidad.

Es conveniente considerar ciertos aspectos al trabajar este método, como son:

- Número de Muestras

El tamaño de la muestra debe de ser cuidadosamente determinada, ya que una gran cantidad de datos puede resultar en una matriz de datos que sea difícil y lenta para trabajar, mientras que si es muy pequeño el número de muestras ingresadas, la estimación puede ser poco representativa.

- Tamaño de la vecindad

Ésta debe de ser, al igual que la muestra de datos, de un tamaño adecuado. Es decir, suficientemente grande como para incluir un buen número de puntos y, a la vez, tan pequeña para que los datos seleccionados estén en la misma región.

- Tipo de vecindad

Deutsch y Journel recomiendan que si los datos se encuentran en dos dimensiones y en el modelo los datos no dependen de la dirección —Isotrópico—, la vecindad debe de ser circular.

Por el contrario, si las características de las muestras dependen de su dirección —anisotrópico—, se debe de usar una forma de elipse para la vecindad a trabajar.

En caso de contar con datos en tres dimensiones se deben seguir los mismos criterios convirtiendo el círculo en esfera y la elipse en elipsoide.

Cabe destacar que Kriging no es el único método de interpolación espacial. Existen otros como la Tesstelación y las Splines. Sin embargo, Kriging es el único cuya base estadística permite que no haya incertidumbre en la medición del error generado por él mismo (Webster 1985).

Todas las variantes generadas desde la fórmula original Kriging provienen de una regresión lineal, donde el objetivo es minimizar la varianza del error $\sigma^2(u)$ que proviene de la siguiente expresión :

$$\sigma^2(u) = \text{Var}[Z^*(u) - Z(u)]$$

Donde $Z^*(u)$ indica el valor estimado para la localidad en estudio, y ésta se minimiza bajo la restricción de que sea sin sesgos (Verdoy, 2005) es decir:

$$E[Z^*(u) - Z(u)] = 0$$

3.2.1 Kriging ordinario

En un conjunto de datos espacialmente referenciados en un conjunto Z , donde cada punto en forma individual se define como $Z(u)_i$ de modo que:

$$Z = Z(u)_1 + Z(u)_2 + Z(u)_3 + \dots + Z(u)_i$$

Pero dada la naturaleza de los datos mismos, no disponemos del dato correspondiente a $Z(u)_{11}$, pero con ayuda del Kriging ordinario es posible calcular el valor con base en una combinación lineal de las variables de la siguiente manera:

$$Z(u)_{11} = \lambda_1 Z(u)_1 + \lambda_2 Z(u)_2 + \lambda_3 Z(u)_3 + \lambda_4 Z(u)_4 + \dots \lambda_i Z(u)_i$$

O, escrito de otra forma:

$$\hat{Z}(u)_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(u)_i$$

De manera que $\hat{Z}(u)_0$ es el valor pronosticado y λ_i es el peso desconocido que se debe de calcular para cada valor observado. Esto se hace tomando en cuenta la distancia entre los puntos elegidos y el punto donde se realiza el cálculo para obtener el valor estimado. Éste variará de un valor observado en función del error de estimación: $\varepsilon = Z(u)_0 - \sum \lambda_i Z(u)_i$ siendo $Z(u)_0$ el valor observado y $\sum \lambda_i Z(u)_i$ el valor calculado.

El error está ligado a los pesos elegidos, lo cuales son idealmente producidos al ingresar datos sin sesgo y con una misma varianza de estimación. Los pesos siempre deben sumar 1.

Entonces, se asume que $\hat{Z}(u)_0$ es la mejor predicción ya que los pesos son tales que se minimiza el error de predicción. Para asegurar un error mínimo es posible

añadir un multiplicador de Lagrange μ , el cual se obtiene al resolver la siguiente expresión:

$$Y \cdot \lambda = w$$

o

$$\begin{bmatrix} 0 & y_{12} & y_{13} & \dots & y_{1n} & 1 \\ y_{21} & 0 & y_{23} & \dots & y_{2n} & 1 \\ y_{31} & y_{32} & 0 & \dots & y_{3n} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & y_{n3} & \dots & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix}$$

Para calcular los pesos de la λ_i hay que obtener la matriz inversa $Y^{-1} \cdot Y = w$; $\lambda = Y^{-1} w$. Para calcular el vector w se calcula la distancia entre los vecinos y el punto donde se va a interpolar mediante la fórmula de distancia euclidiana y, posteriormente, se calcula la semivarianza correspondiente a las distancias con los parámetros definidos.

Como resultado se obtiene la siguiente expresión

$$\hat{Z}(u_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(u_i)$$

Este método se emplea cuando es marcada la tendencia en la variable muestreada, como puede ser el espesor de una formación que va incrementándose en una dirección determinada.

Hay que tener en cuenta que en una tendencia con estacionalidad de primer orden, esto es que la media local no es uniforme, este método no tiene validez. Cuando se presenten este tipo de tendencias se deben de hacer modificaciones a la misma.

La variable se separa en dos componentes, una, la tendencia, otra, la residual de la misma. Al restar la media local, el residuo debería tender a cero, con algunos valores positivos y negativos.

Se restan de la tendencia los valores ausentes de la misma que cumplen el requisito de estacionalidad de primer orden. En este punto ya es posible aplicar el método Kriging.

La forma de utilizar las variables se describe como $Z(u)$ la suma de la tendencia:

$$Z(u) = m(u) + Y(u)$$

Donde $E(Y(U)) = 0$, $VAR(Y(U)) = \sigma^2$ por lo tanto $E(Y(U)) = m(u)$

De modo que:

$$m(u) = \sum_{i=1}^p a_i f_i(u)$$

Donde las funciones $f_1(u)$ y p es el número de datos empleados para ajustar, $m(u)$ y a_1 son los coeficientes constantes obtenido con la vecindad no fija, por lo que se puede expresar de la siguiente manera:

$$\hat{Z}(u_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(u_i)$$

3.2.2 CoKriging ordinario

También conocida como “estimación conjunta” de variables regionalizadas, es el análogo natural del método de Kriging de una función aleatoria. Mientras que la metodología original utiliza la correlación espacial para calcular los coeficientes en el estimador lineal, el CoKriging utiliza al mismo tiempo la correlación espacial y la correlación entre funciones aleatorias al mismo tiempo.

Es más común el uso de esta variante en casos geoestadísticos, donde una de las variables muestreadas tiene menos información recopilada que las otras, o cuando existen errores de muestreo.

Queda expresado de la siguiente forma:

$$\gamma_{v^1, v^2} = \frac{1}{2n_h} \sum_{h=1}^{n_h} \left| Z_{v^1}(u+h) - Z_{v^1}(u) \right| \left| Z_{v^2}(u+h) - Z_{v^2}(u) \right|$$

Donde n_h es el número de parejas de datos que se encuentran a distancia h .

Tomando en cuenta que:

$$\gamma_{y_1, y_2}(0) = 0$$

$$\gamma_{y_1, y_2}(-h) = \gamma_{y_1, y_2}(h)$$

$$\gamma_{y_1, y_2}(-h) = \gamma_{y_1, y_2}(h)$$

El variograma cruzado es una función simétrica.

Hay que considerar que el CoKriging tiene dos grandes desventajas: primero, que es muy difícil de utilizar debido a la naturaleza intrínseca de su notación (Journel & Huijbregts 1978); segundo, en contraste con el Kriging, éste no se puede usar en presencia de una tendencia, ya que la teoría de estimación de covarianza cruzada espacial no está completamente disponible (Cressi 1987).

3.3 Moran

Publicado originalmente en 1948, el índice Moran ha sido utilizado extensamente en el campo de la estadística espacial. Este índice da como resultado un rango

normalizado que señala la existencia o no de correlación espacial entre sus elementos (Haining 1990). Sin embargo si dentro de los datos coexisten estructuras con alta y baja correlaciones, el índice Moran no podrá distinguir entre ellas.

Por lo anterior se recomienda realizar pruebas locales dentro de los mismos juegos de datos, ya que éstas pueden diferir de lo que sería la tendencia global. (Fotheringham 1999). Para atender esta necesidad se han desarrollado diferentes métodos a partir del índice Moran (Moran's I), tal es el caso del LISA, que aplicarlo en forma conjunta es posible detectar eficientemente zonas con alto valor de correlación, bajo valor de correlación y sin correlación.

Los métodos establecidos para obtener la autocorrelación espacial normalmente enfatizan la parte relacionada con los valores ligados a la alta autocorrelación, dejando de lado los valores ligados a la baja o nula autocorrelación (Lawson & Kulldorff 2000). Estos últimos valores aseguran buena calidad de lectura y permiten una mejor discriminación de los procesos, al ayudar a delimitar de forma precisa y puntual las zonas de alta correlación, al tiempo que ayudan a resolver e identificar diferentes problemáticas, tales como la configuración de los datos, la forma en la que se usan los datos y el establecimiento de patrones locales.

T Zhang & G Lin (2007) proponen emplear el Moran's I separado en tres componentes para su uso, pues demostraron que aun cuando el valor resultante tienda a cero, existe la posibilidad de que coexistan en el juego de datos, zonas con alta, baja o nula autocorrelación (Anselin 1995).

3.3.1. Desarrollo de Moran

Sea x_i una variable de interés en una región de estudio A que tiene m regiones :

$$(i=1, \dots, m)$$

el Índice Moran (1950) queda expresado de la siguiente manera:

$$I = \frac{1}{S_0 b_2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})$$

donde

$$S_0 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m w_{ij}, \quad \bar{x} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m w_{ij} x_i / m b_k$$

y donde

$$w_{ij} = w_{ii} = 0$$

es un elemento de la matriz de pesos que mide la distancia espacial o la conectividad entre las regiones i y j . Usualmente se asigna w_{ij} a una conectividad espacial $w_{ij}=1$ si las regiones i y j son adyacentes. Y se asigna una $w_{ij}=0$ en caso contrario. En la mayoría de los casos la matriz de pesos es simétrica, lo que quiere decir $w_{ij}=w_{ji}$ para todos los valores de i y j .

Los coeficientes resultantes están dentro de un rango normalizado, esto quiere decir de -1 a 1. Con el -1 indica que los datos en la vecindad no tienen relación entre ellos mismos; con el 1 indica lo opuesto. Si los valores en el vecindario tenían una correlación positiva, entonces los valores de éstos podían ser altos o bajos en las aglomeraciones. Si la prueba resultaba negativa estas regiones resultaban estar yuxtapuestas, similar a un tablero de ajedrez. Pero cuando Moran's I es igual a cero, éste indica aleatoriedad espacial o independencia de los elementos.

Ahora desglosaremos el Índice Moran según T Zhang y G Lin en tres componentes, que corresponden a I_h a una alta autocorrelación en la aglomeración, I_c para una baja autocorrelación en la aglomeración y I_n cuando no existe una autocorrelación.

Y es posible escribir el índice Moran en términos de estas tres componentes

$$I = I_h + I_c + I_n$$

donde

$$I_h = \tilde{I}_h / (S_0 b_2) \quad , \quad I_c = \tilde{I}_c / (S_0 b_2) \quad \text{y} \quad I_n = \tilde{I}_n / (S_0 b_2)$$

en conjunto con

$$\begin{aligned} \tilde{I}_h &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x}) = \sum_{i \in A_h} \sum_{j \in A_h} w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x}) \\ \tilde{I}_c &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x}) = \sum_{i \in A_c} \sum_{j \in A_c} w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x}) \\ \tilde{I}_n &= - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (w_{ij} + w_{ji}) (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x}) = \sum_{i \in A_h} \sum_{j \in A_c} (w_{ij} + w_{ji}) (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x}) \end{aligned}$$

de forma que

$$A_h = \{i : x_i \geq \bar{x}\} \quad \text{y} \quad A_c = \{i : x_i < \bar{x}\}$$

Posteriormente se calculan la media y la varianza de los I_h , I_c y I_n con permutaciones aleatorias. Como se hace en el Moran I los resultados de I_h y I_c positivos, y estadísticamente significativos, indican una alta y baja correlación en la aglomeración, respectivamente. En caso de que I_n resulte negativo y sea estadísticamente relevante, se desprende una nula correlación en la vecindad en estudio.

Dado que $x_i - \bar{x}$ es siempre positivo cuando $i \in A_h$ y negativo cuando $i \in A_c$, de esta forma es posible el calcular la media y la varianza de I_h mediante una permutación aleatoria en el espacio de A_h pero no en el A_c . De forma similar podemos calcular los mismos elementos para I_c en el espacio de A_c pero no en A_h .

Finalmente, dado que I_n es un término de interacción es posible derivar la media y la varianza del producto de dos permutaciones aleatorias. El primer paso consiste en permutar las locaciones en A_n únicamente. El segundo paso cosiste en hacer lo mismo en A_c .

Capítulo 4

Caso de Estudio: La Cuenca del Usumacinta en México

4.1 Zona de estudio

El área de estudio de este trabajo corresponde a la porción nacional de la Cuenca del Usumacinta, localizada en el sureste de México, en los estados de Chiapas y Tabasco. En total, la cuenca abarca una superficie de más de 7 millones de hectáreas, de las cuales el 58% se encuentra en México y el resto en Guatemala.

La región hidrológica que alberga a los ríos Usumacinta y Grijalva es la más grande de México y ocupa el séptimo lugar en cuanto a área a nivel mundial, con una carga anual aproximada de 105,000 millones de metros cúbicos de agua.

Uno de los resultados de la gran cantidad de agua que ahí circula es la notable biodiversidad presente en la cuenca, al grado de ser considerada una de las más ricas del mundo. Dentro de la cuenca se pueden encontrar zonas de mucha importancia como la Selva Lacandona, que constituye uno de los lugares con más biodiversidad no sólo de México, sino de América Septentrional.



Cuenca del Usumacinta ¹⁷ Fig.11

¹⁷ Mapa desarrollado para el proyecto

4.2 Descripción del Proyecto

La cuenca ha atraído pobladores por distintas razones, y una serie de problemáticas que deben de ser atendidas para conservar la biodiversidad y riqueza natural de la zona. Es por eso que varias organizaciones se reunieron con la finalidad de promover un fortalecimiento de la capacidad local, e impulsar las actividades económicamente viables y ecológicamente favorables para generar un desarrollo sustentable en la región (US-AID, 2011).

En Centro GEO Coronel & Núñez propusieron una hipótesis con la finalidad de detectar y plasmar los patrones de cambio espacial presente en la precipitación, utilizando insumos de TRMM, específicamente el 3B42, ajustados mediante estaciones meteorológicas y climatológicas. Para obtener un producto que apoye la construcción del balance hídrico y aporte datos correspondientes a los fenómenos espaciales de la precipitación (Coronel & Núñez, 2003). En este trabajo se retoma la hipótesis desarrollada y se propone una metodología más eficiente que permite disminuir tiempos y costos de los procesos.

El proyecto derivado de esta hipótesis pretende abarcar la década que corre del año 1998 a 2008 y tiene la finalidad de colaborar con información útil para realizar el balance hídrico en la zona.

Los procesos de la metodología del presente trabajo incluyen la operación y el análisis de los datos obtenidos por el SMN de estaciones con pluviómetro. Con la

información recopilada se determinó que los acumulados de datos correspondientes a 8 días son suficientemente independientes para realizar los cálculos necesarios para obtener un ajuste al producto 3B42 (Coronel & Núñez,2003).De forma complementaria se calcularon los acumulados con el insumo 3B42 del TRMM para períodos de 8 días.

Con los datos homogenizados se procedió a realizar una regresión, mediante la cual se obtuvo un ajuste que reflejaba los patrones espacio-temporales de precipitación en México, correspondientes a la temporada de lluvias para el año 2002.

Para este trabajo se optó por realizar el análisis de la primera temporada de secas del año 2004. Se eligió este año después de evaluar el comportamiento de las precipitaciones entre 1998 y 2008. Ello arrojó que 2004 presentó un ciclo normal, poseedor de dos máximos en cuanto a la precipitación: uno al inicio de la temporada de lluvias, otro al final con una canícula intermedia.

Se optó por trabajar la temporada de secas para evaluar la efectividad de la hipótesis planteada en dicho intervalo de tiempo, es decir, en los tres primeros meses del año.

El interés obedeció a la naturaleza esporádica y dispersa de sus patrones climáticos, los cuales es necesario terminar de analizar y modelar. También se

decidió abordar la problemática del mejoramiento de la metodología instrumentada para la hipótesis, ya que la propuesta original de ésta, al ser de un carácter experimental, descuidaba la eficiencia y el tiempo de procesamiento.

La metodología planteada originalmente basaba el procesamiento de datos provenientes de las estaciones climatológicas mediante el uso de bases de datos tipo MySQL, en las cuales se consumían varias horas para producir los acumulados. Para la generación de acumulados del 3B42 se recurría al procesamiento semi manual organizando la información por periodos de meses, por ejercicio. Esta solución tardaba, a su vez, tiempo adicional considerable.

4.3 El papel de la distancia de la precipitación a la costa en la temporada de estiaje

Como se menciona en el segundo capítulo, la orografía y la distancia a la costa son agentes de vital importancia en la distribución e intensidad de los procesos de precipitación que se llevan a cabo durante la temporada de secas, debido a que las lluvias que se presentan en esta época provienen de sistemas muy débiles y con periodos de vida más cortos, lo que los hace muy susceptibles a ambos factores

Estos agentes deben de considerarse al implementar una hipótesis para la temporada de secas con el fin de reflejar de forma veraz las componentes espacial y de distribución en el caso de estudio.

4.4 Elaboración de la hipótesis

Con la finalidad de obtener un producto calibrado de precipitaciones para la temporada de secas, la hipótesis propuesta en el presente trabajo contempla la integración de datos entre las siguientes fuentes: insumos obtenidos por parte de el Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) –específicamente el 3B42; los registros de precipitación de las estaciones meteorológicas que forman parte de la Red Nacional; y un factor de distancia del lugar de la precipitación a la costa en conjunto con la rugosidad del terreno.

El propósito de la integración de datos es corregir las subestimaciones y las sobrestimaciones en las componentes espacial y de intensidad del fenómeno de la precipitación.

Para producir dicha calibración, en trabajos anteriores se propuso que el fenómeno de la precipitación en México puede ser englobado en unidades de 8 días con la finalidad de que estos acumulados sean independientes, espacio-temporalmente, uno de otro.

Por ello se adoptó la escala de 8 días para la construcción de acumulados en ambas fuentes de datos de precipitación. Se estableció un estándar en la cantidad y calidad de la información utilizada (Núñez & Coronel, 2007), debido a que los registros de precipitación a nivel diario muestran una fuerte correlación entre ellos, directamente proporcional a la cercanía temporal de los mismos.

Al englobar los datos en acumulados se obtiene una unidad de tiempo suficientemente independiente de sí misma en la escala temporal, lo cual facilita la caracterización de los fenómenos ocurridos en el período analizado.

Al proponer una nueva fuente de datos a la hipótesis de Núñez & Coronel que incluya el concepto distancia del sitio de la precipitación a la costa, es necesario que ésta pueda interactuar con el resto de los insumos disponibles, por lo que se construyó una imagen raster mediante un proceso de costo-distancia, estableciendo como factor de costo la rugosidad del terreno, que opera en conjunto con la distancia.

Para el análisis de la precipitación en la temporada de secas, es fundamental tener en cuenta estos factores –distancia a la costa y rugosidad del terreno–, ya que normalmente las lluvias que presentan son resultado de sistemas de huracanes, por lo que el alcance de estas precipitaciones están directamente ligadas a qué tanto del sistema en turno logra penetrar en la parte continental del país. Este insumo permite que la integración de datos produzca modelos más cercanos a la realidad al contemplar de forma integral los agentes involucrados.

Con los tres insumos señalados—3B42, acumulados de estaciones y línea de costa— se realiza una regresión no lineal por intervalos que consiste en la partición de datos tomando en cuenta su similitud y la realización de una regresión lineal para cada juego disponible. Con estas regresiones lineales se logra crear una parte del ajuste; la porción que no se alcanza a modelar, se conoce como residual—conjunto de datos que no alcanzan a ser modelados con la regresión. El

proceso contempla los datos no modelados mediante la interpolación según el método Kriging, el cual permite obtener resultados acertados merced a su construcción matemática que contiene una estructura espacial adecuada.

Con el resultado de la integración y de la interpolación se elaboran coberturas de ajuste que responden a cada juego de datos de la integración por intervalo aplicados a los acumulados de 3B42, con lo cual se corrigen de forma local las estimaciones equivocadas, comúnmente producto de lecturas subestimadas, y se integra la componente espacial. Estos ajustes son evaluados mediante el índice de Moran el cual indica qué tan similares son los resultados respecto de sí mismos, o que tan homogéneo es el ajuste obtenido.

4.5 Hipótesis Propuesta

Mediante la integración de datos del insumo 3B42 del Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), con los datos de las estaciones meteorológicas y con una máscara de costo/distancia de cercanía a la costa ponderada hacia la rugosidad del terreno de la zona precipitada, es posible obtener un producto que refleje la variabilidad en la componente espacial y de intensidad durante la temporada de secas de los sistemas de lluvias.

Para obtener una mejor representación en la escala temporal y operar unidades de tiempo suficientemente independientes se agrupan los datos trihorarios, en caso

del 3B42 y diarios en caso de las estaciones meteorológicas en acumulados de 8 días (Núñez & Coronel, 2007).

La integración de datos se debe realizar mediante un muestreo espacial (puntal) de las estaciones con las dos fuentes de datos disponibles señaladas anteriormente. Posteriormente se efectúa una regresión lineal por segmentos, y la residual resultante se resuelve mediante una interpolación espacial utilizando el método de Kriging.

4.7 Metodología

4.7.1 Elaboración de la propuesta de metodología

La hipótesis propone que se empleen los insumos 3B42 mediante los datos obtenidos en estaciones meteorológicas y climatológicas donde se realicen la integración de datos, con la finalidad de obtener un ajuste en forma de raster que permita compensar las subestimaciones y las sobreestimaciones registradas en el 3B42. Es importante asegurar que la componente espacial sea tomada en cuenta en el estudio del fenómeno.

Para producir dicho ajuste, en trabajos anteriores se demostró que el fenómeno de la precipitación en México puede ser englobado en unidades de 8 días con la finalidad de que estos acumulados sean independientes, espacio-temporalmente,

uno de otro. Por ello se adoptó la escala de 8 días para la construcción de acumulados en ambas fuentes de datos. Se estableció un estándar en la cantidad y calidad de la información utilizada (Coronel & Núñez, 2007), debido a que los registros de precipitación a nivel diario muestran una correlación fuerte entre ellos, directamente proporcional a la cercanía temporal de los mismos. Al englobar los datos en acumulados se obtiene una unidad de tiempo suficientemente independiente de sí misma en la escala temporal, lo cual facilita la caracterización de los fenómenos ocurridos en el período analizado.

Se propuso una nueva fuente de datos que incluye el concepto *distancia de costa*, éste se construye mediante un proceso de costo-distancia, estableciendo como factor de costo la rugosidad del terreno, la cual desempeña un papel secundario. Tener en cuenta estos factores es clave en la temporada de secas para el análisis de la precipitación, ya que normalmente las lluvias que se pueden presentar son resultado de sistemas de huracanes, por lo que el alcance de estas precipitaciones están directamente ligadas a qué tanto del sistema en turno logra penetrar en la parte continental del país. Este insumo permite que la integración de datos produzca modelos más cercanos a la realidad, al contemplar de forma integral los agentes involucrados.

Con los tres insumos señalados—acumulados de estaciones, 3B42, y línea de costa— se realiza una regresión no lineal por intervalos, que consiste en la

partición de datos tomando en cuenta su similitud y la realización de una regresión lineal para cada juego disponible. Con estas regresiones lineales se logra crear una parte del ajuste. Pero la parte que no se alcanza a modelar, se conoce como residual—el conjunto de datos que no alcanzan a ser modelados con la regresión. El proceso contempla los datos no modelados mediante la interpolación según el método Kriging, el cual permite obtener resultados acertados gracias a su construcción matemática.

Con el resultado de la integración y de la interpolación se elaboran coberturas de ajuste que responden a cada juego de datos de la integración por intervalo aplicados a los acumulados de 3B42, con lo cual se corrigen de forma local las estimaciones equivocadas, comúnmente producto de lecturas subestimadas, y se integra la componente espacial. Estos ajustes son evaluados mediante el índice de Moran el cual indica qué tan similares son los resultados respecto sí mismos, o que tan homogéneo es el ajuste obtenido.

4.7.2 Preparación de los datos de estaciones

Se comenzó por analizar las hojas de datos provenientes del SMN, las cuales incluyen, además de datos de precipitación, datos de temperatura, evaporación, velocidad y dirección de viento.

La forma en que se presentan los datos corresponde a archivos de texto, con un renglón inicial que sirve como cabecera para los subsecuentes. En este encabezado

se puede leer siguiente información: el identificador para el origen de los datos, estación que realizó la medición, clave de la variable climatológica registrada, año y mes. Los registros diarios se extienden hacia la derecha en igual cantidad al número de días por mes, acompañado cada registro diario por una bandera que indica la naturaleza del registro.

DATASET I	Station I	COD	YEAR MONTH	VALUE	FLAG1	VALUE	FLAG1	VALUE	FLAG1	VALUE
D	D	E	H	1	1	2	2	3	3	4
29	29041	1	2004-01	3		1		2		1
29	29041	2	2004-01	22		21		21		21
29	29041	3	2004-01	0		-1		0		0
29	29041	5	2004-01	0		0	T	0		0
29	29041	18	2004-01	4.73		3.5		4		2.4
29	29041	30	2004-01	0		0		0		0
29	29041	31	2004-01	0		0		0		0
29	29041	32	2004-01	0		0		0		0
29	29041	43	2004-01	0		0		0		0
29	29041	1	2004-02	-1	T	4		-1		2
29	29041	2	2004-02	19		25		20		19
29	29041	3	2004-02	-2		-2		-1		-2
29	29041	5	2004-02	0		0		0		0
29	29041	18	2004-02	2.85		3.26		6.07		5.19
29	29041	30	2004-02	0		0		0		0
29	29041	31	2004-02	0		0		0		0
29	29041	32	2004-02	0		-99999	M	0		0
29	29041	43	2004-02	0		0		0		0

Formato abierto en Excel Tabla 4

Los datos correspondientes a la lluvia tienen un número de código "5". Éstos pueden presentarse acompañados de una bandera, en cuyo caso indica la presencia de una problemática respecto de la validez del mismo, por lo que se deben ignorar.

Una vez identificada la forma en que están distribuidos los datos de lluvia, se procedió a escribir un programa el cual lee, línea por línea, los registros del archivo que contiene, entre muchos otros, los datos de precipitación.

Los identificadores de precipitación (marcados con “5”) se encuentran, invariablemente, en el tercer registro de cada línea. El programa verifica el contenido del registro, si es diferente de “5” la ignora.

Para los casos en que el valor del tercer registro de cada línea es “5” el programa procede a analizar los registros restantes, es decir, los datos correspondientes al año y mes (separados y almacenados en variables distintas), y los valores diarios de precipitación que son discriminados con base a sus respectivas banderas, si es el caso.

Una vez se cuenta con los datos por día depurados, el programa los exporta a un archivo de salida asignado con formato DatasetID, Estación, Año, Mes, Día y Valor de precipitación. Los datos faltantes se registran con el número -9999 para indicar “no dato”, todo esto separado por comas.

El programa salta, cada vez, a la siguiente línea hasta llegar al final del archivo.

El programa fue diseñado para obtener los datos por año, debido a eso cuenta con los ajustes necesarios para contemplar los años bisiestos.

En seguida se diseñó un segundo programa que se nutre del resultado obtenido a través del programa descrito. Sirve para construir los acumulados de precipitación. Para garantizar la calidad y confiabilidad de la información procesada se estableció la siguiente condicionante de validez: para cada período de

8 días se debe contar con un mínimo del 75% de los valores de precipitación diarios, es decir, 6 o más valores diarios.

De la misma forma que en el programa anterior, éste va leyendo línea por línea, y suma los valores mediante dos contadores, uno que avanza día con día y se detiene al llegar al octavo día; otro que cuenta la cantidad de datos válidos.

Para los casos en que se cuenta con datos válidos para los 8 días, se exporta la suma con el número de acumulado correspondiente. Cuando se cuenta con 6 ó 7 días, se calcula el promedio y se complementa con éste para llegar a los 8 datos necesarios para armar un acumulado que pueda ser exportado junto con su respectivo identificador. Si se obtienen 5 ó menos días, se declara el valor como “no valido” y se imprime el dato con un indicador de “no datos”. Mediante las claves de las estaciones meteorológicas y climatológicas se liga para ubicar su distribución espacial.

Con los datos de acumulados de las estaciones representados espacialmente es posible regionalizar la cobertura de unidades de captación generadas mediante un modelo de elevación del territorio nacional. Establecer regiones es útil debido a que en temporada de secas el fenómeno de la precipitación es más local y esporádico, por lo que se toman las unidades de captación como un parámetro arbitrario para trabajar la zonalidad del fenómeno.

Este archivo de acumulados es trasladado al lenguaje R con el cual se calculan los datos estadísticos: media, promedio, mínimo, máximo, y desviación estándar.

4.7.3 Preparación para los insumos 3B42

Una vez que se cuenta con los acumulados de datos de las estaciones, se procede a generar los acumulados de datos para 3B42 del TRMM. El proceso inicia con la descarga vía FTP de los archivos comprimidos para cada tres horas de la pagina de datos de la misión ¹⁸. Estos archivos vienen comprimidos en un formato Z el cual es nativo de Unix, pero actualmente la mayoría de los clientes de compresión de archivos lo pueden leer y descomprimir. Hecho esto, se almacenan por grupos anuales para evitar la saturación del equipo de cómputo.

Para utilizar estos insumos es necesario realizar una conversión de formato a “.img” además de una rotación, pues éstos se encuentran girados en 90° al norte. Con la finalidad de eficientar el proceso se desarrolló un programa que escribe un script ejecutable desde la línea de comando de una suite geoinformatica.

Más adelante se efectuó una revisión manual de cada insumo con la finalidad de encontrar y eliminar los datos corruptos. Con los archivos depurados se procedió a realizar una lista a partir de la línea de comando de los sistemas operativos basados en Unix. Con esta lista se diseñó un programa que escribeun script para construir los acumulados en la suite geoinformática. Dicho script usa condicionales similares a las utilizadas en el programa equivalente para las estaciones climatológicas, donde se creaban los acumulados de ocho días.

¹⁸ <http://mirador.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/mirador/presentNavigation.pl?tree=project&dataset=3B42:%203-Hour%200.25%20x%200.25%20degree%20merged%20TRMM%20and%20other%20satellite%20estimates&project=TRMM&dataGroup=Gridded&version=006&CGISESSID=03ba303b5ac88af78e12cdfaaf4ee645>

Para llevar a cabo un análisis detallado se re-muestrea el insumo de un píxel de 25km a 1km. De estos insumos se exportan los valores mayores de 3 con la finalidad de separar los sistemas de precipitación significativos de los irrelevantes.

En caso de que se detecten múltiples sistemas de precipitación en el acumulado 3B42, se crean tantos archivos como sistemas para realizar un modelado particular decada uno.

4.7.4 Creación del insumo peso/distancia para la línea de costa-rugosidad

Para integrar el factor de cercanía a la costa se creó una imagen raster que contiene datos de distancia entre el área precipitada y la costa, ponderado la rugosidad del terreno mediante el algoritmo de costo-distancia, ya que, como se menciona en el primer capítulo, la presencia de cuerpos nubosos está ligada a la distancia de cada región al mar, especialmente en la temporada de secas.

4.7.5 Integración de datos

Con los tres insumos —acumulados de estaciones, 3B42, y línea de costa— disponibles, se realiza un muestreo por cada estación para obtener datos del raster de línea de costa y de la imagen del 3B42 del TRMM correspondiente a cada periodo, en cada grupo de sistemas de precipitación que se haya generado.

El resultado de este muestreo es una tabla con los datos de la precipitación registrada en la estación, el valor de la imagen del TRMM, y el cálculo realizado en el raster de la línea de costa. La tabla con estos datos se exporta a un programa de

estadística con la finalidad de calcular una regresión lineal tipo “por rangos” a dos intervalos. Los datos de estaciones meteorológicas y climatológicas constituyen la variable dependiente; la imagen del 3B42 del TRMM y la línea de costa corresponden a variables independientes.

Además de las ecuaciones correspondientes y los intervalos de éstas, el programa regresa una tabla con datos observados, calculados y residuales. Las ecuaciones se exportan a un archivo mediante otro programa escrito expresamente para el proyecto que elabora los scripts que ejecutan las operaciones necesarias con los insumos.

Se utiliza el método de interpolación Kriging para obtener los valores residuales, producto de la diferencia entre el valor registrado del 3B42 y los datos recopilados en las estaciones analizadas.

las regiones definidas con base en los sistemas de precipitación se agrupan de acuerdo con el intervalo de las ecuaciones resultantes de la regresión lineal.

Los rasters de cada ecuación por periodo y la interpolación mediante Kriging se someten a unacondicional la cual asigna sus valores espacialmente de acuerdo con las regiones arriba señaladas.

Debido al enfoque del presente trabajo sobre la Cuenca del Usumacinta, se realizó un recorte a las unidades de captación para seleccionar las correspondientes a la cuenca y se calcularon los datos estadísticos necesarios para analizar el resultado.

Sin embargo, cabe anotar que el ejercicio como tal se realizó a nivel nacional, ya que los fenómenos de precipitación no se limitan a zonas particulares, y para realizar un ajuste preciso hay que tener en cuenta que los fenómenos de precipitación pueden abarcar áreas incluso mayores al territorio nacional.

4.8 Análisis de resultados

Comparando los datos registrados en estaciones meteorológicas y climatológicas contra los datos en 3B42 del TRMM, se aprecia una subestimación considerable por parte de éste. Esta deficiencia se solventó de forma satisfactoria mediante la integración de datos. El resultado obtenido es aceptable pese a las limitaciones impuestas por la calidad y cantidad de los datos disponibles para el proyecto. En los resultados obtenidos se presentan artefactos que podrían suscitar dudas respecto de la validez de los mismos, pero dichos artefactos son producto de la calidad y cantidad de los insumos disponibles, no así de la metodología planteada.

4.8.1 Varianza explicada

En los múltiples periodos analizados se pueden encontrar varianzas explicadas menores de 0.5. Sin embargo, debido a la naturaleza esporádica y puntual de la temporada analizada y a las carencias de los datos, los resultados se pueden considerar satisfactorios. A continuación se enlistan las varianzas explicadas por periodo.

Propuesta de una metodología para la integración de Datos de precipitación: Caso de Estudio la Cuenca del Usumacinta

Varianza	Periodo
0.413408894	2
0.26418114	3
0.605025858	4
0.509854481	5
0.574458452	6
0.228132852	7
0.340741488	9
0.223190642	10
0.648085293	11
0.535779648	12

0.434285875 Promedio

Tabla 5

El promedio de varianza explicada es 0.43. El 40% de los datos tienen una varianza menor a este promedio y el resto de los datos superan el promedio general, algunos de los cuales muestran una varianza explicada hasta del 0.60. A continuación se enlistan los periodos de acuerdo con sus respectivas varianzas explicadas.

Varianza	Periodo
0.223190642	10
0.228132852	7
0.26418114	3
0.340741488	9
0.413408894	2
0.509854481	5
0.535779648	12
0.574458452	6
0.605025858	4
0.648085293	11

Tabla 6

No es posible apreciar una tendencia en la distribución temporal de los resultados, lo que confirma la independencia de los acumulados entre ellos mismos.

Se aprecia que la varianza va desde 0.22 a 0.64, rango bastante amplio debido a la naturaleza esporádica de los patrones de lluvia y la limitada disponibilidad de los datos de estaciones.

4.82 Presentación de resultados

En la esquina superior izquierda de cada hoja de resultados se coloca la integración de datos que corresponde al ajuste del producto 3B42 en representación rasterial. Esta imagen corresponde a la zona de estudio y sus valores se gradúan en una escala de color de amarillo (valores negativos) a rojo (valores positivos). En está en blanco se muestran las zonas que no requieren ajuste, de acuerdo al resultado obtenido. En algunos periodos es posible encontrar presencia de artefactos —zonas de ruido— generalmente debido a la inconsistencia de los datos utilizados para la integración. Éstos son fácilmente reconocibles ya que destacan por su forma geométrica básica y ángulos rectos en su perímetro. También se debe considerar la posibilidad de que la resolución nativa del 3B42, de 25 km, puede permear el ajuste. Este caso se manifiesta mediante figuras cuadradas o rectangulares de buen tamaño.

La representación rasterial se acompaña del histograma, donde se puede apreciar la distribución de los valores del ajuste en el espectro de sí mismo, y de los datos estadísticos correspondientes: mínimo, máximo, media y desviación estándar.

Debajo del conjunto anterior, en la esquina inferior izquierda de la hoja, se muestra el acumulado correspondiente de TRMM ajustado mediante el producto

de la integración representado en el mismo formato del ajuste de amarillo a rojo. Este producto ajustado, dependiendo de qué tan grande haya sido el ajuste, puede conservar o no su resolución original de píxeles de 25 km, aproximadamente. La presencia de artefactos en el ajuste se ve muy disminuida en el producto ajustado, por lo que puede omitirse la existencia de los artefactos. Con el diseño de la primera información, en este caso muestran los datos y un diagrama de puntos donde se aprecia, en el eje de las x, los valores predichos por el ajuste contra los observados en el eje de las y.

En la parte superior derecha de la página se ubica la representación gráfica los datos crudos de 3B42 y de las estaciones meteorológicas y climatológicas expresados a la misma escala y unidad gráfica, con la finalidad de permitir la comparación directa entre ambas fuentes de datos. Normalmente se puede apreciar que el producto obtenido mediante el satélite TRMM registra menos y de forma más sintética la presencia de lluvia, salvo en los casos en que los datos de estaciones son insuficientes. Debajo de cada una representación se encuentran los datos estadísticos de éstas.

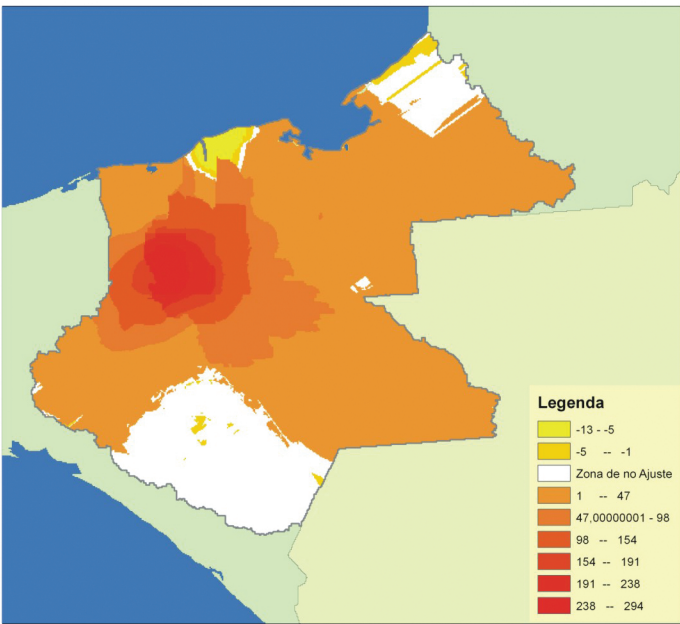
Finalmente, en la parte inferior del lado derecho se plasma la representación del índice Moran. Éste indica la cantidad de autocorrelación entre los mismos datos, para cada periodo. Entre más cercana está la representación gráfica al origen, mayor es la autocorrelación, por lo que en periodos con presencia de artefactos el

índice tendrá valores lejanos al nulo. Este índice se puede considerar como un indicador de la calidad del ajuste hecho en el periodo.

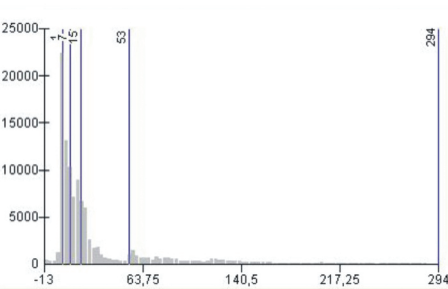
Junto al Índice de Moran se discuten los resultados de cada periodo, y se señalan las características y particularidades de este. Cabe mencionar que no se incluyen el primero ni el octavo periodos, ya que no hubo presencia de precipitación en la región de estudio.

PERIODO 2004 - 02

Ajuste

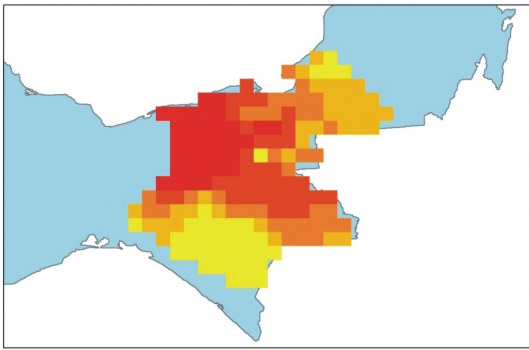


Histograma



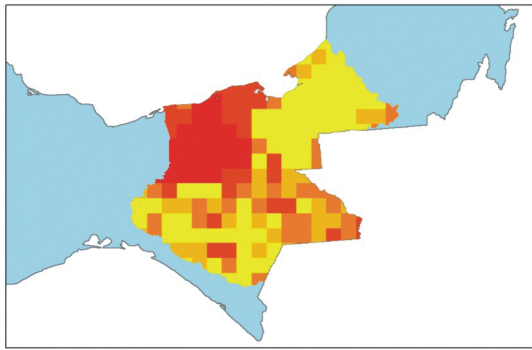
Estadística
Mínimo:-13
Máximo:294
Media:140,5
Des. Estndr:88,911

ESTACIÓN



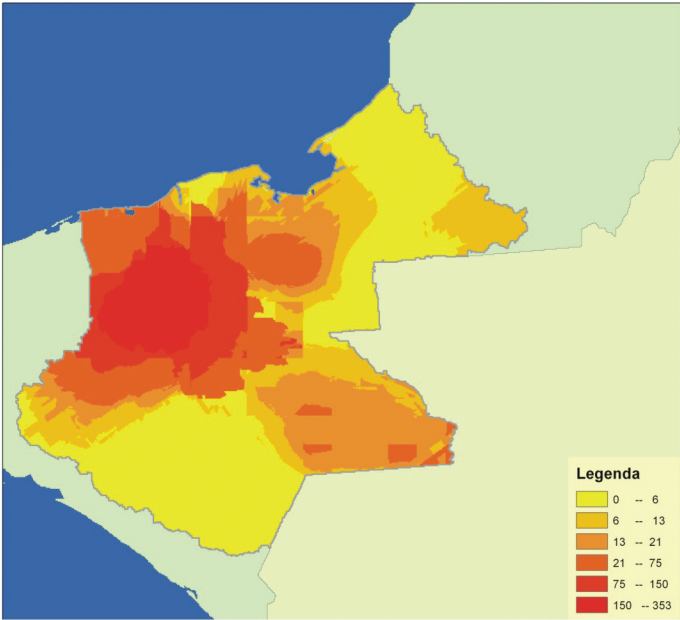
Estadística
Mínimo:0
Máximo:360
Media:68,213
Des. Estndr:72,570

TRMM

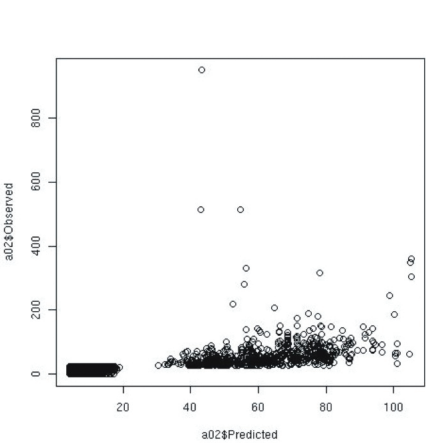


Estadística
Mínimo:0
Máximo:58
Media:19,181
Des. Estndr:14,082

Producto 3B42 Ajustado

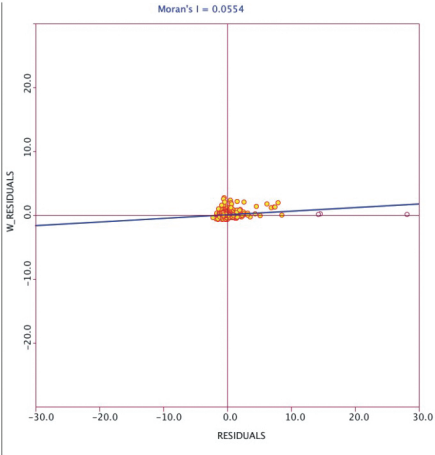


Scatter Plot



Mínimo:0
Máximo:353
Media:171,5
Desb Estnd:105,077

Índice de Moran

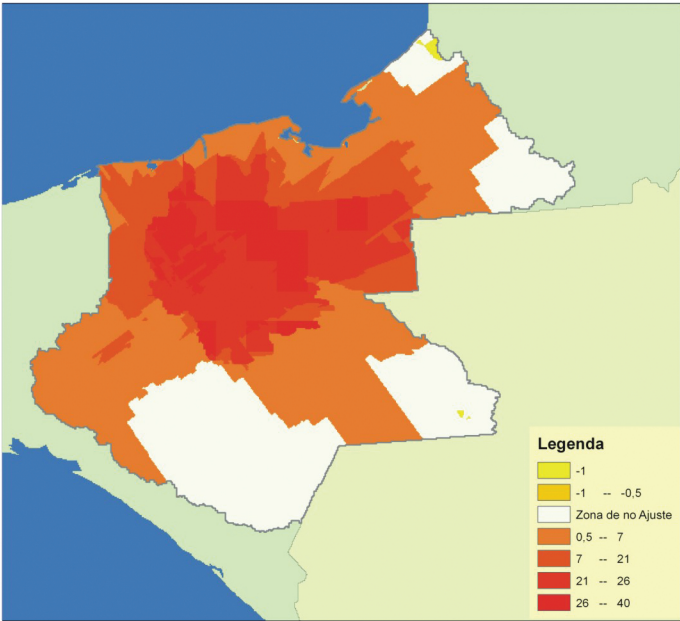


Coclusiones

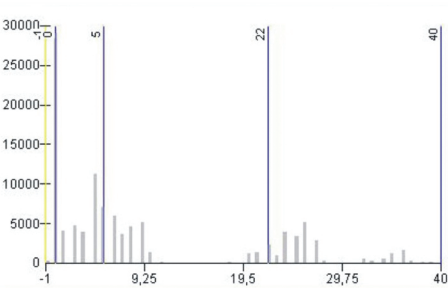
Se observa una subestimación de la imagen satelital con respecto a las estaciones en tierra
nivel cuantitativo considerable, sin embargo en la componente espacial no se aprecian carencias tan grandes como en la parte cuantitativa. El resultado logra
palear estas subestimaciones de forma

PERIODO 2004 - 03

Ajuste

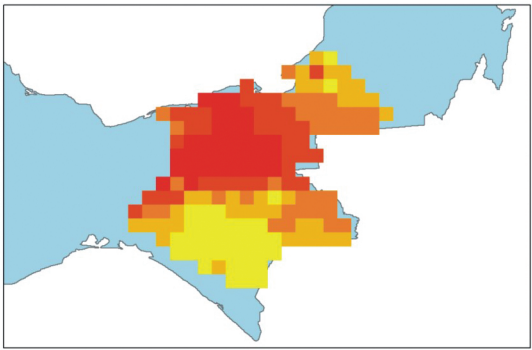


Histograma



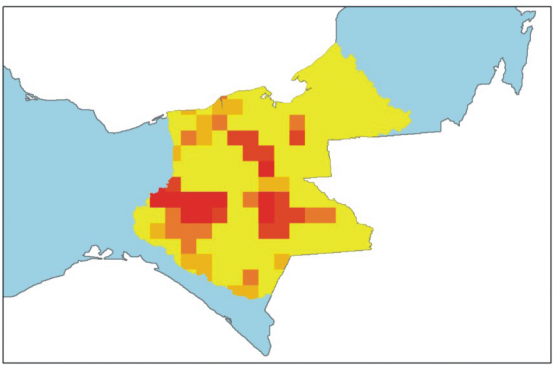
Estadística
Mínimo:-1
Máximo:40
Media:20,33333
Des. Estndr:12,886

ESTACIÓN



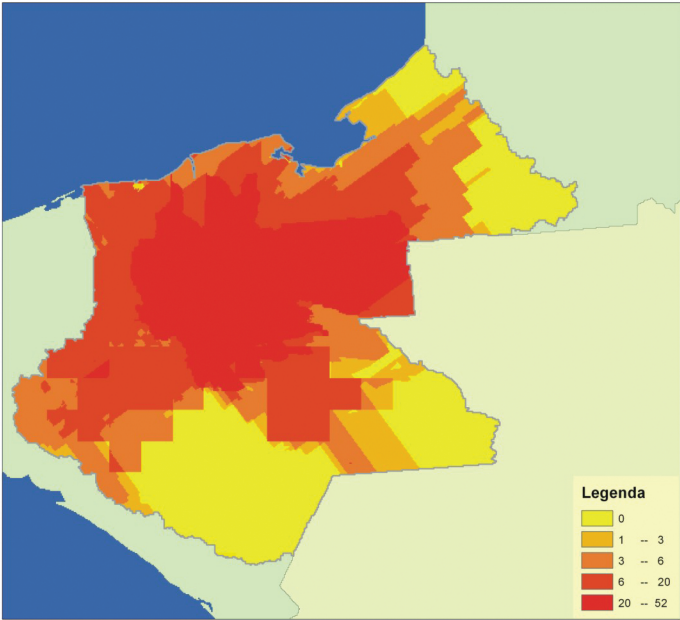
Estadística
Mínimo:0
Máximo:78
Media:25,146
Des. Estndr:18,944

TRMM

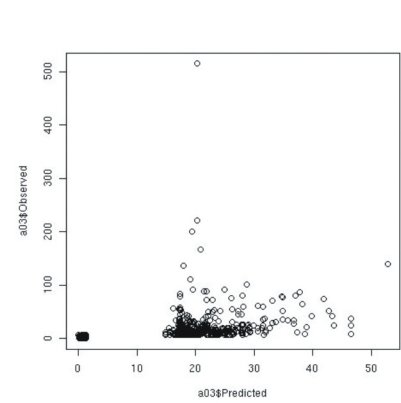


Estadística
Mínimo:0
Máximo:13
Media:6,076
Des. Estndr:3,872

Producto 3B42 Ajustado

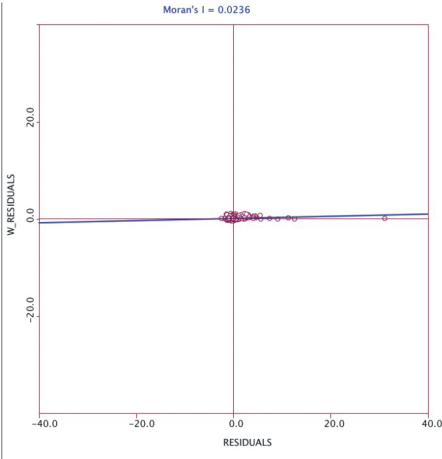


Scatter Plot



Estadística
Mínimo:0
Máximo:52
Media:25,5
Desb Estnd:15,585

Índice de Moran

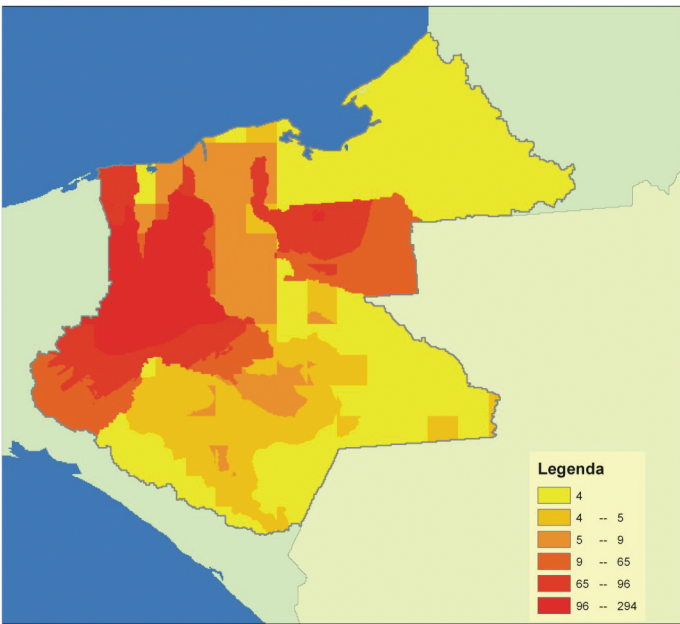


Coclusiones

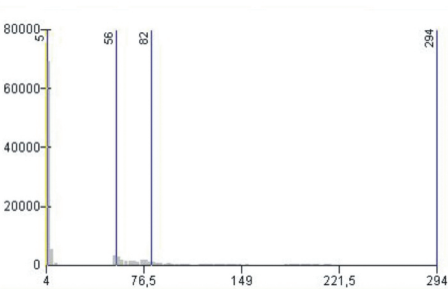
En este periodo se pueden encontrar grandes subestimaciones en ambas componentes, la espacial y la cuantitativa. Sin embargo el resultado considera y logra de manera efectiva solucionar la subestimación de manera efectiva.

PERIODO 2004 - 04

Ajuste

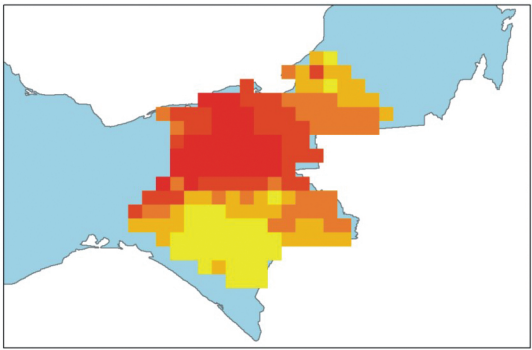


Histograma



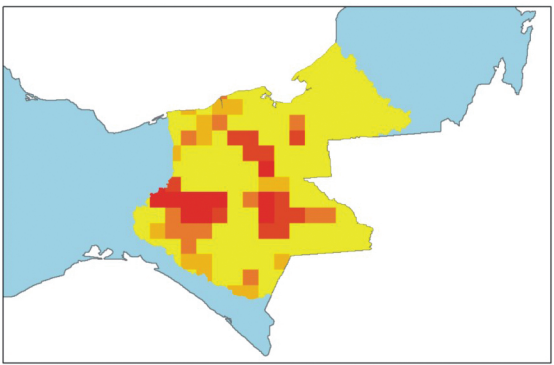
Estadística
Mínimo:4
Máximo:294
Media:165,269531
Des. Estndr:76,201

ESTACIÓN



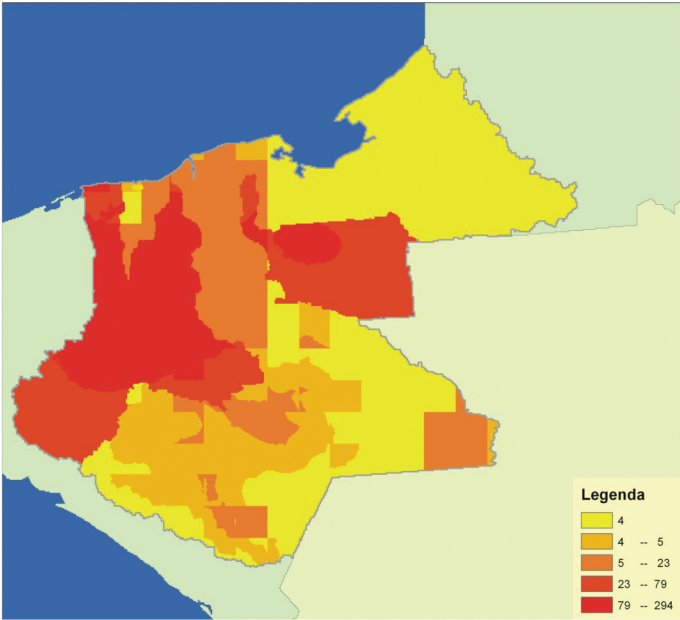
Estadística
Mínimo:0
Máximo:183
Media:91,895
Des. Estndr:53,450

TRMM

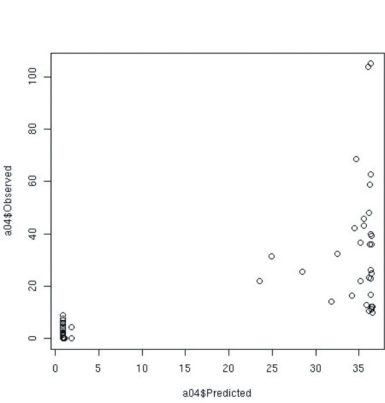


Estadística
Mínimo:0
Máximo:15
Media:6,363
Des. Estndr:4,810

Producto 3B42 Ajustado

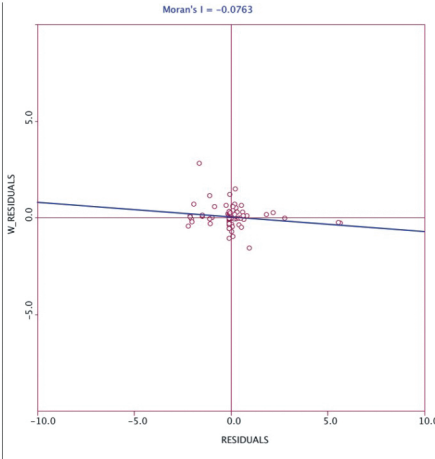


Scatter Plot



Estadística
Mínimo:4
Máximo:294
Media:163,019
Desb Estnd:77,728

Índice de Moran

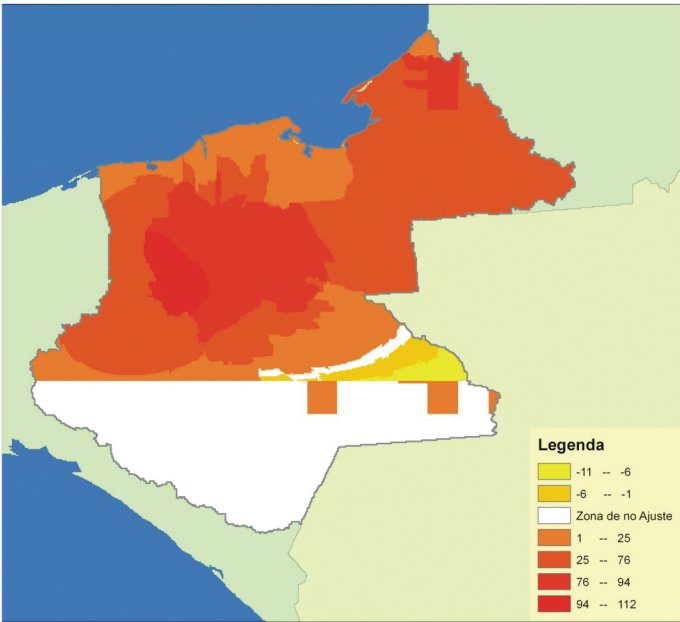


Coclusiones

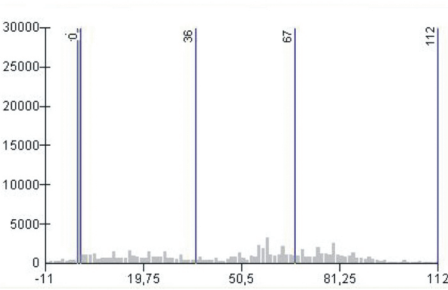
En este periodo se puede encontrar una gran subestimación por parte de la imagen satelital contra su contraparte en tierra. Pero el resultado en general logra de forma parcial llenar los vacíos de la imagen, pero con ciertas limitaciones, ya que hay diferencias muy considerables en los insumos utilizados.

PERIODO 2004 - 05

Ajuste

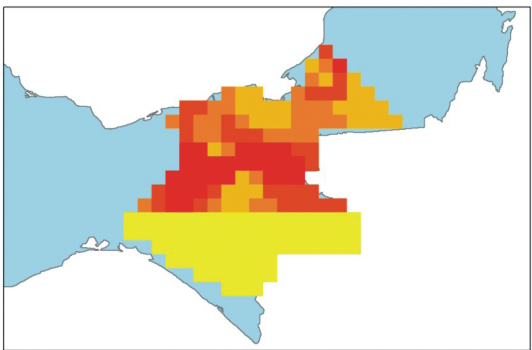


Histograma



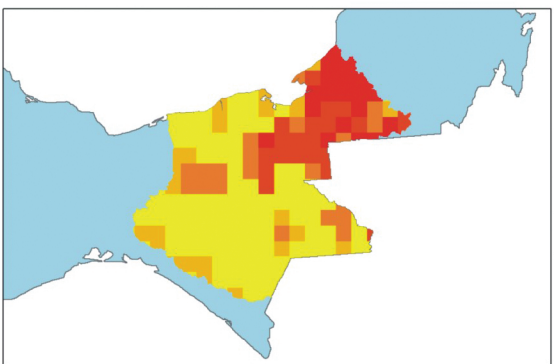
Estadística
Mínimo:-11
Máximo:112
Media:50,5
Des. Estndr:35,794

ESTACIÓN



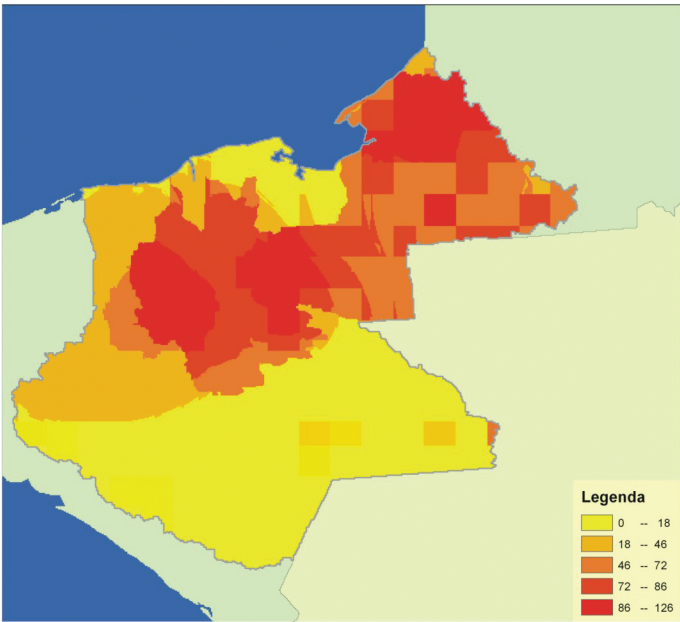
Estadística
Mínimo:0
Máximo:145
Media:62,229
Des. Estndr:30,432

TRMM

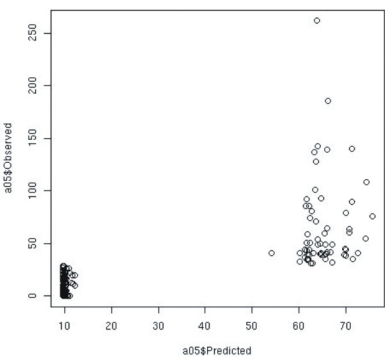


Estadística
Mínimo:0
Máximo:42
Media:16,678
Des. Estndr:11,190

Producto 3B42 Ajustado

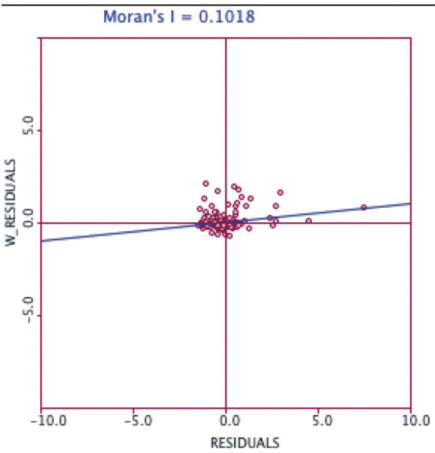


Scatter Plot



Estadística
Mínimo:0
Máximo:126
Media:56,550
Desb Estnd:39,920

Índice de Moran

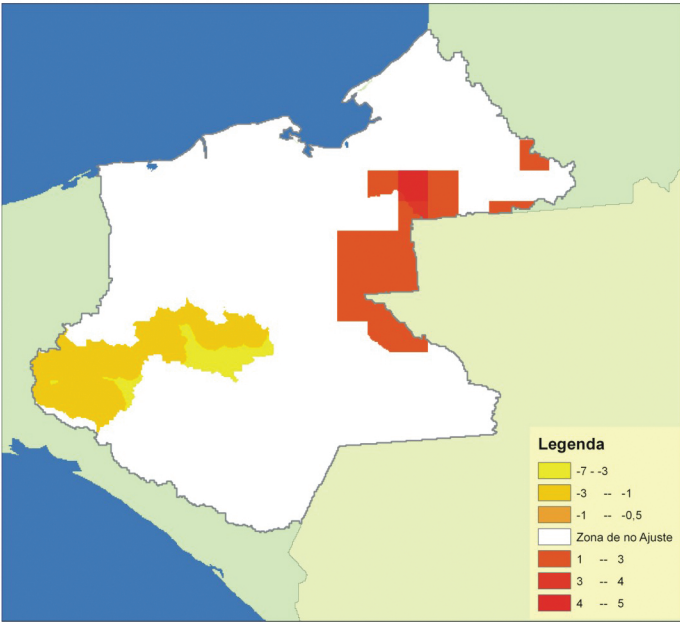


Coclusiones

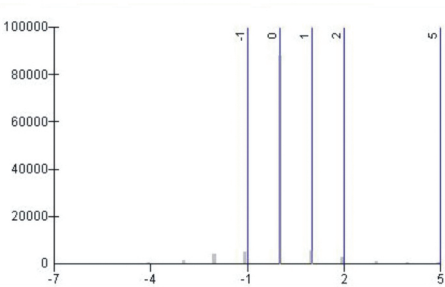
Este periodo demuestra una subestimación considerable en la imagen satelital, sin embargo dada la carencia de datos que existe en la contraparte terrestre no es posible solventarla con el modelo de forma definitiva, sin embargo en las zonas que se encuentran dentro de la cobertura de estaciones se logra hacer un ajuste efectivo en el resultado.

PERIODO 2004 - 06

Ajuste

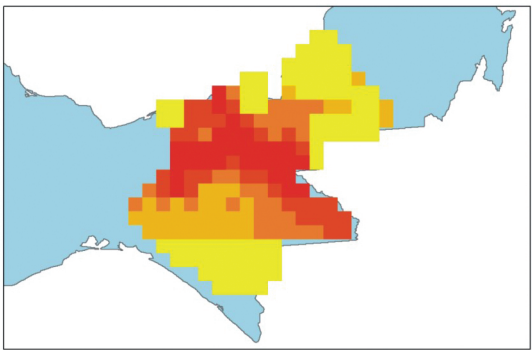


Histograma



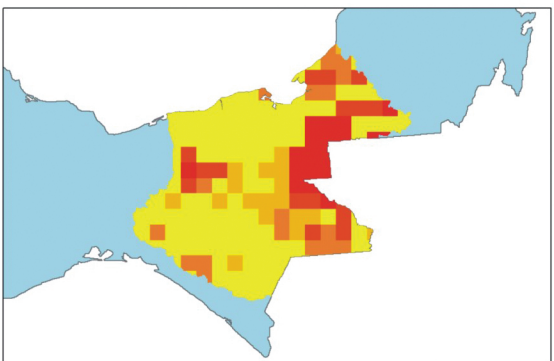
Estadística
Mínimo:-7
Máximo:5
Media:-1
Des. Estndr:3,741

ESTACIÓN



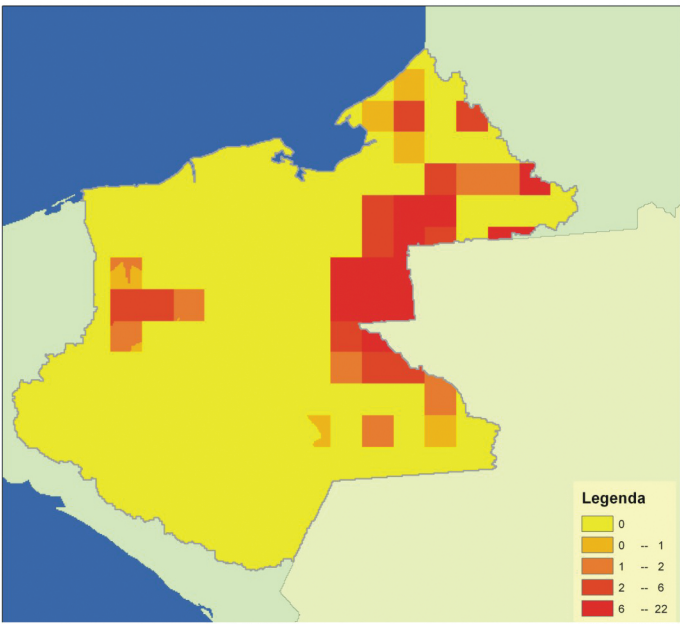
Estadística
Mínimo:0
Máximo:153
Media:48,944
Des. Estndr.:33,164

TRMM

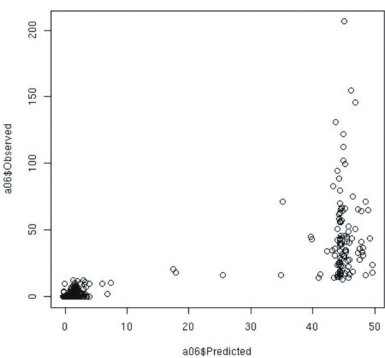


Estadística
Mínimo:0
Máximo:17
Media:6,615
Des. Estndr.:4,812

Producto 3B42 Ajustado

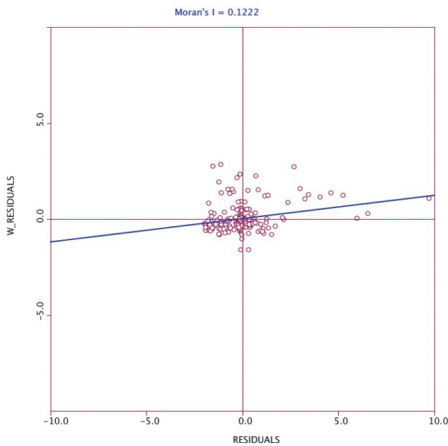


Scatter Plot



Estadística
Mínimo:0
Máximo:22
Media:5,347
Desb Estnd:8,605

Índice de Moran

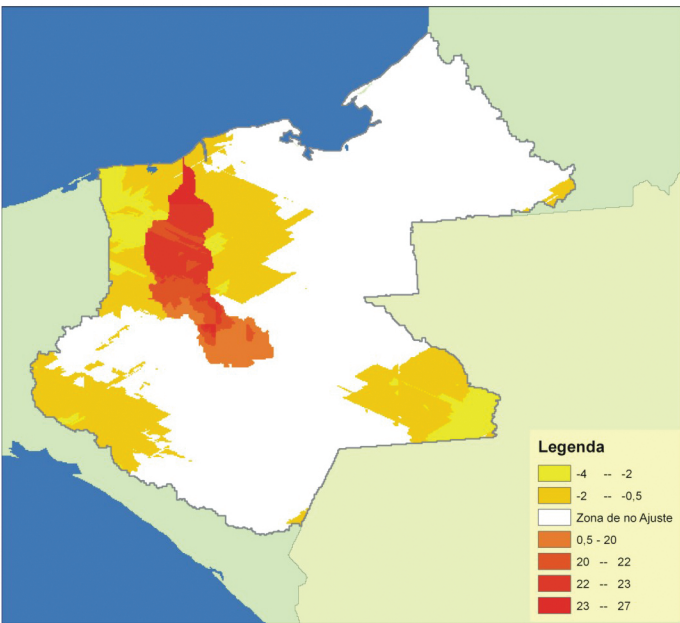


Coclusiones

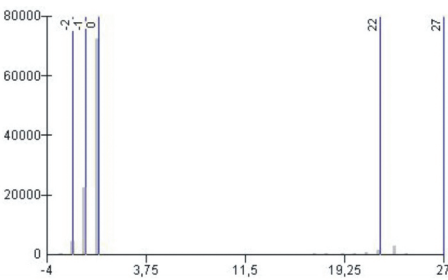
En este periodo se encuentra una gran subestimación por parte de la imagen satelital, tanto en la componente espacial como cuantitativa. Y esta diferencia permea al resultado que si logra complementar y añadir lo faltante. Sin embargo la resolución del TRMMM se traspasa a este.

PERIODO 2004 - 07

Ajuste

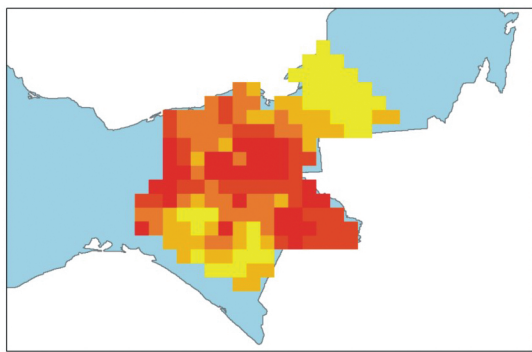


Histograma



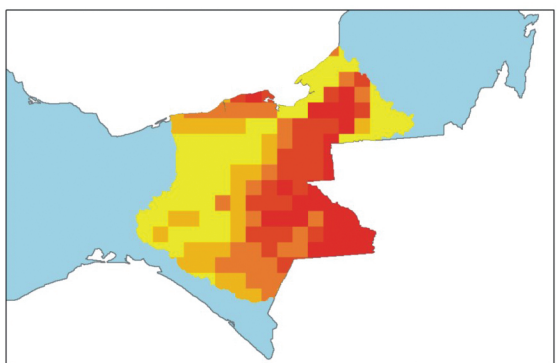
Estadística
Mínimo:-4
Máximo:27
Media:12,166
Des. Estndr:9,154

ESTACIÓN



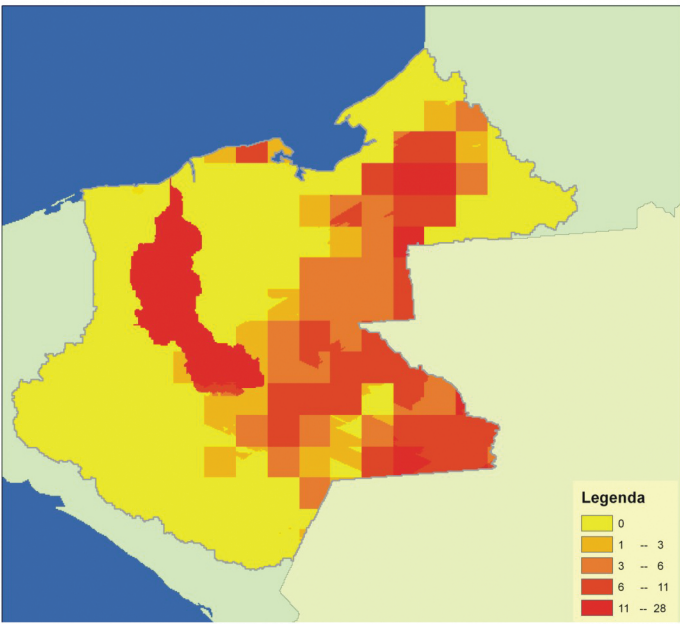
Estadística
Mínimo:0
Máximo:37
Media:9,642
Des. Estndr:9,491

TRMM

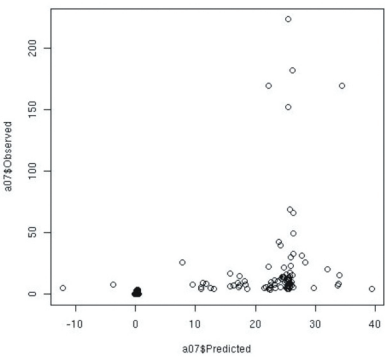


Estadística
Mínimo:0
Máximo:13
Media:6,5
Des. Estndr:4,112

Producto 3B42 Ajustado

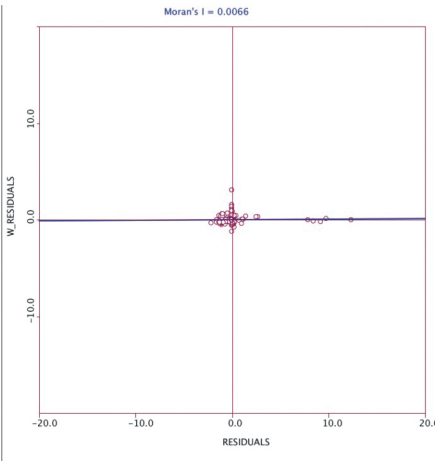


Scatter Plot



Estadística
Mínimo:0
Máximo:28
Media:13
Desb Estnd:8,944

Índice de Moran

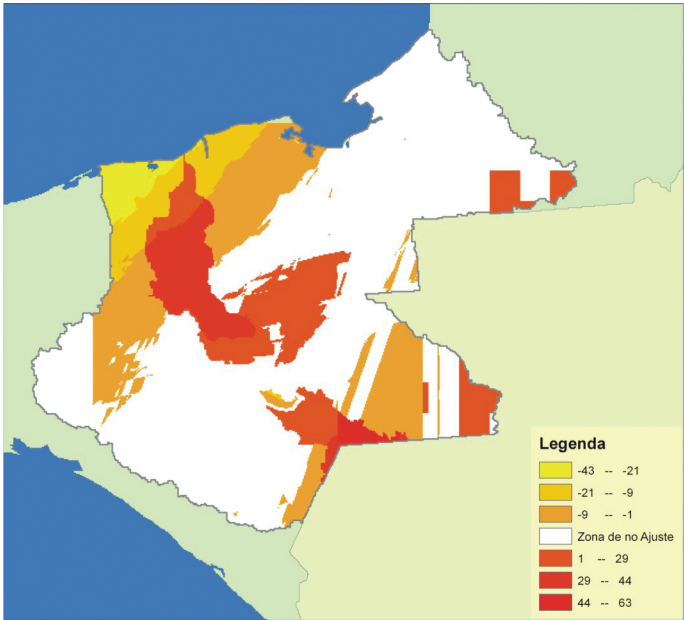


Coclusiones

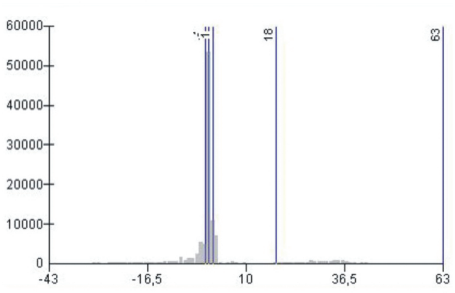
En general para este periodo se puede afirmar que hay una estimación adecuada en general. En la componente espacial sin embargo se detecta en ciertas zonas una subestimación. Sin embargo el modelo logra solventar esta carencia de forma satisfactoria.

PERIODO 2004 - 09

Ajuste

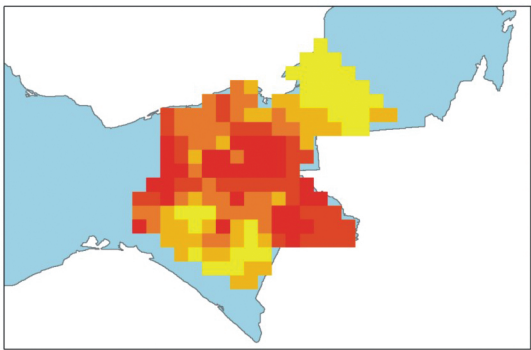


Histograma



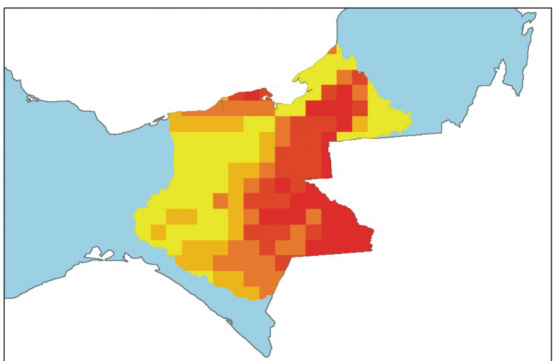
Estadística
Mínimo:-43
Máximo:63
Media:10
Des. Estndr:30,886

ESTACIÓN



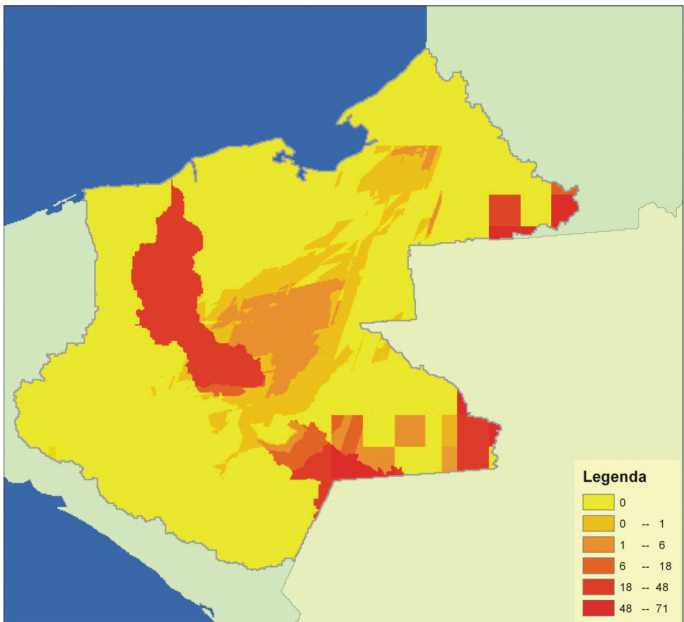
Estadística
Mínimo:0
Máximo:52
Media:18,413
Des. Estndr:14,094

TRMM

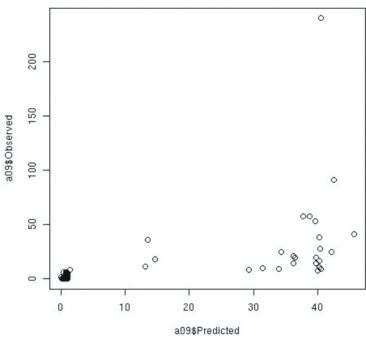


Estadística
Mínimo:0
Máximo:7
Media:3,5
Des. Estndr:2,629

Producto 3B42 Ajustado

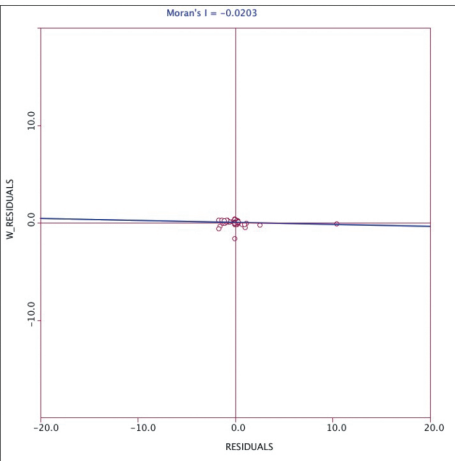


Scatter Plot



Estadística
Mínimo:0
Máximo:71
Media:12,128
Desb Estnd:33,094

Índice de Moran

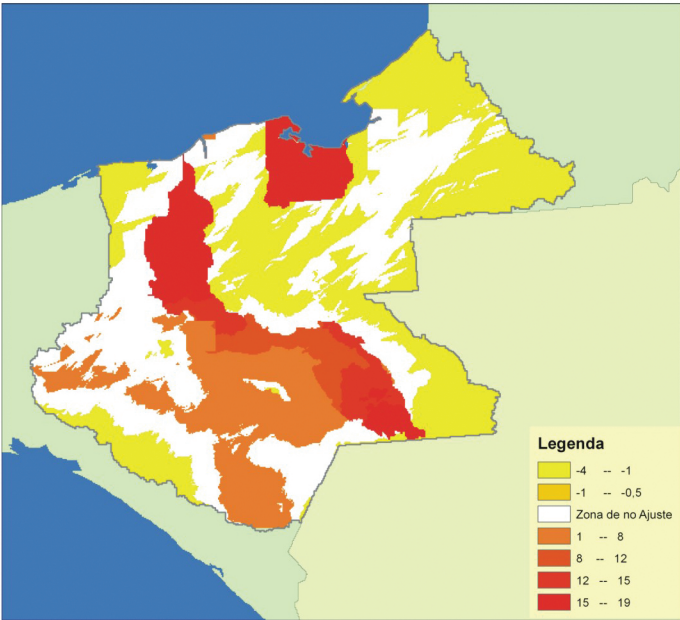


Coclusiones

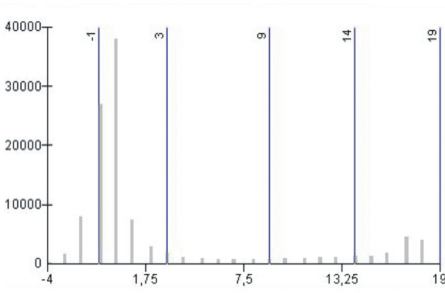
Para este periodo se sigue encontrando una subestimación general tanto cuantitativa como espacial. Y dadas a estas diferencias el modelo logra una corrección parcial, ya que es posible encontrar una serie de artefactos en éste.

PERIODO 2004 - 10

Ajuste

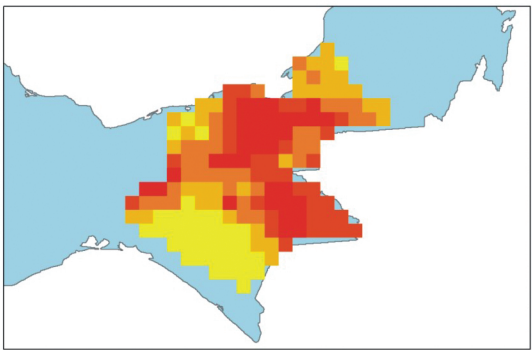


Histograma



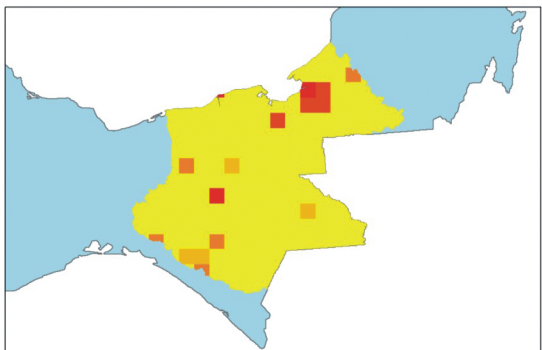
Estadística
Mínimo:-4
Máximo:19
Media:7,5
Des. Estndr:6,922

ESTACIÓN



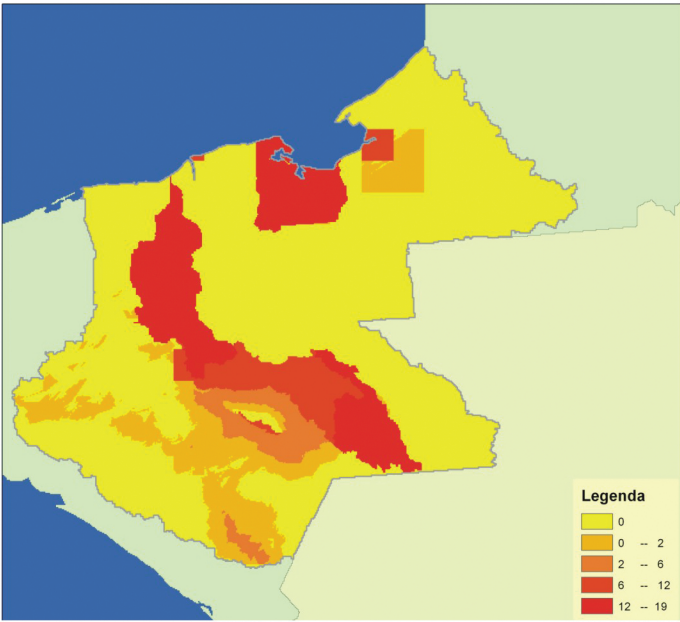
Estadística
Mínimo:0
Máximo:30
Media:11,434
Des. Estndr:7,482

TRMM

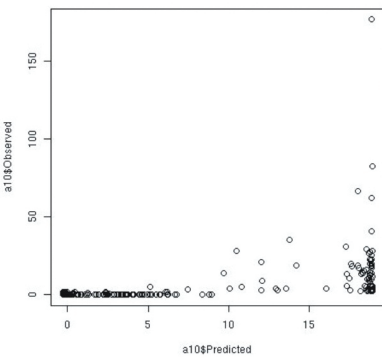


Estadística
Mínimo:0
Máximo:8
Media:3,6
Des. Estndr:3,261

Producto 3B42 Ajustado

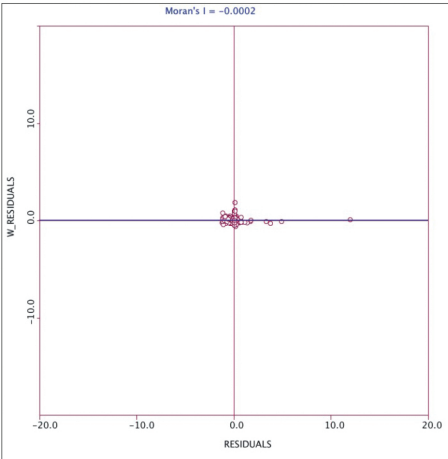


Scatter Plot



Estadística
Mínimo:0
Máximo:19
Media:7,5
Desb Estnd:6,922

Índice de Moran

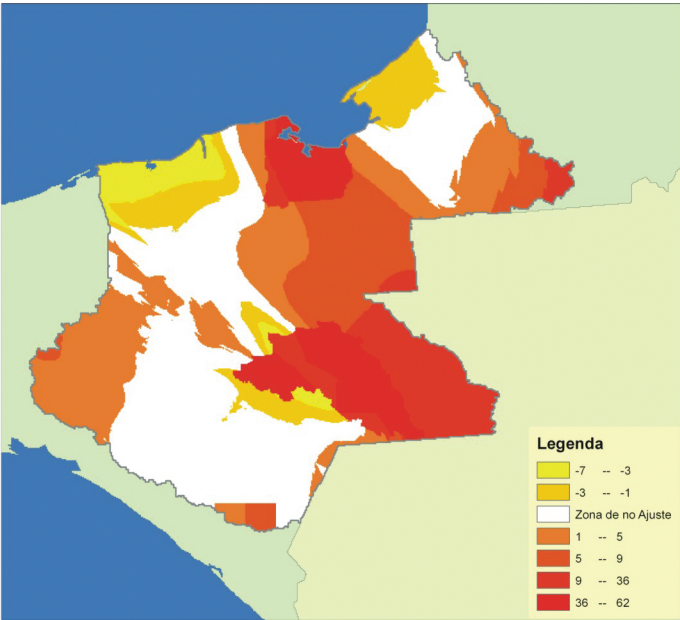


Coclusiones

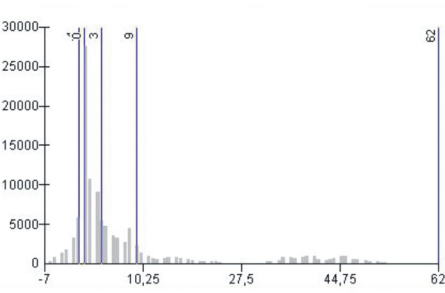
En este periodo se puede apreciar como la imagen satelital subestima de forma considerable la cantidad de lluvia registrada, tanto en la componente espacial como en la componente cuantitativa. Sin embargo, el resultado logra planear la carencia tanto espacial como cuantitativa de manera eficiente.

PERIODO 2004 - 11

Ajuste

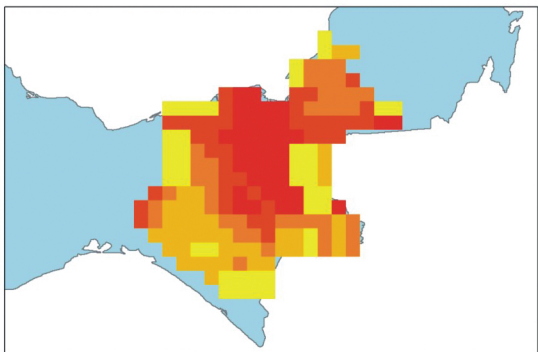


Histograma



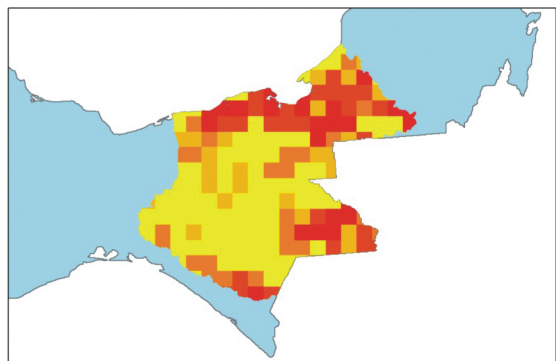
Estadística
Mínimo:-7
Máximo:62
Media:26,09375
Des. Estndr:20,091

ESTACIÓN



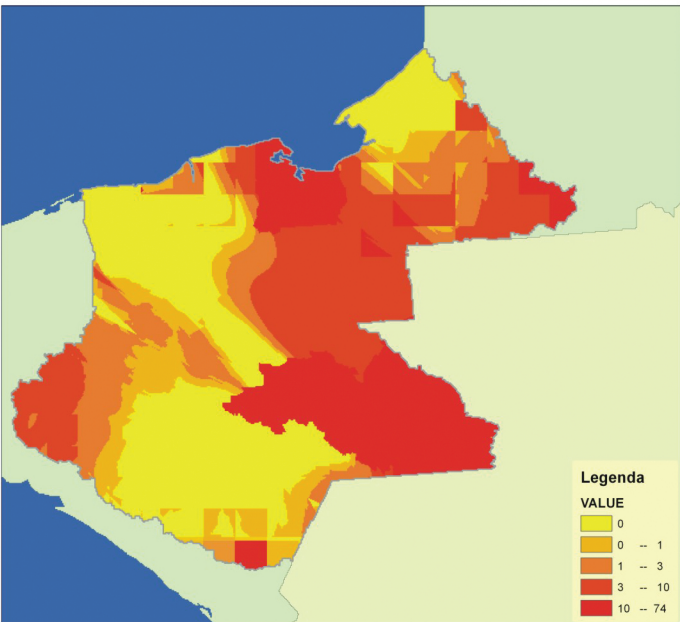
Estadística
Mínimo:0
Máximo:64
Media:25,437
Des. Estndr:16,451

TRMM

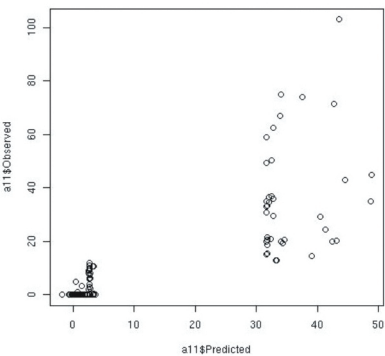


Estadística
Mínimo:0
Máximo:12
Media:5,625
Des. Estndr:3,966

Producto 3B42 Ajustado

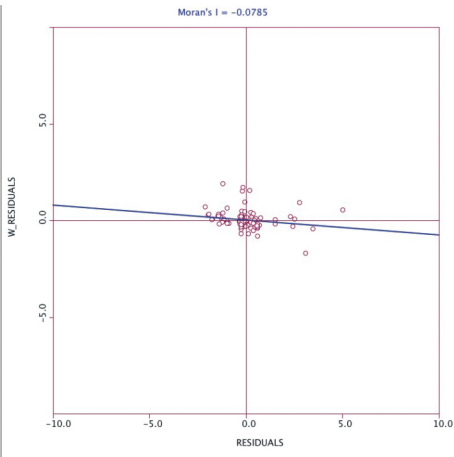


Scatter Plot



Estadística
Mínimo:0
Máximo:74
Media:30,373
Desb Estnd:22,308

Índice de Moran

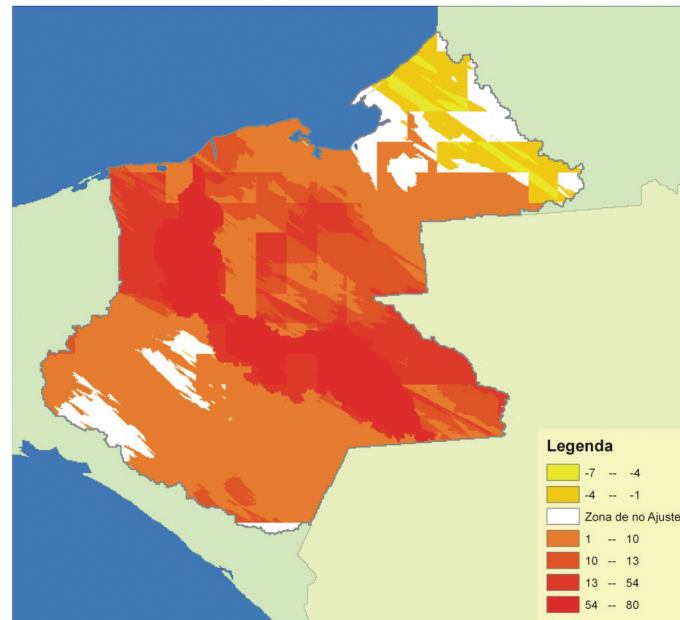


Coclusiones

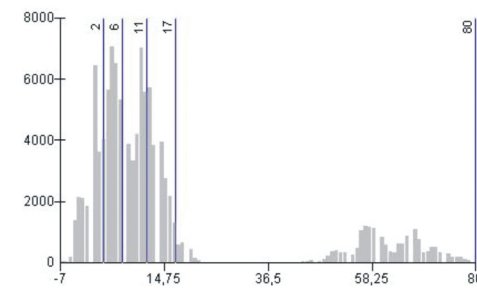
Para este periodo del ejercicio se puede apreciar de nuevo una subestimación por parte del 3B42, y una carencia en la componente espacial, pues no toda la imagen satelital refleja los resultados en tierra. La intensidad también esta subcalculada, de cinco a veces. El modelo logra solventar las insuficiencias encontradas.

PERIODO 2004 - 12

Ajuste

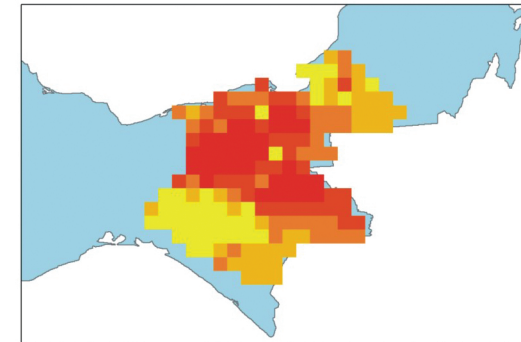


Histograma



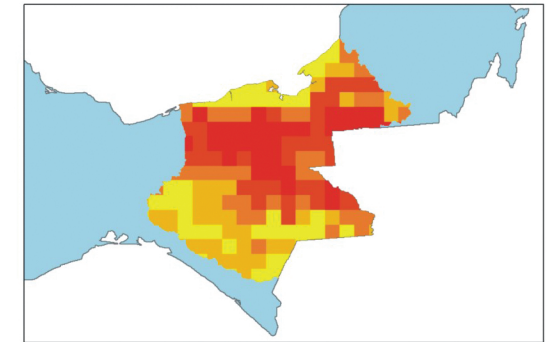
Estadística
Mínimo: -7
Máximo: 80
Media: 37,382
Des. Estándar: 28,667

ESTACIÓN



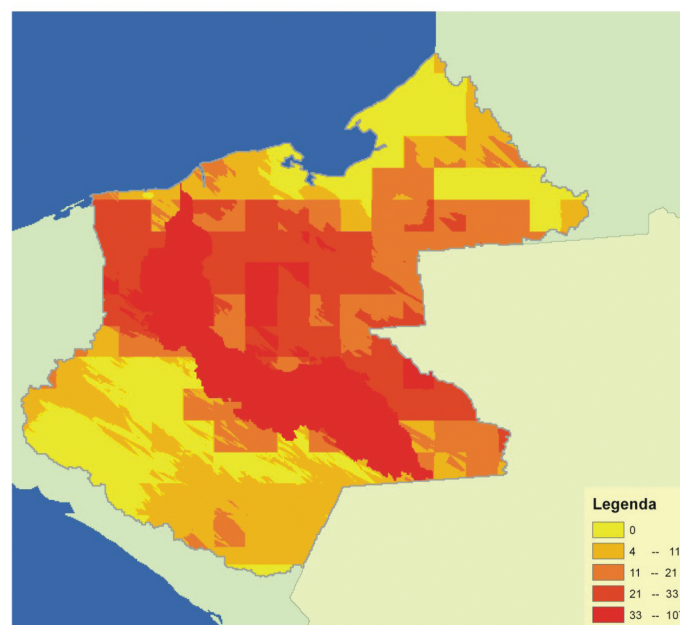
Estadística
Mínimo: 0
Máximo: 159
Media: 33,879
Des. Estándar: 27,061

TRMM

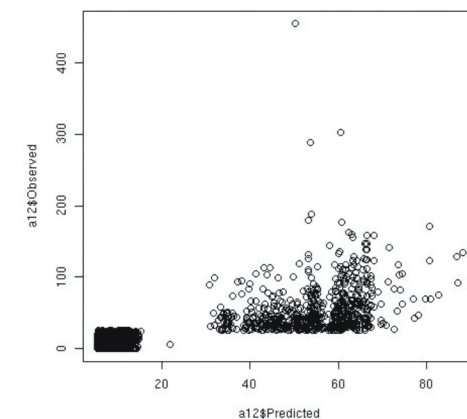


Estadística
Mínimo: 0
Máximo: 28
Media: 14
Des. Estándar: 7,861

Producto 3B42 Ajustado

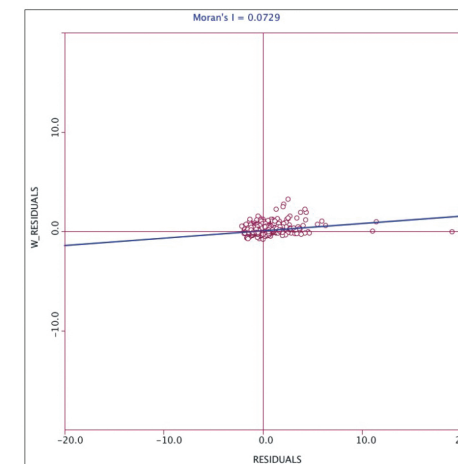


Scatter Plot



Estadística
Mínimo: 0
Máximo: 107
Media: 48,754
Des. Estándar: 32,177

Índice de Moran



Coclusiones

Se puede apreciar una ligera subestimación a nivel general. Sin embargo, también se puede apreciar que la componente espacial sí se ve cubierta a grandes rasos por la imagen satelital. La subestimación viene en la parte cuantitativa que no refleja las cantidades de precipitación registrada. El modelo producido logra detectar y solventar las inconsistencias.

Capítulo 5

Conclusiones

Con la finalidad de exponer con mayor claridad las conclusiones de este trabajo se dividen en tres partes: la hipótesis propuesta, su metodología y el análisis de los resultados.

5.1 Sobre la hipótesis de Núñez y Coronel

La hipótesis propuesta por Núñez & Coronel para calibrar el producto 3B42 durante la temporada de lluvias en México ha incorporado importantes resultados al entendimiento del carácter espacial del fenómeno de la precipitación. No obstante, fue necesario plantear una nueva hipótesis que completara con la temporada de secas para tener, así, un medio para ajustar el 3B42 de forma continua todo el año.

Como se describen en el primer capítulo, estos elementos son de vital importancia para explicar las interacciones entre las nubes y el proceso de formación de gotas de lluvia precipitantes durante la temporada de secas, y cómo la precipitación en esta época tiene mucha más variabilidad que durante el verano.

Es importante mencionar que la hipótesis aquí propuesta contempla elementos decisivos que no eran tomados en cuenta en la hipótesis original, –distancia a la costa y relieve del terreno. Al tomar en cuenta estos elementos se obtiene un mejor entendimiento del proceso de precipitación en su componente espacial y en su componente de intensidad.

Si bien la densidad de datos de estaciones meteorológicas no es la ideal, situación que se conocía de antemano ya que no era equivalente la cantidad de información disponible proveniente del TRMM con la de estaciones meteorológicas, también es cierto que mediante los procesos de integración de datos es posible que ambas fuentes completen los huecos faltantes en diferentes áreas.

También es posible utilizar los datos obtenidos para aplicar un sistema de ingeniería inversa con la finalidad de engrosar la red de observatorios meteorológicos en lugares donde, de acuerdo con el ajuste, haya una mayor prioridad para un mejor registro.

Cabe señalar la posibilidad de integrar otros elementos a la hipótesis que pueden ser de utilidad, por ejemplo, otros tipos de registros meteorológicos — velocidad y dirección de viento y temperatura—, productos geográficos asociados a la climatología —datos sobre regiones climatológicas y regímenes de lluvia— y las coberturas con datos históricos al modelo.

5.2 Sobre la metodología propuesta

Sobre la instrumentación propuesta, es correcto señalar que se cumple de manera evidente el objetivo de mejorar los tiempos y los modos de procesamiento e integración de datos, puesto que se facilita el análisis de los resultados obtenidos y se posibilita visitar los puntos del proceso para modificarlos de ser necesario.

Mediante una técnica de interpolación sencilla es posible subsanar las carencias que metódicamente aparecen en los insumos de trabajo, como son las zona del territorio sin cobertura de estaciones meteorológicas, o los paquetes trihorarios corruptos 3B42 provenientes del TRMM. Dicha interpolación queda establecida en la metodología propuesta. Sin embargo, este proceso genera ruido en las series de tiempo interpoladas y lo suma a las aberraciones presentes en el fenómeno mismo.

Para evitar esta primera interpolación, por parte de los datos en tierra, es necesario engrosar la red de observatorios meteorológicos a nivel nacional, con la finalidad de contar con mejores insumos en tierra que permitan solventar las carencias en otros productos utilizados y se obtengan resultados más confiables.

En caso de engrosarse la red, se obtendría una mayor disponibilidad de datos, no sólo sobre lluvia precipitada sino también de datos provenientes del 3B42. El método de integración punto a punto que se utiliza en el presente trabajo iguala la cantidad de muestras tomadas del 3B42 con la cantidad de estaciones meteorológicas disponibles para el estudio.

Una recomendación en cuanto al tipo de paquetería utilizada en el proyecto es migrar de software comercial a software de código abierto, con la finalidad de contar con un recurso que atienda de forma integral las necesidades de adaptación y procesamiento del proyecto, ya que en numerosas ocasiones se encontraron deficiencias en el software comercial, las cuales sólo era posible solventar realizando pasos adicionales a los establecidos en el diagrama de trabajo. Para llevar a práctica esta recomendación será indispensable ampliar la capacitación de los miembros del equipo de investigación.

También es importante remarcar los frutos de escribir programas en diferentes lenguajes de programación, pues esto facilita considerablemente la implementación de procesos automáticos. Mediante el empleo de esta estrategia de procesamiento es posible acortar los tiempos y recursos necesarios para el desarrollo de la investigación.

En cuanto a la posible evolución de éste y, en general otros trabajos afines, se alienta a los interesados a cuidar el esmero en la escritura de los programas generados, con el fin de seguir la línea de bajo consumo de recursos y ahorro de tiempo. Así mismo, se debe mantener un orden claro en el manejo de los archivos.

5.3 Sobre los resultado obtenidos en este ejercicio

Se obtuvieron resultados satisfactorios para los datos espacio-temporal disponibles, tomando en cuenta que se trata de un ejercicio inicial con fines demostrativos, enmarcado en un proyecto de escala mucho mayor.

Desde el inicio del proyecto quedó claro que el resultado esperado presentaría limitantes, debido a la insuficiente cantidad y calidad de los datos disponibles para una temporada que, de suyo, resulta de difícil análisis.

Aunado a dicha dificultad se debe agregar que la zona de estudio se ubica en la cercanía de dos océanos que experimentan diferentes fenómenos climáticos, los cuales influyen directamente en los patrones de precipitación registrados.

Sin embargo, el método de integración de datos en conjunto con el método de interpolación espacial de Kriging, logra dar un resultado acertado, ya que considera adecuadamente la escala de intensidad y la distribución espacial de la precipitación. Cabe mencionar que se optó por emplear el método de Kriging debido a que incluye una sólida estructura espacial tal y como se describe en el capítulo 3.

Si bien se encontraron varios artefactos espaciales en los resultados, éstos son reflejos directos de la calidad y riqueza de los insumos utilizados, por lo que es recomendable que en futuros ejercicios se cuide la naturaleza de los datos y se

exploren otras formas de enriquecerlos donde se encuentren faltantes que afecten la calidad del producto final.

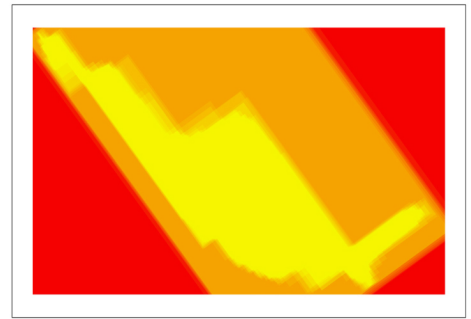
La varianza explicada no es superior en promedio al 0.5, pero se acerca lo suficiente para considerarla válida. Sin embargo, estos resultados permitirán realizar correcciones y mejoras a la hipótesis propuesta.

Anexos

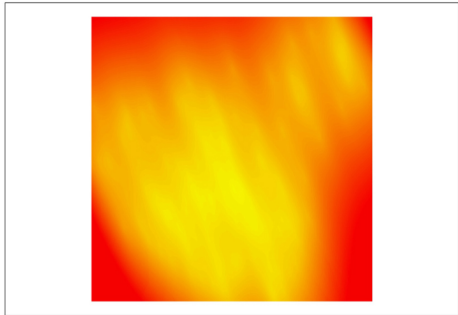
- **Resumen de resultados de Kriging periodo**
- **Resumen de el Error calculado por periodo**



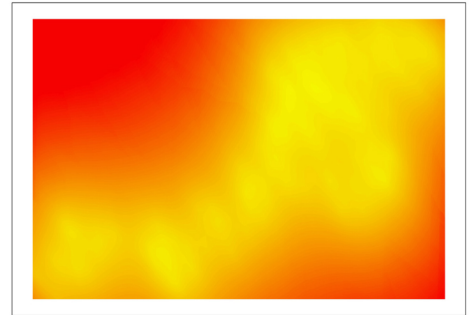
Periodo 2004 - 02.jpg



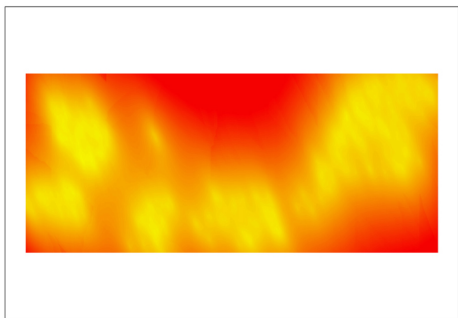
Periodo 2004 - 03.jpg



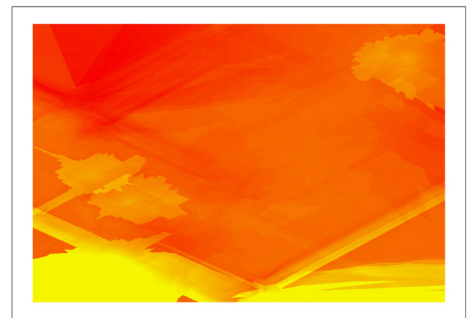
Periodo 2004 - 04.jpg



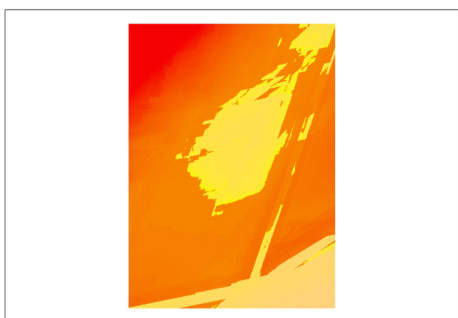
Periodo 2004 - 05.jpg



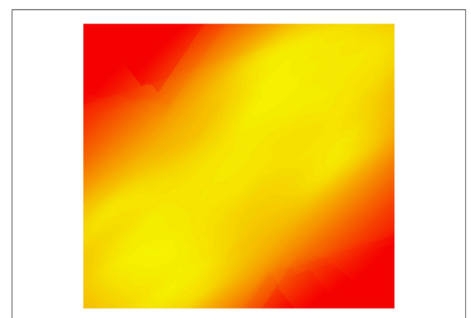
Periodo 2004 - 06.jpg



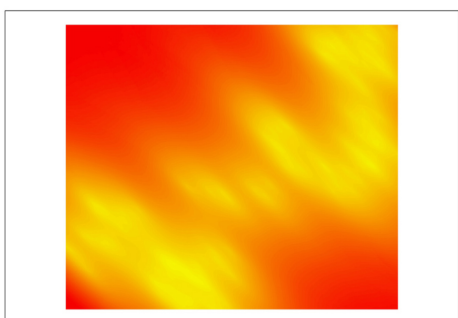
Periodo 2004 - 07.jpg



Periodo 2004 - 09.jpg



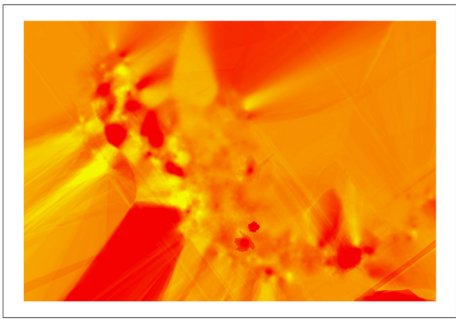
Periodo 2004 - 10.jpg



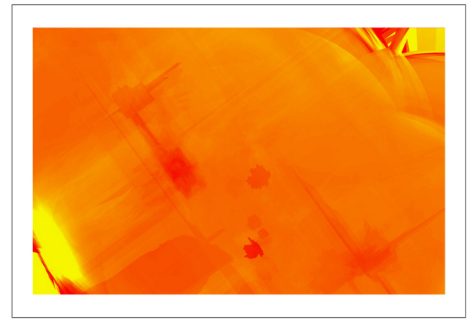
Periodo 2004 - 11.jpg



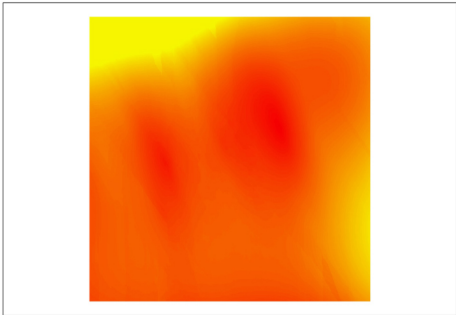
Periodo 2004 - 12.jpg



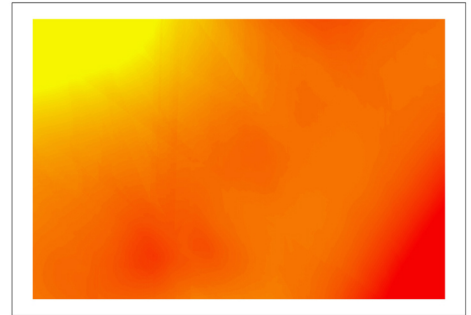
Periodo 2004 -02.jpg



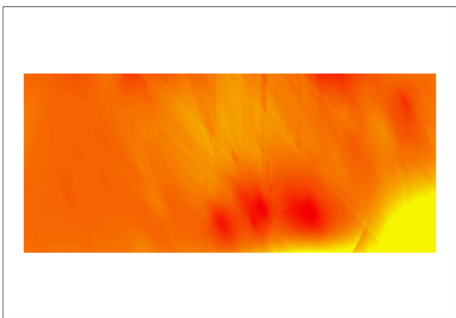
Periodo 2004 -03.jpg



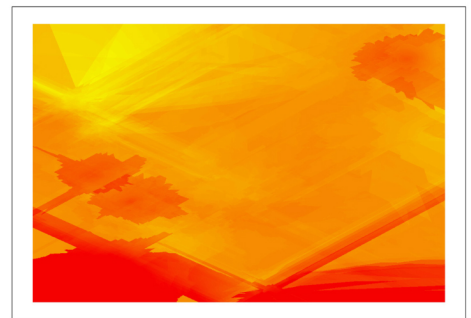
Periodo 2004 -04.jpg



Periodo 2004 -05.jpg



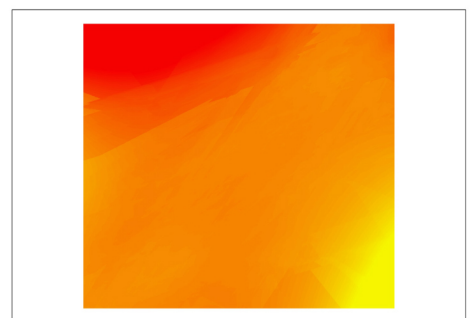
Periodo 2004 -06.jpg



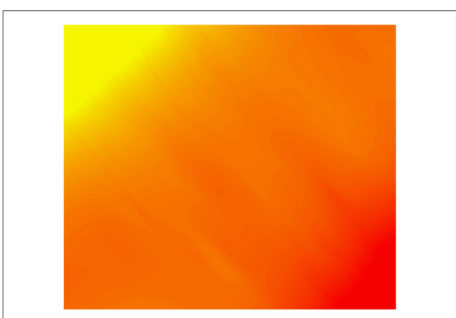
Periodo 2004 -07.jpg



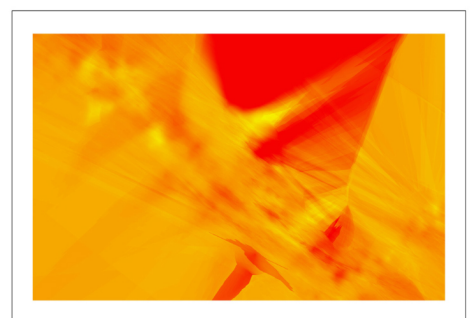
Periodo 2004 -09.jpg



Periodo 2004 -10.jpg



Periodo 2004 -11.jpg



Periodo 2004 -12.jpg

Bibliografía

Anselin, L., 1995. Local indicators of spatial association-LISA. *Geographical Anal.* 27.

Chuvienco Salinero, 2008(2002) *Teledetección Ambiental*- Editorial Ariel, S.A. (Paginas 18-22)

Coronel, Claudia - Spatio-temporal patterns of fraccional vegetation cover and land surface temperature for monitoring the water balance. 32nd International Symposium on Remote Sensing of Environment. *Sustainable Development Through Global Earth Observations*. June de 2007, San José, Costa Rica.

Coronel. C. & Nuñez J.M. Evaluation of the sources of information for monitoring and extracting spatio-temporal patterns of precipitation in Mexico. 32nd International Symposium on Remote Sensing of Environment. *Sustainable Development Through Global Earth Observations*. June de 2007, San José, Costa Rica.

Cressie N.A.C. (1986) Krigin Nonstationary Data. *Journal of the American Statistical Association*, N 81.

Enriqueta García - Distribución de la Precipitación en la Republica Mexicana, 1979-UNAM IGG

Fotheringham, S., 1999. Guest editorial: local modeling. *Geographical Environ. Modeling*

Frederick Lane IDC: World Created 161 Billion Gigs of Data in 2006 "IDC: World Created 161 Billion Gigs of Data in 2006"

Garreaud & Meruane (2005) *Instrumentos Meteorológicos y Humedad Atmosférica*. Universidad de Chile

Gil Olcina & Olcina Cantos -*Climatología Básica*, 1999 –Editorial Ariel S.A.

Haining, R., 1990. *Spatial Data Analysis in the Social and Environmental Sciences*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Hernández Cerda et al. - Los Ciclones Tropicales de México 2002–UNAM IGG

Hernández Cerda et al. -Mitos y Realidades de la sequía en México 2007- UNAM IGG

http://www.esa.int/SPECIALS/MSG/SEMH4FULWFE_0.html - NASA

Journel A.G. & Huijbregts, (1978) Mining geostatistics. Academic Press, London

Lawson, A.B., Kulldorff, M., 2000. A Review of Cluster Detection Methods in Disease Mapping and Risk Assessment for Public Health. Wiley,

Matheron G, (1971) The Theory of regionalized variables and its applications. Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique, No 5 Paris: Ecole de Mines de Paris.

Maurizio Lenzerini. "Data Integration: A Theoretical Perspective" 2002

NASA - www.nasa.gov/

NASA - Earth Science Reference Handbook

NASA - THE EARTH OBSERVING SYSTEM AQUA

NASA – EOS Data Products Handbook

NASA 2011 - aqua.nasa.gov

NASA 2011 - eos.nasa.gov

Nina Siu-ngan Lam - An evaluation of areal interpolation methods - Ohio State University

Oliver and Hidore,. Climatology an atmospheric science, 2nd ed. Upper Saddle River, 2002, NJ: Prentice-Hall.

Patrick Ziegler and Klaus R. Dittrich. Three Decades of Data Integration - All Problems Solved In 18th IFIP World Computer Congress (WCC 2004),

Sánchez- Estudio de climatología comparada con aplicaciones a la Republica Mexicana, 1929 – Instituto de Geografía, Universidad Nacional.

SCIENCE WRITERS' GUIDE TO TERRA – NASA

Ann Henderson-Seller & Peter . Robinson, Contemporary Climatology, Lognman Scientific & Technical. 1986

Sevruk, B. and L. Zahlavova, 1994: Classification system of precipitation gauge site exposure: Evaluation and application. International Journal of Climatology, 14(b),

Slovak Hydrometeorological Institute and Swiss Federal Institute of Technology, 1993: Precipitation measurement and quality control. Proceedings of the International Symposium on Precipitation and Evaporation (B. Sevruk and M. Lapin, eds) (Bratislava, 20–24 September 1993), Volume I, Bratislava and Zurich.

Stein A. Spatial Interpolation Doctoral thesis , Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.

Graham Summer, Precipitation Process and análisis, John Wiley & Sons. 1988

T.S. Kelso 1998 Basics of the Geostationary Orbit.
<http://celestrak.com/columns/v04n07/>

Tobler - A Transformational View of Cartography, 1979

Tonglin Zhang & Ge Lin. 2006 A decomposition of Moran's I for clustering detection Computational Statistics & Data Analysis 51 (2007)

US-AID, Programa para el Manejo de la Cuenca del Río Usumacinta para el Desarrollo Económico con Sustentabilidad Ambiental,2011 (En Proceso de Publicación)

Webster, R., (1985) Quantitative spatial analysis of soil in the field. In B.A. Stewart (ed.) Advances in soil science 3. Springer Verlag, New York.

World Meteorological Organization, 1998: WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison: Final Report (B.E. Goodison, P.Y.T. Louie and D. Yang) Instruments and Observing Methods Report No. 67, WMO/TD-No. 872, Geneva.
