

**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS HURACANES EN LA  
PRECIPITACIÓN DEL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA**

**JORGE ANDRÉS MENESES MARÍN  
JULIÁN DAVID RUEDA ACEVEDO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICO-MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2005**

**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS HURACANES EN LA  
PRECIPITACIÓN DEL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA**

**JORGE ANDRÉS MENESES MARÍN  
JULIÁN DAVID RUEDA ACEVEDO**

Trabajo de Grado para optar el título de  
Ingeniero Civil

**Director  
JORGE ALBERTO GUZMÁN JAIMES  
Ingeniero Civil, MCs**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2005**

A Dios por la vida,

A mis padres por su ejemplo,

A Juancho (mi ángel) y demás familiares fallecidos,

A mis tías por su apoyo,

A Lissette por la motivación,

A mis hermanas, amigos, profesores y compañeros.

JORGE ANDRÉS

A Dios por brindarme la oportunidad de alcanzar esta meta,

A mis padres por su valioso ejemplo,

A Claudia por su incondicional compañía y motivación,

A mis hermanas, profesores y a mis amigos.

JULIÁN DAVID

## **AGRADECIMIENTOS**

Expresamos nuestros sinceros agradecimientos a:

El IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) y a la NOAA (National Oceanic Atmospheric Administration) por suministrar los datos y la información necesaria para la realización de este proyecto.

La Universidad Industrial de Santander, por brindarnos la oportunidad de formarnos como profesionales íntegros.

Nuestros profesores, por sus enseñanzas y orientaciones que permitieron llevar a cabo nuestra formación profesional.

El profesor, Jorge Alberto Guzmán Jaimes, por brindarnos incondicionalmente sus enseñanzas, apoyo y amistad.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. CICLONES TROPICALES Y HURACANES	3
1.1. INTRODUCCIÓN	3
1.2. LOCALIZACIÓN	3
1.3. CICLONES TROPICALES	10
1.4. HURACANES	14
1.4.1. Estructura de los huracanes	15
1.4.2. Factores para la formación de huracanes	16
1.4.3. Evolución del huracán	16
1.4.4. Estructura del viento de un huracán	17
1.5. INFORMACIÓN SOBRE CICLONES TROPICALES	19
1.5.1. Cálculo de distancias entre la zona de estudio y los puntos de ocurrencia de huracanes	22

2.	PRECIPITACIÓN	26
2.1.	INTRODUCCIÓN	26
2.2.	LOCALIZACIÓN	26
2.3.	PRECIPITACIÓN	28
2.3.1.	Información sobre precipitación	29
2.3.2.	Factores globales que influyen en la precipitación de Bucaramanga	31
2.4.	PRECIPITACIÓN GENERADA POR HURACANES	37
3.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	43
3.1.	INTRODUCCIÓN	43
3.2.	VARIABLES	43
3.2.1.	Variables representativas de la precipitación	43
3.2.2.	Variables representativas de los huracanes	44
3.3.	MÉTODO ESTADÍSTICO A EMPLEAR	44
3.4.	APLICACIÓN DEL MÉTODO	46
3.5.	LIMITANTES DEL MÉTODO EMPLEADO	46

3.5.1. Comparación de series de poca extensión	47
3.5.2. Variabilidad en la duración de eventos	47
3.5.3. Las series a comparar deben tener igual número de datos	47
3.6. SOLUCIÓN PROPUESTA AL PROBLEMA ANTERIOR	47
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	49
4.1. INTRODUCCIÓN	49
4.2. PROCESO DE ANÁLISIS	49
4.2.1. Relación entre distancia total y precipitación	49
4.2.2. Relación entre velocidad del viento y precipitación	50
4.2.3. Relación entre proyecciones (EW, NS) y precipitación	50
4.2.4. Otras relaciones	51
4.3. RESULTADOS	52
4.3.1. Relación entre distancia total y precipitación	52
4.3.2. Relación entre velocidad del viento y precipitación	62
4.3.3. Relación entre proyecciones (EW, NS) y precipitación	62

4.3.4. Otras relaciones	65
5. ANÁLISIS DEL NÚMERO DE MANCHAS SOLARES Y EL SOI CONTRA EL NÚMERO DE CICLONES TROPICALES.	69
5.1. INTRODUCCIÓN	69
5.2. MANCHAS SOLARES Y NÚMERO DE CICLONES TROPICALES	69
5.2.1. Análisis de covarianza	70
5.3. SOI Y NÚMERO DE CICLONES TROPICALES	72
5.3.1. Análisis de covarianza	74
CONCLUSIONES	79
RECOMENDACIONES	82
BIBLIOGRAFÍA	83

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Desplazamiento de los Ciclones tropicales en el Océano Atlántico.	4
Figura 2. Huracán Faith insertado en la Península Escandinava en estado de depresión Extra-tropical.	5
Figura 3. Huracán Dolly, que pasó del Océano Atlántico al Pacífico.	5
Figura 4. Mapa de trayectoria de ciclones tropicales en el Océano Pacífico para el año 2003.	6
Figura 5. Huracán Mitch formado a 689 Km. de la ciudad de Bucaramanga.	7
Figura 6. Huracán Joan que atravesó la península de la Guajira a 558.8 Km. de Bucaramanga.	8
Figura 7. Imagen satelital del ciclón tropical (Huracán Mitch) en el hemisferio norte.	11
Figura 8. Mapa de trayectoria de ciclones tropicales en el Atlántico para el año 2003.	13
Figura 9. Fotografía del ojo de un Huracán.	15
Figura 10. Reportes (Huracán Gustav).	21
Figura 11. Comparación de las formas reales y de referencia de la tierra.	24
Figura 12-a. Ubicación Global del área de evaluación de precipitación.	27
Figura 12-b. Detalle de la Ubicación de la ciudad de Bucaramanga.	27
Figura 13. Ubicación de las estaciones para la parte alta y baja en la zona de estudio.	31

Figura 14.	Inundaciones en Girón ocurridas el 12 de febrero de 2005.	34
Figura 15.	SCM sobre Colombia, 5 de junio del 2003.	35
Figura 16.	Proyecciones Este-Oeste, Norte-Sur para el Huracán Lili, (Océano Atlántico, 24 Sep-04 Oct/2002) en el día 25 de Septiembre.	51

## LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Número de huracanes ocurridos por año en el Océano Pacífico.	9
Gráfica 2. Número de huracanes ocurridos por año en el Océano Atlántico.	9
Gráfica 3. Comportamiento del viento y la presión durante el paso del Huracán Kile.	18
Gráfica 4. Variaciones en el tiempo de la Velocidad y Presión de un Huracán al entrar a tierra.	19
Gráfica 5. Huracanes anuales (Atlántico) vs. Precipitación promedio anual parte baja.	39
Gráfica 6. Huracanes anuales (Pacífico) vs. Precipitación promedio anual parte baja.	39
Gráfica 7. Huracanes anuales (Atlántico y Pacífico) vs. Precipitación promedio anual parte baja.	39
Gráfica 8. Precipitación promedio anual total para la parte alta (1972-2003).	40
Gráfica 9. Huracanes anuales (Atlántico) vs. Precipitación promedio anual parte alta.	40
Gráfica 10. Huracanes anuales (Pacífico) vs. Precipitación promedio anual parte alta.	41
Gráfica 11. Huracanes anuales (Atlántico y Pacífico) vs. Precipitación promedio anual parte alta.	41
Gráfica 12. Relación Distancia –Precipitación diaria parte baja, huracán Hazel.	54

Gráfica 13. Relación Distancia–Precipitación diaria parte baja, huracán Jeane.	54
Gráfica 14. Relación Distancia –Precipitación diaria parte baja, huracán Edith.	55
Gráfica 15. Relación Distancia–Precipitación diaria parte baja, Depresión Tropical Ana.	56
Gráfica 16. Relación Distancia–Precipitación diaria parte baja, huracán Joan.	56
Gráfica 17. Relación Distancia–Precipitación diaria parte baja, huracán Mitch.	57
Gráfica 18. Relación Distancia–Precipitación diaria parte baja, huracán Trudy.	59
Gráfica 19. Relación Distancia–Precipitación diaria parte baja, huracán John.	60
Gráfica 20. Relación Distancia–Precipitación diaria parte baja, huracán Enrique.	61
Gráfica 21. Relación Distancia–Precipitación diaria parte baja, Depresión Tropical Miriam.	61
Gráfica 22. Coeficientes de Covarianza negativos entre proyecciones (NS y EW) y precipitación (parte baja) para varios retrasos o lags, en el Océano Atlántico.	64
Gráfica 23. Coeficientes de Covarianza negativos entre proyecciones (NS y EW) y precipitación (parte baja) para varios retrasos o lags, en el Océano Pacífico.	66
Gráfica 24-a. Número de eventos de precipitación (parte baja) en días de ciclones tropicales (1950-2003), Océano Atlántico.	67
Gráfica 24-b. Número de eventos de precipitación (parte baja) en días de ciclones tropicales (1950-2003), Océano Atlántico.	67
Gráfica 25-a. Número de eventos de precipitación (parte baja) en días de ciclones tropicales (1950-2003), Océano Pacífico.	68

Gráfica 25-b. Número de eventos de precipitación (parte baja) en días de ciclones tropicales (1950-2003), Océano Pacífico.	68
Gráfica 26. Variación del número de manchas solares en el tiempo	70
Gráfica 27. Relación anual entre manchas solares y el número de ciclones en el Atlántico.	71
Gráfica 28. Relación anual entre manchas solares y el número de ciclones en el Pacífico.	72
Gráfica 29. Índices de Oscilación del sur (SOI) desde 1876 hasta 2004.	73
Gráfica 30. Relación del Índice de Oscilación del Sur con el número de ciclones tropicales en el Océano Atlántico.	75
Gráfica 31. Relación del Índice de Oscilación del Sur con el número de ciclones tropicales en el Océano Pacífico.	76

## LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Escala Saffir-Simpson.	12
Cuadro 2. Promedio anual de huracanes formados en el mundo	14
Cuadro 3. Datos del Huracán Gustav organizados por la NOAA.	21
Cuadro 4-a. Estaciones hidrológicas de la parte baja de la cuenca para la zona en estudio.	29
Cuadro 4-b. Estaciones hidrológicas de la parte alta de la cuenca para la zona en estudio.	30
Cuadro 5-a. Número de Ciclones tropicales ocurridos durante eventos ENSO en el Atlántico y Pacífico.	77
Cuadro 5-b. Número de Ciclones tropicales ocurridos durante eventos No ENSO en el Atlántico y Pacífico.	77

## RESUMEN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS HURACANES EN LA PRECIPITACIÓN DEL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA<sup>1</sup>

**AUTORES:** JULIÁN DAVID RUEDA ACEVEDO  
JORGE ANDRÉS MENESES MARÍN<sup>2</sup>

**PALABRAS CLAVES:** Influencia, huracanes, ciclones tropicales, precipitación, covarianza.

En zonas tropicales como en la que se sitúa Colombia, son muchos los factores que pueden generar precipitaciones en determinada región. Uno de esos factores es la formación, desarrollo y desplazamiento de los ciclones tropicales y huracanes en los Océanos Atlántico y Pacífico, cuyas aguas están en contacto con éste país.

Se sabe que estos ciclones, además de desarrollarse plenamente en los océanos, pueden afectar las regiones costeras con sus fuertes vientos y enormes precipitaciones, lo cual produce innumerables desastres socio-económicos, incluyendo la pérdida de vidas humanas.

Sin embargo, no se tiene claridad de cómo podrían afectar estos sistemas atmosféricos el régimen de precipitación de una zona más al interior del país como la ciudad de Bucaramanga.

En este proyecto se realiza una evaluación de la forma como los ciclones tropicales del Atlántico y del Pacífico pueden influir en dicho régimen, mediante relaciones de covarianza entre algunas variables propias de los ciclones (como la velocidad de sus vientos, su distancia al punto de evaluación y las componentes de su distancia) y las series de tiempo de precipitación de algunas estaciones de la zona. Estos procedimientos se complementan con análisis de cada evento y con otras relaciones concernientes a los ciclones, como la cantidad de manchas solares y el Índice de Oscilación del Sur enfrentadas también con los registros de precipitación de la zona.

---

<sup>1</sup> Proyecto de Grado.

<sup>2</sup> Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Ing. Jorge Alberto Guzmán Jaimes.

## ABSTRACT

**TITLE:** THE EVALUATION OF THE HURRICANE'S INFLUENCE IN THE PRECIPITATION OF THE METROPOLITAN AREA OF BUCARAMANGA CITY<sup>1</sup>

**AUTHORS:** JULIÁN DAVID RUEDA ACEVEDO  
JORGE ANDRÉS MENESES MARÍN<sup>2</sup>

**KEY WORDS:** Influence, hurricanes, tropical cyclones, precipitation, covariance.

In tropical areas as in the one that Colombia is located, there are many factors that can generate precipitations in certain zone. One of those factors is the formation, development and displacement of the tropical cyclones and hurricanes in the Oceans Atlantic and Pacific, whose waters are in contact with this country.

It's known that these hurricanes, besides being developed fully in the oceans, they can affect the coastal regions with their strong winds and enormous precipitations, that which produces countless socio-economic disasters, including the loss of human lives.

However, one doesn't have clarity of how these atmospheric systems could affect the regime of precipitation of an area located in the interior of the country, like the city of Bucaramanga.

In this project an evaluation is carried out, about the way like the tropical hurricanes in the Atlantic and in the Pacific Oceans can influence in this regime, by means of covariance relationships among some characteristic variables of the hurricanes (as the speed of their winds, their distance to the evaluation point and the components of their distance) and the precipitation time series of some stations in the area of evaluation. These procedures are supplemented with analysis of each event and with other concerning relationships to the hurricanes, as the quantity of sunspots and the South Oscillation Index, also faced with the precipitation registrations of the area.

---

<sup>1</sup> Bachelor's Final Project.

<sup>2</sup> Universidad Industrial de Santander, Physical-Mechanical Sciences Faculty, Civil Engineering.  
Director: Eng. Jorge Alberto Guzmán Jaimes.

## INTRODUCCIÓN

Numerosos factores geográficos y atmosféricos son los causantes de que en un lugar cualquiera se produzca precipitaciones. Hasta ahora se han realizado varias investigaciones a nivel nacional e internacional con el fin de establecer las relaciones entre muchos de esos factores y el régimen de lluvias de una zona determinada, o incluso la interdependencia entre estos mismos.

En Bucaramanga se tiene un régimen de lluvias con una tendencia temporal específica (bimodal), aunque regularmente se registran precipitaciones en cualquier día del año. Se ha descubierto que el régimen bimodal en esta zona del país se debe principalmente al doble paso de la Zona de Convergencia Intertropical; sin embargo, la segunda época de lluvias del año coincide con la temporada en que en los océanos Atlántico y Pacífico se producen los ciclones tropicales, a cuya fase más evolucionada se le llama “huracán”. En época de huracanes se puede apreciar además que en ésta zona del país se presenta alta nubosidad.

Se pretende entonces, por medio de la presente investigación, evaluar de qué forma pueden estar influyendo estos fenómenos, provenientes tanto del Océano Atlántico como del Pacífico, en los registros de precipitación que se disponen del área metropolitana de Bucaramanga.

Para ello se hace un breve estudio tanto del comportamiento de los ciclones tropicales y huracanes como de la precipitación en la zona (Capítulos 1 y 2), se recopilan y adecuan datos de cada una de éstos eventos (Capítulos 1 y 2), se establecen correlaciones entre variables características de cada uno de ellos (Capítulo 3) y se interpretan los resultados obtenidos (Capítulo 4) para poder llegar

finalmente a elaborar conclusiones que aporten un eslabón más al amplio mundo de la hidrología; para continuar así con el proceso conjunto de llegar a conocer y predecir el comportamiento de los diferentes fenómenos atmosféricos que afectan a los habitantes del planeta.

También se establecen relaciones entre los huracanes y ciclones tropicales con otros fenómenos atmosféricos como las Manchas Solares y el fenómeno de El Niño (Capítulo 5) con el fin de completar la investigación.

# **1. CICLONES TROPICALES Y HURACANES**

## **1.1. INTRODUCCIÓN**

Se ha considerado por parte de los autores que para comprender la forma en que los huracanes influyen en la precipitación, es aconsejable y preciso comenzar por el conocimiento de los conceptos básicos de cada uno de los elementos que forman parte de dicho tema; razón por la cual se presenta a continuación la información concerniente a ciclones tropicales y huracanes.

## **1.2. LOCALIZACIÓN**

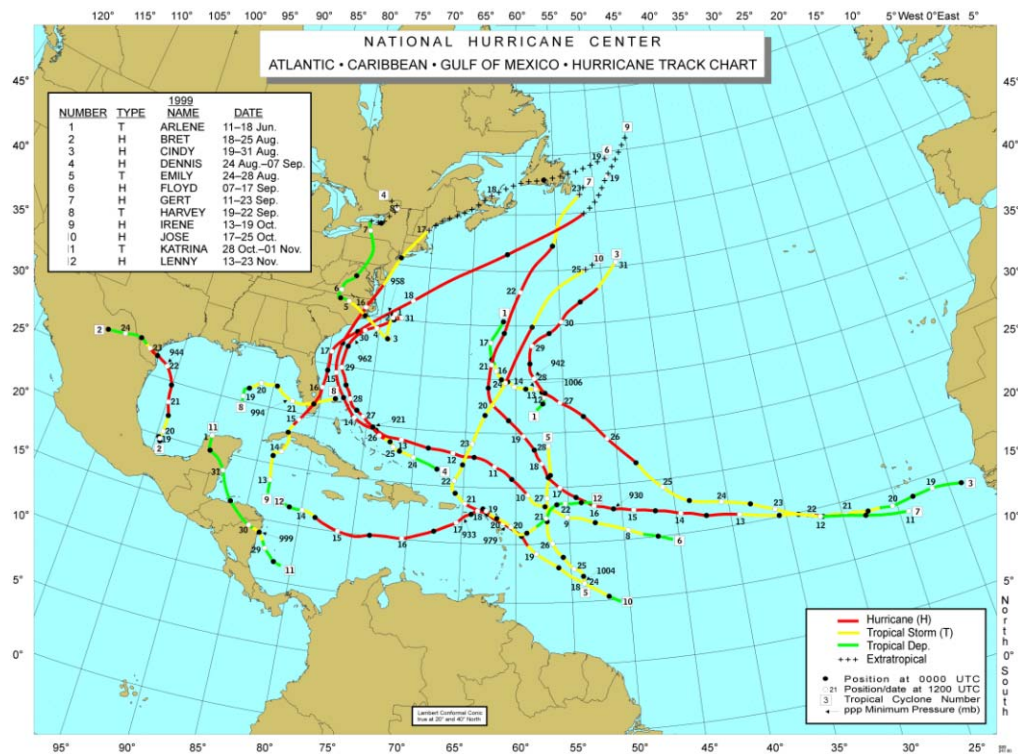
Teniendo en cuenta el proceso de formación de los ciclones tropicales (el cual se mencionará más adelante), éstos se encuentran localizados la mayor parte de su vida activa sobre los océanos, siendo el norte del mar caribe colombiano el noroeste de Colombia el lugar de formación para los ciclones generados en los océanos Atlántico y Pacífico respectivamente.

Aunque es muy difícil predecir cual será el movimiento de los ciclones tropicales sobre el océano, sus trayectorias de recorrido son generalmente así :para los ocurridos en el Océano Atlántico, por estar cerca del ecuador, se desplazan hacia el Oeste, a continuación giran hacia el Noroeste hasta entrar en la zona de influencia de los vientos del Oeste de las regiones templadas, luego se dirigen hacia el Norte y por último, en su última etapa, se dirigen hacia el Noreste y el Oeste arribando frecuentemente a la costa Este de Estados Unidos después de haber pasado por países caribeños como Puerto Rico, Cuba, Las Bahamas, etc (<http://www.meteomaire.com>).

En el océano Pacífico su movimiento es mucho mas predecible, comienzan cerca al Pacífico Mexicano y se desplazan hasta el Pacifico Noroccidental para terminar como depresiones tropicales.

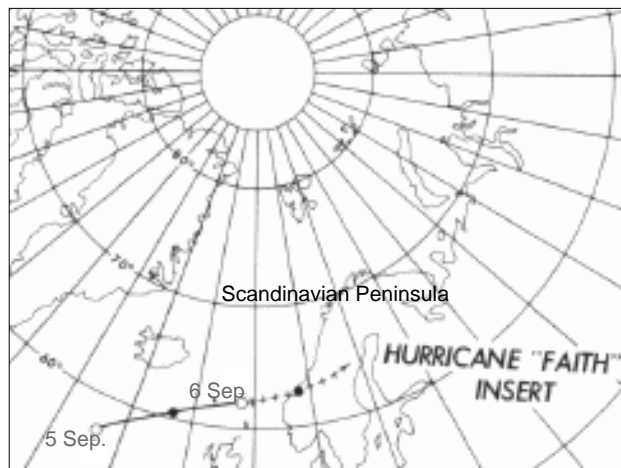
Realizando una observación de los mapas en los que se encuentran registrados los ciclones tropicales, se pueden estimar los límites geográficos aproximados de los sitios en donde estos se forman, desarrollan y finalizan (*Figura 1*). Los ocurridos en el Atlántico se hallan entre las Longitudes 8° E y 110° W, y las Latitudes 5° N y 65° N, algunos de ellos llegando a internarse en sitios muy alejados de su origen, como sucedió con el huracán Faith (20 de agosto al 7 de septiembre de 1966), que terminó dentro de la Península Escandinava como una Depresión Extratropical (*Figura 2*).

*Figura 1. Desplazamiento de los ciclones tropicales en el Océano Atlántico.*



Fuente: <http://www.nhc.noaa.gov/tracks/2003.gif>

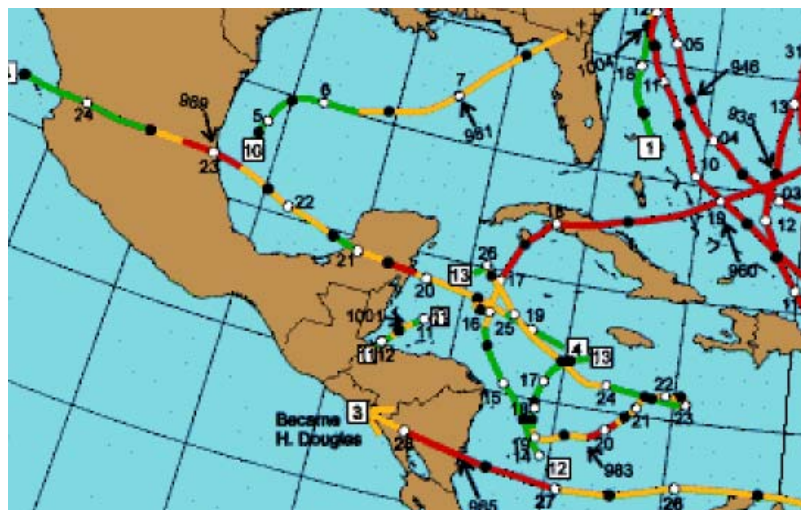
Figura 2. Huracán Faith insertado en la Península Escandinava como depresión Extra-tropical.



Fuente: <http://www.nhc.noaa.gov/1966faith.html>

Hacia el Oeste, algunos de ellos se internan en México y Estados Unidos culminando como Depresiones Tropicales o Extratropicales, e incluso algunos atraviesan Centro América para finalizar en el Pacífico, como el huracán Dolly (Figura 3) ocurrido entre el 19 y el 25 de agosto de 1996.

Figura3. Huracán Dolly (Número 4), que pasó del Océano Atlántico al Pacífico.

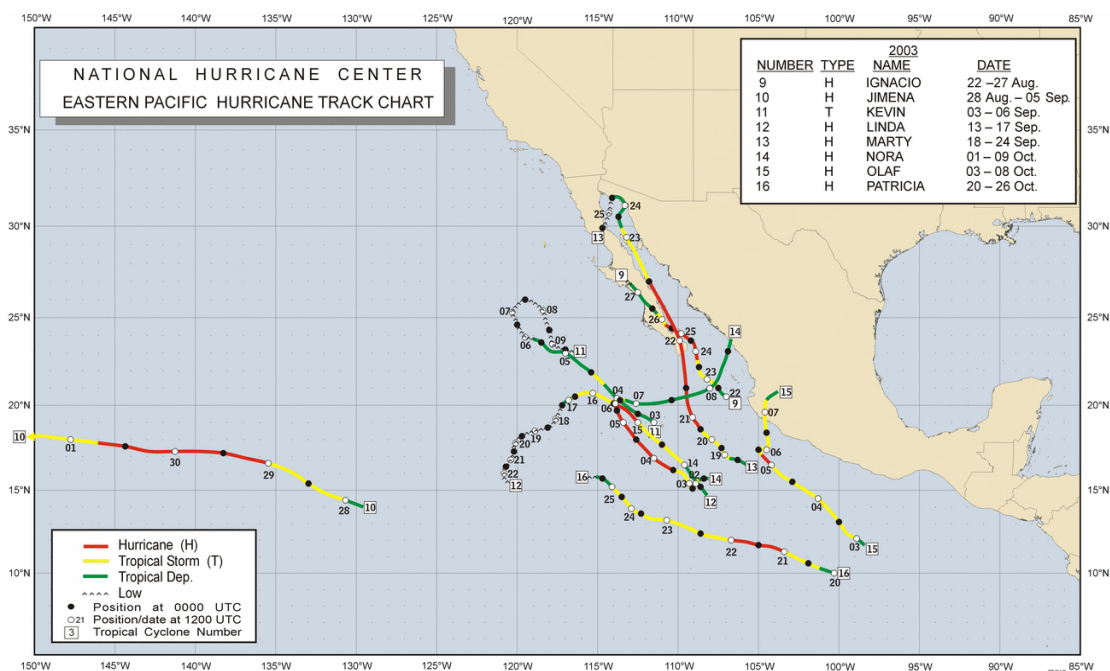


Fuente: <http://www.nhc.noaa.gov/1996dolly.html>

Los huracanes en el Pacífico se hallan históricamente localizados entre la Longitud 85° W y 155° W, y entre las Latitudes 5° N y 40° N, comenzando y terminando en su mayoría dentro del Océano Pacífico, como los ocurridos en el año 2003 (*Figura 4*).

En Colombia, varios ciclones tropicales ocurridos en el Océano Atlántico se han formado o han pasado muy cerca de sus costas, como el huracán Mitch, que se formó el 22 de octubre de 1998 como depresión tropical a 689 Km de la ciudad de Bucaramanga (*Figura 5*); incluso algunos ciclones han pasado por la península de la guajira en estado de tormenta tropical, como el huracán Joan ocurrido entre el 11 y el 22 de octubre de 1988, que atravesó a Colombia por la Guajira y el día 18 de octubre estuvo a una distancia de 559 Km. de Bucaramanga (*Figura 6*).

*Figura 4. Mapa de trayectoria de ciclones en el Océano Pacífico para el año 2003.*

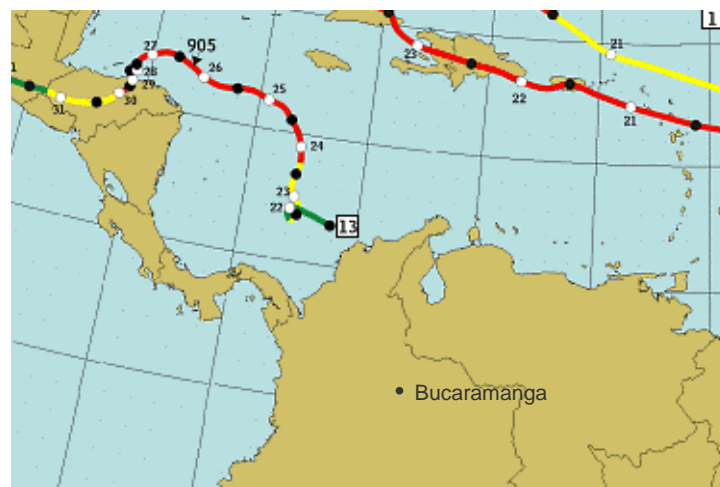


Fuente: <http://www.nhc.noaa.gov/tracks/2003.gif>

Los ciclones Tropicales que pasan más cerca de la ciudad de Bucaramanga serán los que más importancia tendrán dentro de este estudio. A pesar de esto, se debe tener en cuenta que existen otras variables en el análisis como son la velocidad y la presión interna, puesto que pueden existir ciclones tropicales más intensos, situados más lejos de la zona de estudio que puedan llegar a generar mas precipitación que aquellos que pasan más cerca y sean más débiles, aunque esta suposición se buscará revalidar en el capítulo 3 con el análisis estadístico de la información disponible de precipitación y de ciclones tropicales.

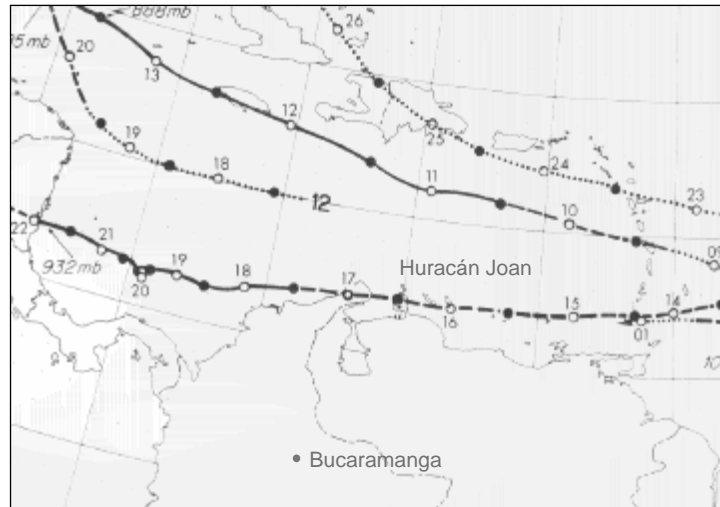
En cuanto a los ciclones del Océano Pacífico, como ya se mencionó, tienen su lugar de formación relativamente lejos de las costas colombianas; razón por la cual se espera que su influencia en la precipitación de Bucaramanga sea en menor grado que la de los ciclones del Océano Atlántico, aunque se debe tener en cuenta que muchos vientos provenientes de corrientes del Pacífico entran a Bucaramanga y su área metropolitana, los cuales pueden generar cantidades considerables de precipitación.

Figura 5. Huracán Mitch formado a 689 Km. de la ciudad de Bucaramanga.



Fuente: <http://www.nhc.noaa.gov/1998mitch.html>

Figura 6. Huracán Joan (11-22 de Octubre/1988) que atravesó la península de la Guajira a 558.8 Km de B/manga.



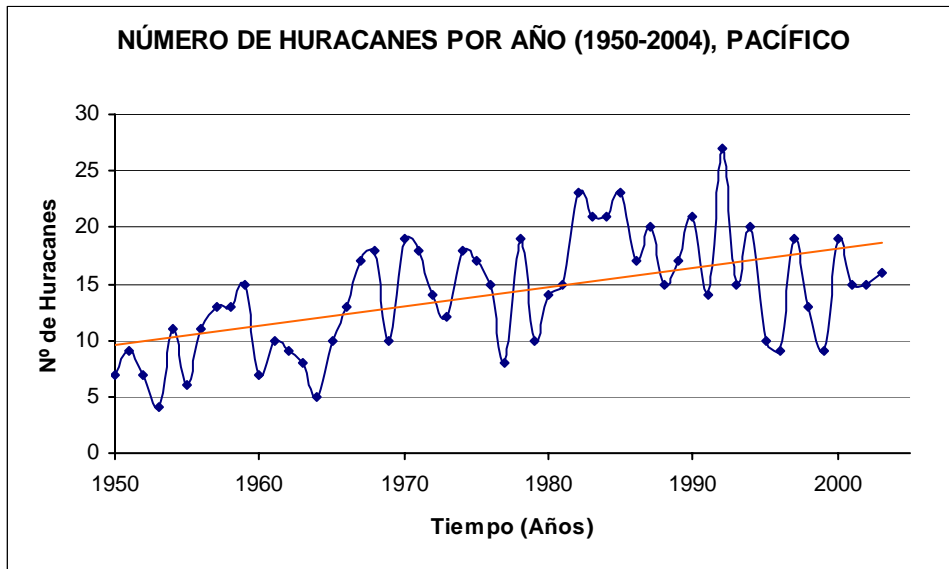
Fuente: <http://www.nhc.noaa.gov/1988joan.html>

En el Pacífico, el huracán Olivia ha sido el que más cerca a estado de Bucaramanga a una distancia de 1567 Km. Comparando este con el ciclón tropical del Atlántico mas cercano (Huracán Joan a 559 Km.) se muestra que la diferencia de distancia con respecto a la ciudad de Bucaramanga es de más de 1000 Km.

El número de ciclones tropicales que se forman en el océano Pacífico es mayor a el que se forman en el Atlántico (*Gráficas 1 y 2*); en promedio se forman en el Pacífico americano 16 ciclones por año aproximadamente, mientras que en el Atlántico americano se forman solamente unos 9; a pesar de esto, algunos estudios muestran que el número de huracanes y ciclones tropicales se ha incrementado durante los últimos años.

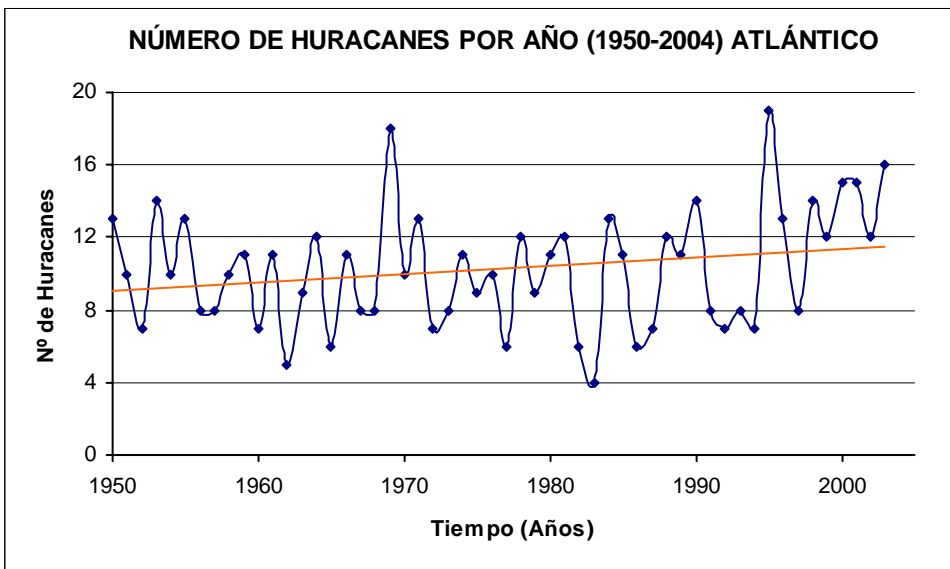
Esta tendencia en el incremento se puede observar en la gráficas 1 y 2, en donde se puede apreciar que la cantidad de ciclones tropicales ha ido aumentando progresivamente durante los últimos años.

Gráfica 1. Número de huracanes ocurridos por año en el Océano Pacífico.



Fuente: Investigación de los autores.

Gráfica 2. Número de huracanes ocurridos por año en el Océano Atlántico.



Fuente: Investigación de los autores.

Algunos estudios indican que el aumento de huracanes en el Caribe podría estar influenciado, entre otras causas, por el calentamiento global y el cambio de temperatura en las corrientes del Atlántico Norte, conocido como "Efecto Ártico" (Organización Meteorológica Mundial OMM, 2004), además estudios elaborados por expertos de la Universidad de Colorado y de la NOAA han señalado que el aumento de la recurrencia de huracanes está relacionado con cambios periódicos en la circulación oceánica en el Atlántico (Quiroga, 2004). Este fenómeno se manifiesta principalmente en el Atlántico Norte, pero tiene repercusiones sobre el trasiego de aguas frías y cálidas que sustentan las condiciones climáticas particulares de las vertientes continentales atlánticas (Quiroga, 2004).

### **1.3. CICLONES TROPICALES**

Antes de dar una definición de huracán se debe entender el concepto de ciclón tropical. "Ciclón tropical" es el término genérico que se utiliza para referirse a cualquier fenómeno meteorológico con vientos en forma de espiral y que se desplaza sobre la superficie terrestre (<http://www.angelfire.com>).

Los ciclones tropicales son sistemas de presión atmosférica baja en la parte central y una presión alta en la parte externa, que se originan sobre los océanos tropicales, en ambos lados del ecuador geográfico y están caracterizados por vientos intensos, lluvias abundantes, temperatura más alta de la que hay inmediatamente alrededor y circulación cerrada alrededor de un punto central (Reyes y Troncoso, 2000). Su movimiento está determinado por la rotación de la tierra; dirigiéndose hacia el oeste, razón por la cual nacen en los mares cálidos como los de los trópicos cercanos al Ecuador (nunca encima por la falta de la fuerza de Coriolis) y en el entorno de la zona de convergencia tropical (<http://www.meteomaire.com>).

Debido a la fuerza de Coriolis, los ciclones tropicales en el hemisferio norte tienen una circulación de sus vientos en dirección contraria a las manecillas del reloj (*Figura 7*); mientras que en el hemisferio sur, tienen una circulación a favor de las manecillas del reloj (Reyes y Troncoso, 2000).

Para que se forme un ciclón atmosférico se deben presentar varias condiciones dinámicas y termodinámicas, tanto en la atmósfera como en la superficie del suelo; en primer lugar, la condición más común es la convergencia horizontal de masas de aire que giran por el efecto de rotación terrestre, adquiriendo el giro ciclónico, y en segundo lugar el movimiento vertical ascendente del aire, característico en todo ciclón, que libera grandes cantidades de energía al presentarse los cambios de fase del vapor de agua (Reyes y Troncoso, 2000).

*Figura 7. Imagen satelital del ciclón tropical (Huracán Mitch) en el hemisferio norte.*



*Fuente: <http://www.meteomaire.com>*

Los ciclones tropicales pasan la mayor parte de su tiempo de vida sobre los océanos, esto se debe a que es ahí donde se producen los principales transportes de calor que alimentan a estas perturbaciones atmosféricas; por el contrario, cuando se mueven sobre las regiones continentales ceden gran parte de su

energía al suelo, ya sea en forma de lluvia ó por fricción del viento, por lo que son rápidamente disipados (Reyes y Troncoso, 2000).

Los ciclones tropicales se clasifican de acuerdo a la velocidad de sus vientos: *depresión tropical* (con vientos inferiores a las 39 Mph), *tormenta tropical* (vientos entre 39 Mph y 73 Mph) o *huracán* (con vientos mayores a 74 Mph) (www.angelfire.com). Esta clasificación está dada por la escala Saffir-Simpson que define a los ciclones en 7 tipos, en donde los huracanes se encuentran en 5 categorías diferentes definidas también por la velocidad de sus vientos (*Cuadro 1*). Además, la escala Saffir-Simpson define la presión en el centro del huracán y la altura de las olas generadas por sus vientos.

*Cuadro 1. Escala Saffir-Simpson.*

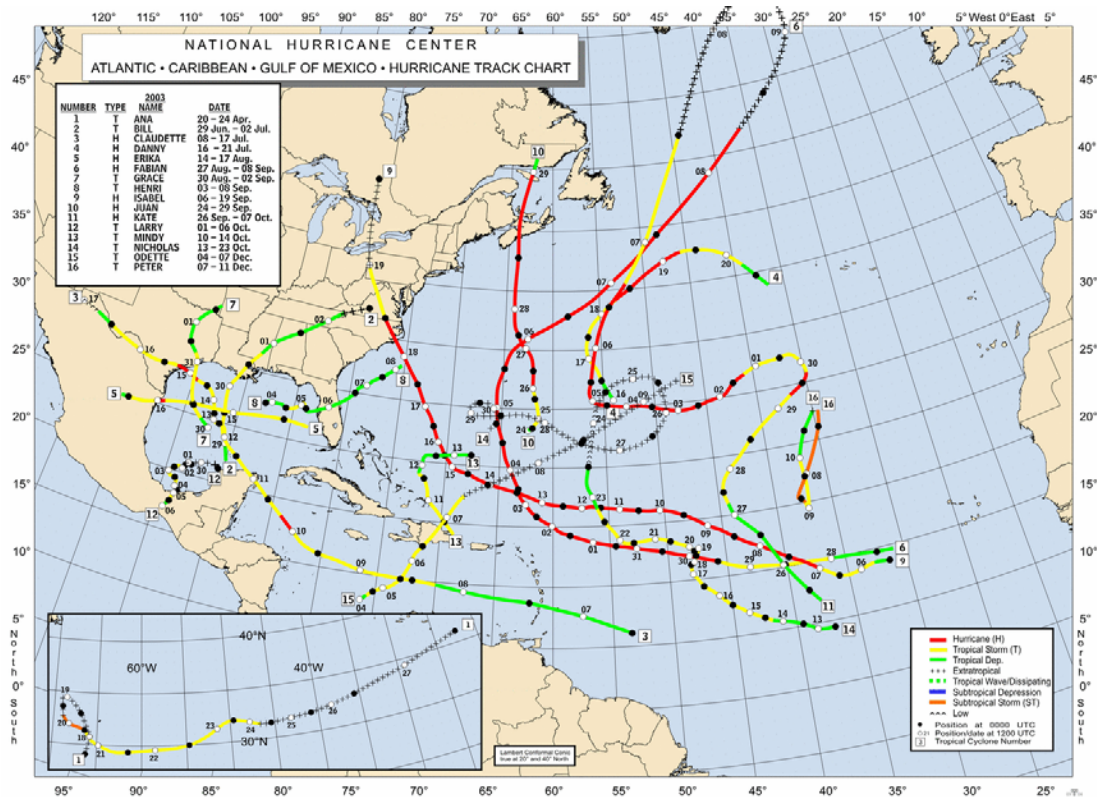
CLASE	CATEGORIA	PRESION (mb)	VIENTO (Km/h)	ALTURA. OLA (m)	COLOR
Depresión Trop.	DT	-----	<63	-----	Verde
Tormenta Trop.	TT	-----	63-117	-----	Amarillo
Huracán	1	>980	118-153	1.5	Rojo
Huracán	2	965-980	154-177	1.6-2.5	Rojo suave
Huracán	3	945-965	178-209	2.6-3.6	Magenta
Huracán	4	920-945	210-250	3.7-5.5	Magenta suave
Huracán	5	<920	>250	>5.5	Blanco

*Fuente: Organización Meteorológica Mundial, 2004.*

La escala de clasificación Saffir-Simpson tiene un formato de colores estándar para mostrar el estado en el que se encuentran los ciclones tropicales, de esta forma se presentan los mapas de trayectoria de los ciclones para así identificar su comportamiento a través del tiempo (*Figura 8*). Los mapas de trayectoria de todos los ciclones tropicales para el Océano Atlántico y Pacífico están disponibles en la página de Internet de la NOAA (National Oceanic Atmospheric Administration) (<http://www.nhc.noaa.gov>).

Los ciclones tropicales reciben varios nombres en las distintas regiones del mundo: en la India se les conoce como *ciclones*; en la región oriental de Asia se les conoce como *tifones*; en la región de las Filipinas se les conoce como *baguíos*; mientras que en Australia se les llama *willy willies*; en el resto del mundo el término más usado es de *huracán*. Independientemente de los nombres, estos sistemas tropicales tienen las mismas causas y propiedades (Reyes y Troncoso, 2000).

Figura 8. Mapa de trayectoria de ciclones tropicales en el Atlántico para el año 2003.



Fuente: <http://www.nhc.noaa.gov/2003.html>

A través de los años, los ciclones tropicales han sido objeto de numerosos estudios, tanto de su estructura y características generales, como de los mecanismos que rigen su génesis, evolución y trayectoria. Estos estudios, hoy en

día, se basan en las más sofisticadas técnicas observacionales (aviones de reconocimiento, imágenes de satélite, radar doppler y estaciones de superficie), así como en modelos tridimensionales de computadora (Reyes y Troncoso, 2000).

#### 1.4. HURACANES

De las 100 tormentas tropicales que se forman aproximadamente por año en el mundo, solo las dos terceras partes de ellas llegan a tomar la fuerza de un huracán. Como ya se mencionó, los huracanes son un gran sistema atmosférico, que puede extenderse entre 300 y 500 Km de radio, 8 a 10 Km de altura, y con un movimiento de desplazamiento horizontal que puede alcanzar velocidades del orden de 15-20 Km/h, con intensos vientos girando alrededor de un centro de relativa calma (Reyes y Troncoso, 2000). En el huracán, los vientos pueden alcanzar velocidades mayores de 250-300 Km/h (70-85 m/s), incluso en algunos “súper-huracanes” se han detectado rachas con vientos mayores de 400 Km/h (>110 m/s) (Reyes y Troncoso, 2000).

*Cuadro 2. Promedio anual de huracanes en el mundo.*

<b>NÚMERO TOTAL PROMEDIO DE HURACANES EN LOS DISTINTOS OCEANOS TROPICALES DEL MUNDO</b>	
Océano Pacífico noroccidental	21
Océano Pacífico oriental	16
Océano Atlántico	9
Bahía de Bengala	7
Océano Indico del Sur	5
Mar Timor	3
Mar de Coral	3
Mar de Arabia	2
<b>TOTAL</b>	<b>66</b>

*Fuente: Reyes y Troncoso, 2000.*

### 1.4.1. Estructura de los huracanes

En éstos se pueden diferenciar claramente tres elementos (Inzunza, 2003):

✦ *El centro*, también conocido como el “el ojo del huracán” (*Figura 9*), es un área de relativa calma en el centro de un huracán, que se extiende desde el nivel del mar hasta su extremo superior y está rodeado por una pared de nubes espesas cargadas de lluvia; se caracteriza por vientos débiles, aire seco, cielos despejados, altas temperaturas y una presión atmosférica muy baja. En el interior, sin embargo, debido a la alta temperatura y a la presencia de viento caliente, el agua evaporada es arrastrada rápidamente hacia arriba, originándose un aire seco, incapaz de condensarse, y por ende sin nubes.

*Figura 9. Fotografía del ojo de un Huracán.*



*Fuente: <http://www.meteomaire.com>*

✦ *Las paredes del ojo del huracán*, es la zona donde se encuentran dos fuerzas opuestas: la fuerza del aire que se mueve hacia el centro y la fuerza centrífuga que es hacia afuera. En la pared del ojo se encuentran los vientos más intensos.

✦ *Las bandas exteriores de tormentas*, que pueden extenderse por un ancho de hasta 1500 Km. del centro y entre 100 a 500 de largo. La fuerza de los vientos puede extenderse fuera de los huracanes aproximadamente desde 50 hasta 250 Km.

#### **1.4.2. Factores para la formación de Huracanes**

Para que un ciclón tropical pueda llegar a ser catalogado como un huracán deben existir ciertos factores climáticos y atmosféricos que permitan su formación en los océanos. El primer factor es la *temperatura*, la cual debe ser superior a los 80 F (27° C aprox.); esta condición de altas temperaturas genera condiciones de mucha *humedad*, las cuales proporcionan al huracán la energía de evaporación necesaria para que este pueda desplazarse (<http://www.angelfire.com>).

La presencia de *vientos cálidos* cerca de la superficie del mar permite que haya mucha evaporación, logrando que esta comience a ascender sin grandes contratiempos, originándose una presión negativa que arrastra al aire en forma de espiral hacia adentro y arriba, permitiendo que continúe el proceso de evaporación (<http://www.angelfire.com>).

#### **1.4.3. Evolución del Huracán**

Aunque la evolución de un huracán aún no se entiende completamente, la mayoría de los meteorólogos están de acuerdo en que hay 4 fases principales: (Reyes y Troncoso, 2000)

✦ *La fase de formación*: Comienza con una inestabilidad en una onda del este, en la que se inicia el movimiento giratorio de los vientos ciclónicos del orden de 4 a 7 m/s en la superficie y con vientos más intensos en los niveles superiores.

✦ *La fase de inmadurez:* Cuando la depresión se intensifica para convertirse en tormenta tropical y se alcanzan velocidades en el rango de 18-33 m/s; durante esta fase, la tormenta es muy simétrica y cubre un área relativamente pequeña, con un diámetro del orden de decenas de kilómetros.

✦ *La fase de madurez:* Cuando el diámetro se agranda a varios cientos de kilómetros y se forma el ojo del huracán, en el cual los vientos pueden alcanzar velocidades mayores de 33 m/s. En esta etapa el ciclón tropical pasa a tener categoría de Huracán.

✦ *La fase de decaimiento:* Se inicia cuando los vientos empiezan a disminuir y el ojo desaparece; usualmente los huracanes inician la fase de decaimiento cuando se desplazan sobre regiones con aguas relativamente frías, en latitudes subtropicales, o cuando penetran al continente, donde pierden su energía por el efecto de fricción del suelo.

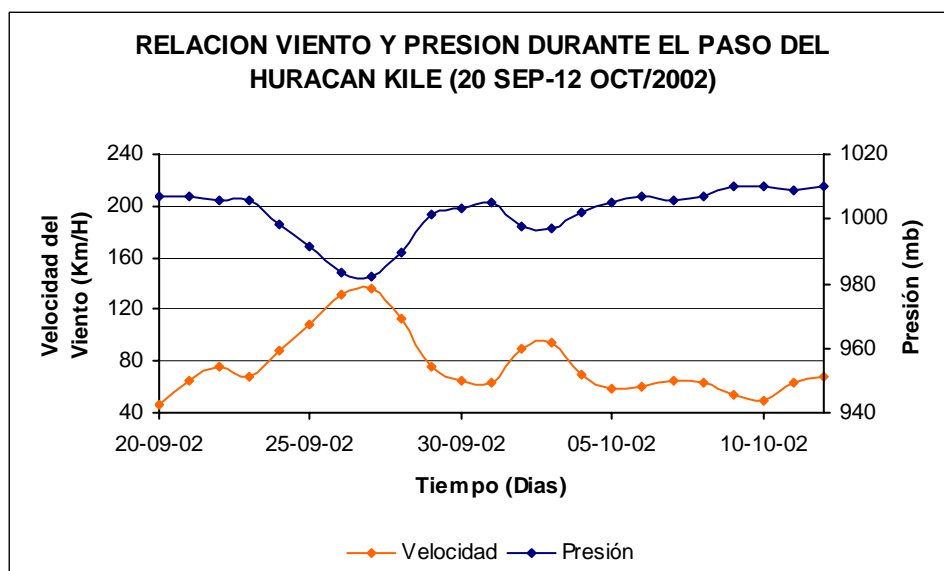
En términos simples se puede describir el proceso de ciclogénesis de los huracanes de la siguiente forma: conforme los rayos del sol inciden sobre la superficie oceánica, iniciándose la evaporación, el aire húmedo se calienta y se eleva, favoreciendo una reducción en la presión atmosférica y una convergencia de aire con circulación ciclónica alrededor del núcleo cálido del sistema. El aire en ascenso se expande y se enfría, favoreciendo la condensación del vapor de agua y liberando grandes cantidades de calor latente al medio atmosférico, retroalimentando al sistema (Reyes y Troncoso, 2000).

#### **1.4.4. Estructura del viento en un huracán**

Los vientos en los huracanes se deben principalmente a diferencias de presión atmosférica, las cuales a su vez son producto del calentamiento desigual en distintos lugares del planeta. Esta magnitud depende de la intensidad de la

diferencia de presión en el lugar en estudio, por ejemplo, mientras menor sea la presión en el centro de un ciclón, mayor será la diferencia de presión entre ese centro y su entorno, produciendo vientos fuertes (Reyes y Troncoso, 2000). Esto se puede apreciar en la gráfica 3 donde se muestra el comportamiento de los vientos y de la presión interna del huracán Kile ocurrido del 20 de Septiembre al 12 de Octubre de 2002. La gráfica muestra claramente la relación inversa que existe entre estas dos variables.

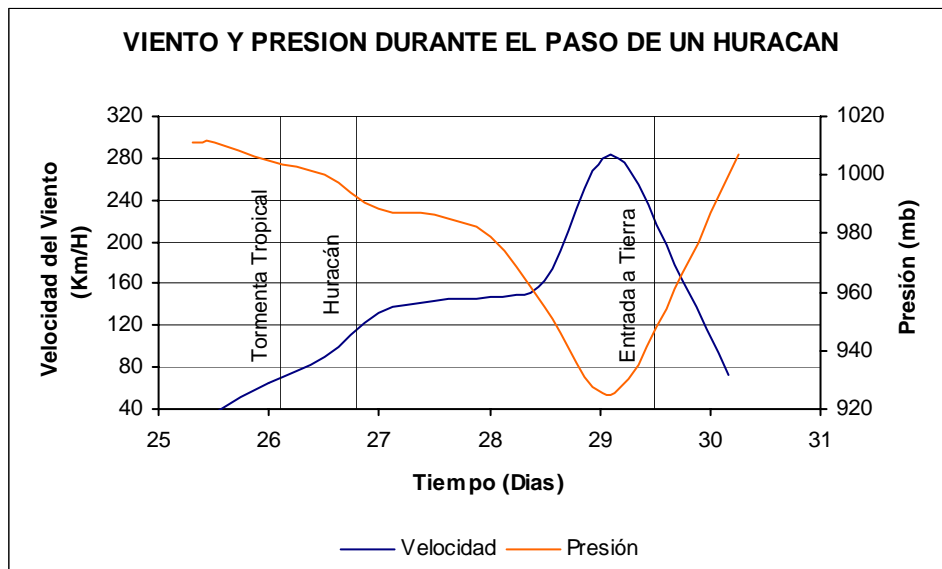
Gráfica 3. Comportamiento del viento y la presión durante el paso del Huracán Kile.



Fuente: Investigación de los autores.

Así como se puede representar la evolución de un huracán en el océano en términos del comportamiento de la intensidad del viento y la presión atmosférica, (donde los cambios son relativamente lentos), se puede representar el comportamiento de estas variables cuando el huracán entra al continente (gráfica 4), donde tanto el viento del huracán como la presión varían rápidamente.

Gráfica 4. Variaciones en el tiempo de la Velocidad y Presión de un Huracán al entrar a tierra.



Modificado de Reyes y Troncoso, 2000.

## 1.5. INFORMACIÓN SOBRE CICLONES TROPICALES

Estudiar la influencia de los huracanes en la precipitación del área metropolitana de Bucaramanga es una labor que implica, como primera medida, la recolección de todos los datos que se encuentran disponibles acerca de los ciclones tropicales ocurridos en el Océano Atlántico y en el Océano Pacífico, ya que son estos los que se cree, tienen relación con la precipitación de Bucaramanga; esta información se encontró en la página de la NOAA (National Oceanic Atmospheric Administration), en el Centro Nacional de Huracanes de los Estados Unidos (<http://www.nhc.noaa.gov>). En esta página se puede hallar toda la información referida a ciclones tropicales, desde su fecha de inicio, con reportes cada seis horas referidos a hora universal (UTC), de su posición (latitud y longitud), presión, velocidad del viento y estado del huracán a través del tiempo.

La serie histórica de los huracanes se encuentra desde el año 1851 para el Atlántico y desde 1949 para el Pacífico, por esta razón se tomará para el análisis la serie histórica ocurrida desde 1950 para los dos casos. Además de recopilar los datos de los ciclones tropicales, se debe tener información de manera gráfica (mapas), la cual servirá para observar de forma más clara su trayectoria por los océanos a través del tiempo.

Los reportes disponibles en la página de la NOAA se encuentran en un formato que dificulta la organización de los datos para su posterior tratamiento gráfico y estadístico, por lo cual se realizó su exportación a un formato que permita realizar los tratamientos necesarios para el estudio; no sin antes dedicar un tiempo a su interpretación, pues esta no era del todo clara, por lo que se procedió de la siguiente forma:

- Dentro de la misma página se halló información detallada de cada uno de los huracanes ocurridos en los últimos años. Tanto para el Atlántico como para el Pacífico se dispone de información organizada desde 1995 hasta el 2003. La información contiene el nombre, periodo de ocurrencia, estadísticas meteorológicas, estadísticas de accidentes, daños ocasionados y finalmente, un cuadro en donde se muestra de forma clara la misma información de los reportes (*cuadro 3*). Observando los reportes, los cuales están disponibles en el “bloc de notas”, como se muestra en la Figura10, se compararon estos con los datos de los pocos huracanes que se registran en detalle. De esta forma se pudo interpretar la totalidad de los reportes para los dos Océanos.

- Una vez interpretados los datos de los reportes, estos fueron organizados en “Excel”, para así generar las gráficas y efectuar los correspondientes análisis estadísticos.

Cuadro 3. Huracán Gustav organizado por la NOAA.

Date/Time (UTC)	Position		Pressure (mb)	Wind Speed (Kt)	Stage
	(°N)	(°W)			
08 / 1200	29.0	71.0	1009	30	subtropical depression
08 / 1800	30.2	71.1	1007	35	subtropical storm
09 / 0000	30.5	72.3	1004	40	"
09 / 0600	31.2	72.6	1003	40	"
09 / 1200	31.6	73.6	1002	40	"
09 / 1800	31.9	74.5	1002	40	"
10 / 0000	32.1	75.5	996	45	"
10 / 0600	33.0	75.5	990	50	"
10 / 1200	33.7	75.4	987	50	tropical storm
10 / 1800	35.0	75.4	985	55	"
11 / 0000	35.5	74.7	983	55	"
11 / 0600	36.8	73.0	977	60	"
11 / 1200	38.0	70.8	971	70	hurricane
11 / 1800	40.3	66.8	964	85	"
12 / 0000	43.1	62.8	962	80	"
12 / 0600	46.5	59.6	960	75	"
12 / 1200	48.6	57.7	965	60	extratropical
12 / 1800	50.1	55.5	967	60	

Fuente: <http://www.nhc.noaa.gov>

Figura 10. Reportes Huracán Gustav.

```

reportes ATLÁNTICO 1984-2003 - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
61530 TS
61535 09/08/2002 M= 8 7 SNBR=1284 GUSTAV XING=1
61540 09/08*0000000 0 0*0000000 0 052900710 30 1009S3020711 35 1007*
61545 09/09S3050723 40 1004S3120726 40 1003S3160736 40 1002S3190745 40 1002*
61550 09/10S3210755 45 996S3300755 50 990*3370754 50 987*3500754 55 985*
61555 09/11*3550747 55 983*3680730 60 977*3800708 70 971*4030668 85 964*
61560 09/12*4310628 80 962*4650596 75 960E4860577 60 965E5010555 60 967*
61565 09/13E5100540 55 968E5250525 50 968E5450514 45 972E5600495 45 976*
61570 09/14E5700515 40 982E5800525 35 984E5950535 30 989E6100540 30 992*
61575 09/15E6250545 20 998*0000000 0 0*0000000 0 0*0000000 0 0*
61580 HR
    
```

Fuente: <http://www.nhc.noaa.gov>

### **1.5.1. Cálculo de distancias entre la zona de estudio y los puntos de ocurrencia de huracanes**

Dentro de los procesos requeridos para analizar la influencia de los ciclones en la precipitación, se hace preciso calcular, entre otras variables, la distancia entre la zona de estudio (Bucaramanga) y cada uno de los puntos por donde avanzan los huracanes, para los dos océanos. A continuación se hace una breve descripción de la metodología usada para tal fin, incluyendo los recursos que por diferentes motivos no fueron adoptados.

Inicialmente se quiso trabajar con coordenadas planas, pero en la información previamente recolectada sobre los huracanes, las posiciones estaban dadas en coordenadas Geográficas (latitud y longitud), razón por la cual se hizo necesario buscar un método para transformarlas. Por tal motivo se buscó por medio de foros y páginas de Internet, como primera opción, las fórmulas empleadas para realizar dicha conversión y obtener como resultado coordenadas planas, ya fueran Gaussianas o UTM (Universal Transverse Mercator); pero debido a la complejidad de dichas fórmulas, a la gran cantidad de variables empleadas y al largo tiempo que se debía emplear para dominar a cabalidad el tema, se decidió usar programas de Internet que agilizaran los cálculos y se pudieran emplear a partir de los conocimientos básicos adquiridos de geodesia.

Antes de mencionar dichos programas se hace necesario aclarar algunos conceptos de geodesia que servirán de base para entender la metodología que se viene describiendo.

Para efectos geodésicos en general se supone que la Tierra es redonda, por lo que se va a aceptar este consenso general, junto con la idea de estar ubicados sobre un cuerpo esférico. La forma del planeta se define como un geoide, es decir una forma como entre una pelota de fútbol y una pelota de rugby, pero abollada o

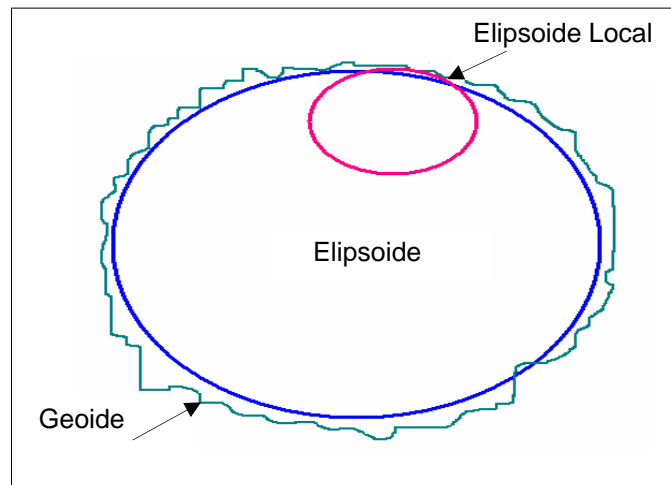
desinflada. Como es complicado tratar de encontrar coordenadas que sigan punto a punto la forma del geoide, la gran mayoría de los geofísicos han optado por trabajar con una forma simple, el elipsoide, es decir una esfera achatada en los polos (Francois, 2000).

Como se ve en la Figura 11, el elipsoide es una manera de aproximación de la forma real de la Tierra, pero según el lugar considerado, esta aproximación podrá situarse sea por encima, sea por debajo de la verdadera superficie terrestre, de donde surge una constatación: como el geoide es de forma irregular, la definición del centro de la Tierra no es indiscutible (como lo sería en el caso de una esfera), por lo tanto cada geofísico puede definir, a partir de su centro de la Tierra, un elipsoide diferente, es decir, una sección elíptica con un gran eje y un coeficiente de achatamiento mejor adaptado a la zona en la cual se trabaja. Por esta razón siempre es necesario saber cuál sistema geodésico y qué elipsoide de referencia se está utilizando (Francois, 2000).

Luego de haber conseguido un buen número de programas de diferentes tipos se procedió a usarlos, algunos con resultados aparentemente válidos, como el Utmcalc181d (Keating, 2003), el cual incluye la opción de abrir bases de datos completas y transformar todos sus datos y puesto que los datos disponibles eran más de 15000 para cada uno de los océanos, esta herramienta era un requisito que se debía cumplir. Sin embargo se llegó a concluir que algunas de las distancias planas calculadas a partir de estas coordenadas transformadas resultaban ser ilógicas, y en muchos casos las diferencias entre estas y las estimadas usando herramientas informáticas eran hasta del orden de 2500 Km.

Se probó con cada uno de los elipsoides de referencia que se usan mundialmente, incluido el WGS-84 (World Geodetic System 1984), obteniendo resultados similares entre ellos, pero no válidos para sitios como la región del Caribe Suramericano.

Figura 11. Comparación de las formas reales y de referencia de la tierra.



Modificado de Francois, 2000.

Otras herramientas, como programas en DOS desarrollados en Colombia, arrojaban resultados más lógicos para zonas cercanas al país, pero no se podían aplicar a zonas lejanas, posiblemente por usar una referencia local.

Finalmente se llegó a la conclusión de que la zona de estudio (de ocurrencia de ciclones tropicales) era tan amplia, que era imposible trabajar con elipsoides de referencia poco o nada globales (de ahí los errores obtenidos), y que lo más conveniente era trabajar distancias curvas usando las diferencias entre latitud y longitud de la posición de Bucaramanga y las posiciones de los huracanes.

Teniendo presente que en la zona ecuatorial un grado equivale a 111.11Km tanto en longitud como en latitud, se buscó una relación que permitiera establecer en qué proporción este valor disminuye (longitudinalmente) a medida que un punto se empieza a mover desde el ecuador hasta los polos (latitudinalmente), para lo que se utilizó la ecuación de una circunferencia, de donde se obtuvo un factor de proporción para cada una de las longitudes de los puntos por donde se registraron todos los huracanes en función de su latitud, calculando así las distancias desde

estos hasta la zona de evaluación de la precipitación, con la ayuda de una hoja de cálculo.

Esto es posible sólo asumiendo a la tierra como una esfera, lo cual se decidió teniendo en cuenta que los errores considerables generados se presentarían en puntos cercanos a los polos a donde rara vez llega un huracán.

Los valores de las distancias calculadas fueron comprobados por medio de una herramienta computacional que permite calcular distancia punto a punto; se tomaron algunos ciclones que pasaron por diferentes posiciones, cercanos y lejanos y se compararon los valores con los obtenidos en la hoja de cálculo y los errores encontrados no fueron superiores a 0.3%.

## **2. PRECIPITACIÓN**

### **2.1. INTRODUCCIÓN**

Habiendo realizado una descripción acerca de las características y generalidades de los ciclones tropicales, se presenta en ese capítulo la parte correspondiente a la precipitación. Aunque el análisis de precipitación pretende mostrar cuáles son influenciadas por ciclones tropicales, su estudio involucra todas las series históricas desde el año 1950 en la cual se registran eventos de lluvia ocurridos por diversas causas. Se presentan a continuación generalidades sobre las características y factores de formación de lluvias.

### **2.2. LOCALIZACIÓN**

El estudio estará limitado al sector del área metropolitana de Bucaramanga, capital del departamento de Santander, ubicada al Noreste de Colombia, cuya distancia a la capital del país (Bogotá) es de 446Km (*Figura 12*).

Bucaramanga, con una altura de 959 msnm, temperatura promedio de 25 grados centígrados y precipitación media anual de 1000 a 1500 mm, limita por el Norte con el municipio de Rionegro; por el Oriente con los municipios de Matanza, Charta y Tona; por el Sur con el municipio de Floridablanca y por el Occidente con el municipio de Girón. Se encuentra en una terraza inclinada de la Cordillera Oriental a los 7° 08' de Latitud Norte y 73° 08' de Longitud al Oeste de Greenwich. El área metropolitana está formada por Bucaramanga, Piedecuesta, Floridablanca y Girón, y está ubicada sobre el Valle del Río de Oro (POT de Bucaramanga, Gobernación de Santander).

Figura 12-a. Ubicación Global del área de evaluación de precipitación.



Fuente: Atlas Dinámico, Enciclopedia Encarta 2004.

Figura 12-b. Detalle de la Ubicación de la ciudad de Bucaramanga.



Fuente: Atlas Dinámico, Enciclopedia Encarta 2004.

Sus principales ríos son el Río de Oro y el Suratá y entre sus quebradas figuran: La Flora, Tona, La Iglesia, Quebrada Seca, Cacique, El Horno, San Isidro, Las Navas, La Rosita y Bucaramanga.

El área comprenderá en sí el territorio urbano, algunos municipios aledaños como Piedecuesta, Floridablanca y Girón, en donde se hallan ubicadas diversas estaciones hidrológicas, de donde se obtendrán los datos de precipitación requeridos para el estudio.

### **2.3. PRECIPITACIÓN**

El régimen hidrológico de una región es función de sus características físicas, geológicas, topográficas y climatológicas. Los factores climatológicos más importantes son la precipitación, la evaporación, la temperatura, la humedad del aire y los vientos; estos últimos tres en la medida en que ejercen influencia sobre la precipitación.

El término precipitación se refiere a todas las formas de humedad emanada de la atmósfera y depositada en la superficie terrestre en forma de lluvia, granizo, rocío, neblina o nieve. Su formación se debe principalmente a que las masas de aire adquieren humedad al pasar sobre masas de agua cálida o sobre superficies de tierra mojada. La humedad, o vapor de agua, es elevada entre las masas de aire por turbulencia y convección, haciendo que su temperatura disminuya, por lo que esta se condensa pasando a estado líquido. Con la ayuda de los núcleos de condensación se van formando pequeñas gotas de agua las cuales aumentan su tamaño gracias a la condensación y al impacto con otras más cercanas; cuando éstas son lo suficientemente grandes, la fuerza de gravedad que actúa sobre ellas es mayor que la de fricción, generando que empiecen a caer (Chow, 1993).

Las precipitaciones pueden clasificarse de acuerdo con las condiciones que producen el movimiento vertical del aire; en esta elevación de masas húmedas de aire se hallan presentes tres mecanismos: precipitación por convergencia, precipitaciones convectivas y precipitaciones orográficas, cuyas definiciones se encuentran fácilmente en los libros de hidrología.

### 2.3.1. Información sobre precipitación

Los datos de precipitación utilizados para el estudio fueron obtenidos a partir de las estaciones que posee el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). Estos registros de precipitación corresponden a valores diarios totales originales (valores sin corregir) de la parte baja de la cuenca, tomados por estaciones pluviométricas y pluviográficas ubicadas en Bucaramanga y su área metropolitana. En el cuadro 3 se muestran las distintas estaciones con su respectiva ubicación, y por medio de la figura 13 se pueden apreciar sus posiciones generales y relativas.

*Cuadro 4-a. Estaciones hidrológicas de la parte baja de la cuenca para la zona en estudio.*

ESTACION	NOMBRE	MUNICIPIO	COORDENADAS	
			Nº	Wº
1	Aeropuerto Gómez Niño	Bucaramanga	07° 08'	73° 08'
2	Bucaramanga	Bucaramanga	07° 08'	73° 06'
3	Planta Eléctrica	Piedecuesta	06° 59'	73° 02'
4	UIS	Bucaramanga	07° 08'	73° 06'
5	Palo Gordo	Girón	06° 58'	73° 09'
6	Granja Piedecuesta	Piedecuesta	07° 00'	73° 05'
7	Llano Grande	Girón	06° 58'	73° 11'
8	Aeropuerto Palonegro	Lebrija	07° 06'	73° 12'
9	La Floresta	Floridablanca	07° 05'	73° 08'
10	B/manga IDEAM	Bucaramanga	07° 08'	73° 07'
11	Floridablanca	Floridablanca	07° 04'	73° 05'
12	HIMAT R-11	Bucaramanga	07° 07'	73° 08'

*Fuente: IDEAM.*

En la sección 2.4 de éste capítulo se utilizan también los datos de algunas estaciones ubicadas en la parte alta (Este) del municipio de Bucaramanga (cuadro 5) con el fin de realizar una comparación entre el comportamiento anual de las lluvias con el número de ciclones tropicales por año, además de analizar el comportamiento de los regímenes de precipitación de los últimos años en ambas cuencas.

*Cuadro 4-b. Estaciones hidrológicas de la parte alta de la cuenca para la zona en estudio.*

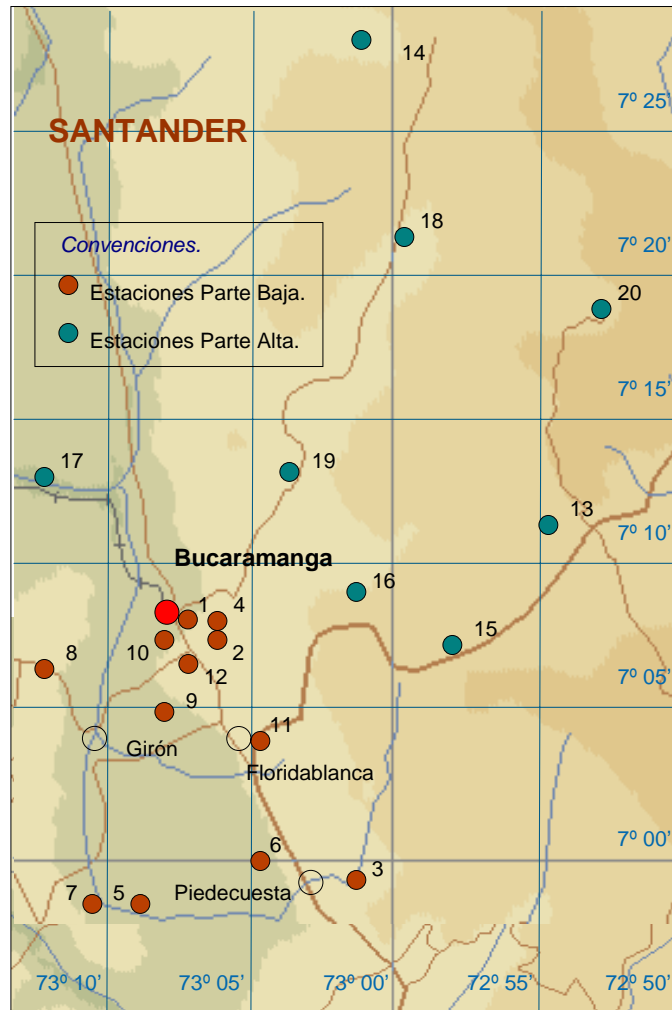
ESTACION	NOMBRE	MUNICIPIO	COORDENADAS	
			Nº	Wº
13	Berlín	Tona	07° 11'	72° 55'
14	Cachirí	Suratá	07° 29'	73° 01'
15	El Picacho	Tona	07° 07'	72° 58'
16	La Galvicia	Floridablanca	07° 09'	73° 02'
17	Palmas	Lebrija	07° 13'	73° 13'
18	Vivero Suratá	Suratá	07° 21'	73° 00'
19	Matajaira	Matanza	07° 13'	73° 04'
20	Vetas el Pozo	Vetas	07° 19'	72° 53'

*Fuente: IDEAM.*

Las estaciones utilizadas para la parte baja, contienen datos desde 1950 hasta 2003, aunque no todas las estaciones registran precipitación todo el tiempo, por lo cual se usarán en determinada época los datos de estaciones disponibles en la misma, de modo que siempre habrá al menos una estación funcionando, con excepción del periodo comprendido entre 1963 y 1965 (los tres años completos), en el que no se cuenta con datos en ninguna de las doce estaciones analizadas.

Para la parte alta, los datos disponibles se encuentran desde el año de 1972 hasta el año 2003, pero a diferencia de los registros disponibles para la parte baja, estos valores de precipitación ya se encontraban corregidos.

Figura 13. Ubicación de las estaciones para la parte alta y baja en la zona de estudio.



Fuente: Investigación de los autores.

### 2.3.2. Factores globales que influyen en la precipitación del área metropolitana de Bucaramanga

Numerosas investigaciones en el ámbito nacional e internacional han sido realizadas buscando hallar la forma como el llamado “Macro-clima” afecta la precipitación y la respuesta hidrológica en las distintas zonas tropicales. Colombia, por estar situada en la Zona Tórrida, debería tener clima tropical (de temperaturas elevadas durante todo el año), pero la conjugación de factores geográficos (como

sus cordilleras y montañas) y atmosféricos (se han encontrado más de 40 formas de elementos meteorológicos asociados con las variaciones del tiempo en una estación a nivel regional), le proporcionan diversidad de climas y variaciones hidrológicas.

Como ya se sabe, en Bucaramanga no existen las estaciones sino periodos secos y periodos de lluvia. En general, el ciclo anual de lluvias está determinado por los movimientos de rotación y traslación de la Tierra, pero en el territorio a estudiar influyen principalmente los factores geográficos como la altura. El período de mayor lluviosidad se presenta en los meses de Marzo, Abril, Mayo, Septiembre, Octubre y Noviembre, mientras que en Junio, Julio, Agosto, Diciembre, Enero y Febrero se presentan los períodos secos o de verano.

Como consecuencia de los factores atmosféricos, se presentan fenómenos diversos a varias escalas temporales:

✦ *Escala interdecadal:* La variabilidad climática global a escala de varias décadas está dominada por el cambio climático y el cambio ambiental global de largo plazo, así como por fenómenos macro-climáticos que operan en tal escala temporal. Las temperaturas medias y mínimas de la troposfera baja están aumentando, y a su vez, la temperatura de la estratosfera está disminuyendo en casi todo el planeta. El balance neto de las evidencias indica que la acción humana está ejerciendo un impacto discernible sobre el clima global (Poveda, 2004).

Las evidencias del cambio climático para Bucaramanga y la mayoría de regiones de Colombia son: aumento de enfermedades de transmisión vectorial asociadas con el clima, perturbaciones de largo plazo y cambios en la fase y en la amplitud de los regimenes hidrológicos, cambios en ecosistemas, etc. Las tendencias encontradas indican un incremento para los registros de humedad relativa del aire. Los caudales de las principales cuencas hidrográficas exhiben tendencias

decrecientes (Poveda, 2004). De acuerdo con la elevación sobre los Andes, los resultados muestran que las tendencias decrecientes en los registros de punto de rocío, presión de vapor y humedad se presentan para estaciones por debajo de la cota 1700 (Ochoa y Poveda, 2003), la cual incluye a Bucaramanga. No solo se han identificado tendencias en los registros de las principales variables del clima, sino que además se han identificado cambios en la fase y la amplitud del ciclo anual y semi-anual (Pérez, 1999) es decir, corrimientos en las temporadas lluviosas dentro del año, con importantes implicaciones en muchos campos.

Hay varios fenómenos macro-climáticos que operan a escalas de tiempo decadales, tal como la llamada Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) (Poveda, 2002) y la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) (Poveda y Mesa, 1996; Poveda, 1998), que tienen una influencia significativa sobre el clima en la región.

✦ *Escala interanual:* La variabilidad climática global a escala de tiempo interanual está fuertemente controlada por la ocurrencia del evento El Niño/Oscilación del Sur (ENSO), el cual se explica en mayor detalle en el capítulo 5.

En general, durante El Niño se presenta una disminución en la precipitación y en los caudales medios mensuales de los ríos de Colombia (Poveda y Jaramillo, 2000; Poveda, 2001; Ramírez y Jaramillo, 2001). Durante La Niña ocurren anomalías contrarias, con eventos de precipitación muy intensos, crecimiento de ríos, avalanchas e inundaciones de planicies aluviales (Poveda, 2004).

Otro factor generador de lluvia en Bucaramanga es la advección de humedad desde la cuenca Amazónica hasta esta región, facilitada por el debilitamiento de los alisios del oeste que penetran desde el Pacífico al interior del país. El 12 de febrero de 2005, en época normalmente de verano, un caso de convergencia de advección de humedad de la cuenca Amazónica y vientos alisios que entraron al país desde la costa Atlántica, provocó desastres de gran magnitud en varios

sectores de la zona metropolitana de Bucaramanga (además de otros municipios santandereanos), especialmente en la cuenca del Río de Oro y Río Frío, en cuyas riveras se presentaron inundaciones de barrios completos y deslizamientos, además de pérdida de vidas humanas, daños en estructuras, vías de comunicación y bienes materiales (*Figura 14*).

*Figura 14: Inundaciones en Girón ocurridas el 12 de febrero de 2005.*



*Fuente: [www.semana.com](http://www.semana.com)*

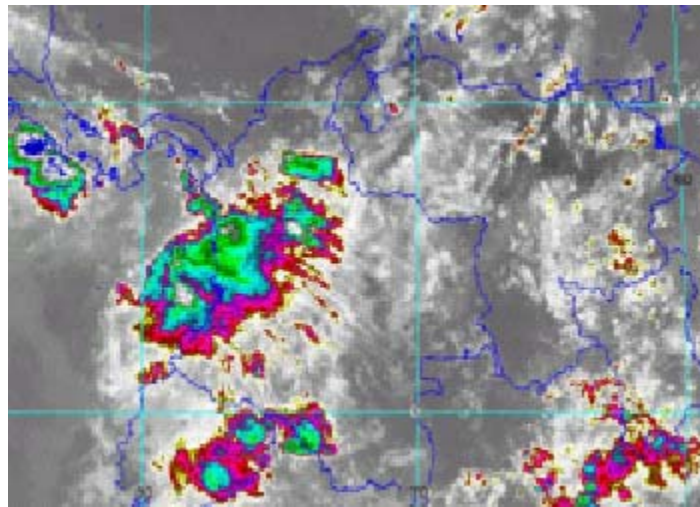
✦ *Escala anual:* Este ciclo de la hidroclimatología colombiana está dominado por fenómenos físicos como la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la actividad de los sistemas convectivos de mesoescala y la actividad del chorro del Chocó (Poveda, 2004). Se mencionarán únicamente los dos primeros, pues el chorro del Chocó afecta únicamente la zona occidental del país.

La oscilación meridional de la ZCIT que se da como resultado del ciclo anual de temperaturas superficiales por efecto de la insolación, constituye el mecanismo físico de mayor importancia para explicar el ciclo anual (o semi-anual) de la hidroclimatología en Colombia. Sobre el centro de Colombia se presentan dos temporadas lluviosas (Marzo-Mayo y Septiembre-Noviembre), y dos temporadas

secas (Diciembre-Febrero y Junio-Agosto), como resultado del doble paso de la ZCIT sobre el territorio (Poveda, 2004).

Muchos de los eventos más intensos de precipitación en Colombia se desarrollan en Sistemas Convectivos de Meso-Escala (SCM). Estudios realizados han permitido identificar la ocurrencia de 75616 eventos de precipitación durante el año de 1998, con una frecuencia un poco mayor sobre la región oceánica que sobre el continente. Solo se desarrollaron SCM en un 7.1% de los eventos oceánicos y en un 5.9% de los continentales, pero su contribución al total de precipitación anual es muy alta: 44% sobre el océano y 38% sobre el continente (Mejía y Poveda, 2003) (*figura 15*). La región Andina de Colombia, el valle del río Magdalena y el Norte de Antioquia presentan la mayor cantidad de SCM (Poveda, 2004).

*Figura 15. SCM sobre Colombia, 5 de junio del 2003.*



*Fuente: Poveda, 2004.*

✦ *Escala Intra-anual:* A esta escala, los fenómenos que mayor influencia ejercen en la hidroclimatología colombiana son: las oscilaciones de 30-60 días, las ondas tropicales del este y los huracanes sobre el Caribe y el Pacífico oriental norte

(cuyos efectos se pretenden evaluar con el presente proyecto para el Área Metropolitana de Bucaramanga).

La variabilidad de baja frecuencia en los trópicos está dominada por variaciones interanuales asociadas con el ENSO y con variaciones intra- anuales asociadas con la llamada oscilación intra-anual, con periodos de 30-60 días. Se ha encontrado que dicha oscilación afecta fuertemente el ciclo diurno de la precipitación en Colombia (Poveda, 2002).

Las Ondas Tropicales del Este se tratan de unas ondas atmosféricas de circulación ciclónica que se desplazan desde el occidente de África hacia el Atlántico y constituyen la génesis de los huracanes sobre el Atlántico Norte y el mar Caribe. Al pasar por Colombia en su camino hacia el Pacífico constituyen una importante fuente de variabilidad climática y de precipitaciones en la costa del Caribe, el valle del Magdalena y el oriente del país (Martínez, 1993), donde se ubica Bucaramanga.

✚ *Escala diurna*: La amplitud del ciclo diurno de temperaturas es la característica más dominante de la variabilidad climática en el trópico (Hastenrath, 1991). Este ciclo, resultante del ciclo de insolación superficial es un factor fundamental en la formación, desarrollo e intensidad de la convección profunda, mecanismo muy importante en el origen de la lluvia tropical, el cual ha sido investigado por diferentes autores con obtención de múltiples conclusiones, aunque todavía haya mucho por investigar sobre este tema en el que se debe profundizar (Poveda, 2004).

## **2.4. PRECIPITACIÓN GENERADA POR HURACANES**

Durante el paso de un huracán se producen grandes cantidades de lluvia, lo cual es una forma de disipar la energía producida por este evento. Sin embargo, algunas precipitaciones provocadas por los huracanes pueden ocurrir a cientos de kilómetros de las costas, afectando regiones que normalmente no se verían alcanzadas por la gran fuerza de los vientos huracanados. Algunas de las cantidades de precipitación más grandes asociadas con los sistemas tropicales son producidas por Tormentas Tropicales débiles que tienen una velocidad de avance mucho más lenta (de 1 a 10 mph) o se estacionan sobre un área (<http://www.fema.com>).

En cuanto a Colombia, que posee un clima propio de la zona tórrida, las estaciones de verano o invierno no son excluyentes, razón por la cual no se pueden discriminar exactamente los periodos de lluvia y sequía, aunque sí se pueden diferenciar de manera general, lo cual no quiere decir que en el periodo de verano no se presenten días fríos y lluvias esporádicas y viceversa. Esto se aplica para tener en cuenta que no toda la precipitación ocurrida en la época de huracanes es generada por estos, pues hay muchos otros factores generadores de lluvias, como los que se mencionaron en la sección 2.3 de éste capítulo.

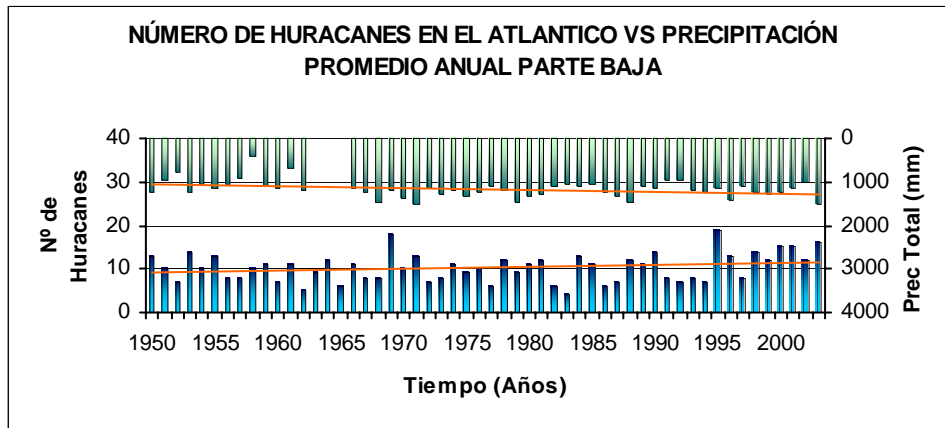
A pesar de las muchas variables que pueden influir en los regímenes o eventos específicos de precipitación (haciendo ya una ubicación en la zona de evaluación de la misma), se cree que el paso de los distintos huracanes por el Océano Atlántico y Pacífico, lo cual se presenta en el segundo semestre del año (generalmente entre Agosto y Octubre); pueda estar incidiendo en algún grado, en la misma época, en la ocurrencia de eventos de precipitación en zonas interiores del país como la que se pretende analizar.

Es lógico esperar que en las costas cercanas al paso del huracán o ciclón, este produzca eventos considerables de precipitación, pero se quiere establecer en qué grado estos fenómenos afectan los regímenes lluvia en zonas más al interior del país como la zona de estudio.

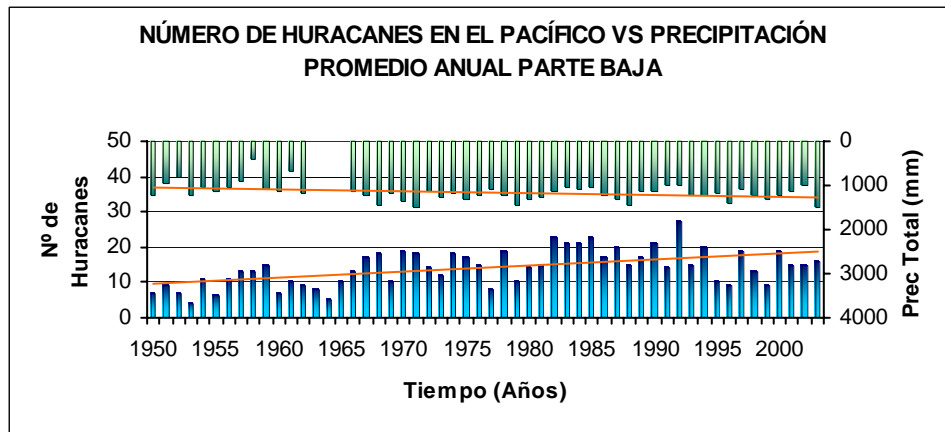
Usando los registros disponibles sobre precipitación (tanto para la parte alta como para la parte baja de la cuenca donde se halla ubicada Bucaramanga), los de ciclones tropicales, y haciendo un análisis global preliminar, se puede apreciar que tanto el número de ciclones tropicales anuales en cada océano como la precipitación anual promedio de las 12 estaciones situadas en la parte baja de la cuenca parecen tener una tendencia creciente, como se muestra en las gráficas 5 y 6, además, si se analizan el número de ciclones tropicales ocurridos por año en ambos océanos, la tendencia es muy similar (*Gráfica 7*). En algunos años (sin descartar que los eventos de lluvia registrados son producidos también por muchas otras causas), la gráfica 5 muestra una relación directa entre el número de huracanes anuales y la cantidad de lluvia registrada para los periodos 1950-1956 y 1997-2002.

En los análisis realizados para las estaciones ubicadas en la parte alta no se encontró la misma tendencia, a pesar de que se tenían los datos de precipitación corregidos. Las series de análisis eran más cortas que para la parte baja (1972-2003). Se observó que en estos últimos 30 años la precipitación anual acumulada promedio ha ido disminuyendo (*Gráfica 8*), caso contrario a lo que ocurre con los ciclones tropicales, (*Gráficas 9, 10 y 11*). Posiblemente esta relación no es similar debido a que el régimen hidrológico de esta zona es bastante diferente al de la parte baja, en donde las lluvias predominantes son por fenómenos orográficos, además, la topografía de la zona juega un papel muy importante.

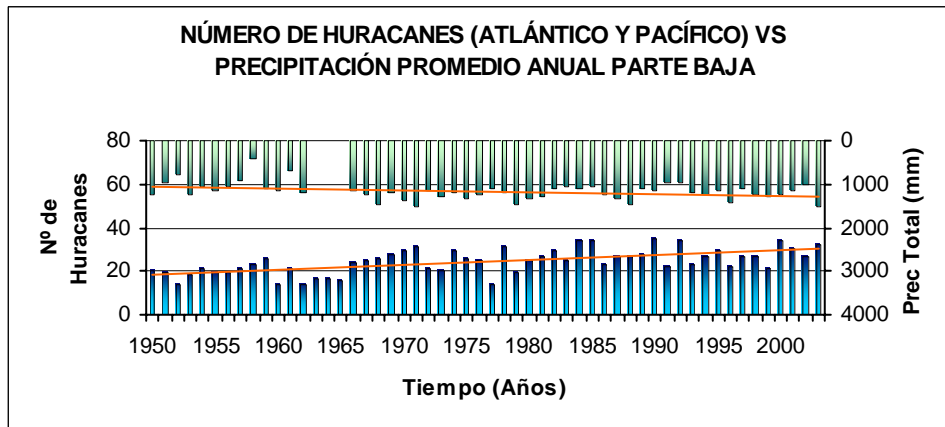
Gráfica 5. Huracanes anuales (Atlántico) vs. Precipitación promedio anual parte baja.



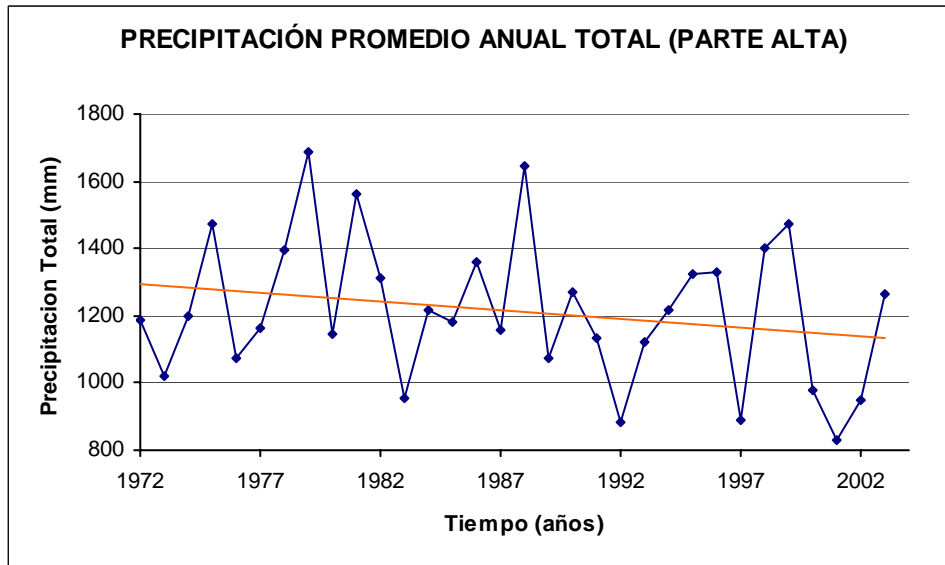
Gráfica 6. Huracanes anuales (Pacífico) vs. Precipitación promedio anual parte baja.



Gráfica 7. Huracanes anuales (Atlántico y Pacífico) vs. Precipitación prom. anual parte baja.

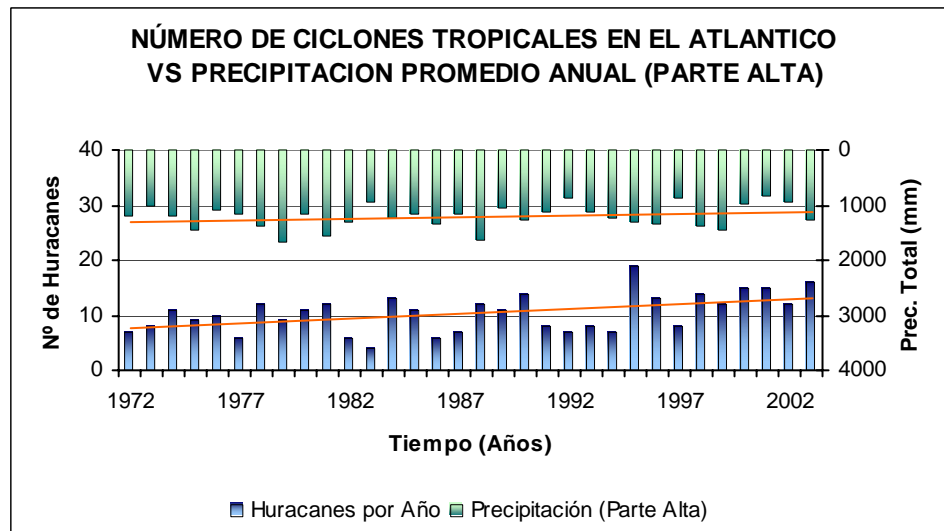


Gráfica 8. Precipitación promedio anual total para la parte alta (1972-2003).



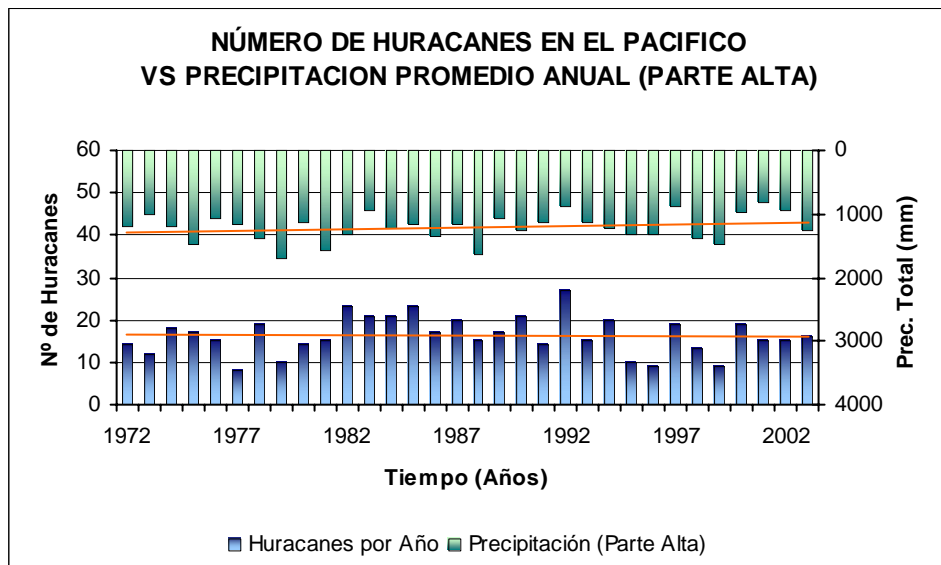
Fuente Investigación de los autores.

Gráfica 9. Huracanes anuales (Atlántico) vs. Precipitación promedio anual parte Alta.



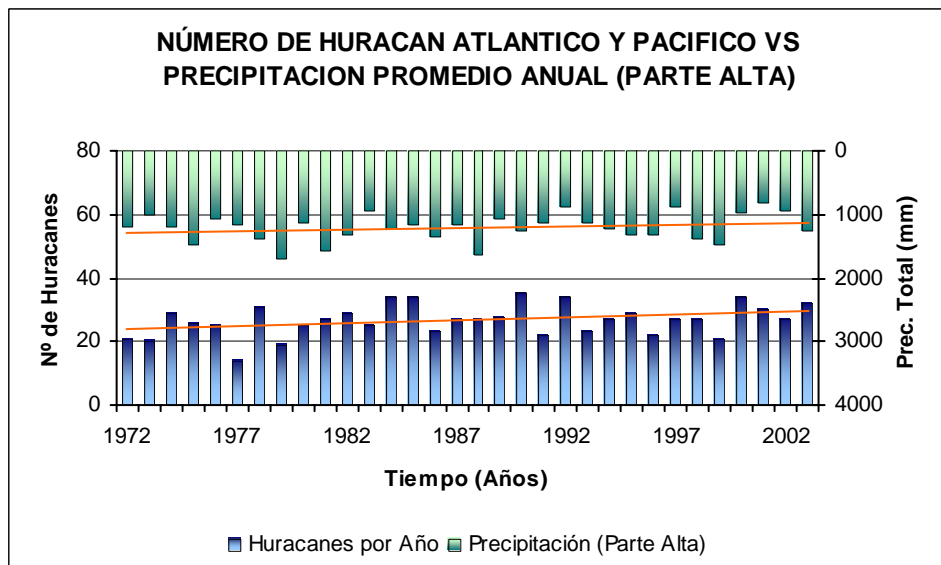
Fuente: Investigación de los autores.

Gráfica 10. Huracanes anuales (Pacífico) vs. Precipitación promedio anual parte Alta.



Fuente: Investigación de los autores.

Gráfica 11. Huracanes anuales (Atlántico y Pacífico) vs. Precipitación promedio anual parte Alta.



Fuente: Investigación de los autores.

Análisis como los realizados para la parte baja, sumados a observaciones informales como por ejemplo el hecho de notar que durante el paso de huracanes por el Atlántico los días en la ciudad se tornan opacos y lluviosos, motivan a realizar un estudio con algunas herramientas adecuadas para tratar de llegar a conclusiones puntuales, lo cual se realiza en los capítulos siguientes.

## **3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

### **3.1. INTRODUCCIÓN**

La utilización de métodos estadísticos para la comparación de variables proporciona una gran ayuda en el momento de generar valores numéricos que cuantifiquen el grado en que las variables están relacionadas. Estos métodos por lo general son sistemáticos, lo cual permite el uso o la implementación de programas de computador u otras herramientas que agilizan y facilitan los cálculos. No obstante, lo primordial para obtener finalmente resultados aplicables a la vida cotidiana y que simulen con cierto grado de fidelidad lo que físicamente se ha modelado, sigue siendo la interpretación humana, y en este sentido se tiene que estar familiarizado con los métodos estadísticos disponibles, con el método a utilizar y con las variables a relacionar.

### **3.2. VARIABLES**

Estas son de dos tipos: las que dependen de los ciclones tropicales y las que dependen de la precipitación. Para tener en cuenta el comportamiento de las variables con sus unidades respectivas, se hace a continuación una leve explicación de cada una de ellas.

#### **3.2.1. Variables representativas de la precipitación**

⊕ Precipitación (mm): Es la cantidad de lluvia que se registra en cada una de las estaciones utilizadas para el análisis. Los mm representan la altura de la lámina de

agua que cae directamente en un área de un metro cuadrado ( $1\text{m}^2$ ), lo que equivale a un litro/ $\text{m}^2$ .

### **3.2.2. Variables representativas de los huracanes**

✦ Distancia (Km): Ésta es una magnitud polar que tiene en cuenta la curvatura terrestre, calculada a partir de la resultante entre latitudes y longitudes de cada punto por donde avanza un ciclón hasta el punto en donde se hallan las estaciones utilizadas, de la forma en que se describió en el capítulo 1. Se relacionarán independientemente con la precipitación la dos componentes (X y Y) de ésta distancia polar y la resultante en sí.

✦ Velocidad (Kph): Es la velocidad tangencial que alcanzan los vientos de un ciclón tropical o de un huracán en inmediaciones de su ojo. También será relacionada con la precipitación.

✦ Tiempo (días): Es una variable común para los huracanes y la precipitación, sobre la que se comparan las demás series. Está presente en todas las relaciones.

### **3.3. MÉTODO ESTADÍSTICO A EMPLEAR**

Las series de tiempo que incluyen las diferentes variables serán comparadas usando un “Análisis de Covarianza”. Este es un método de correlación lineal que asocia dos variables, por lo que se puede denominar “bivariado”. El coeficiente de covarianza R, es usado para estimar el grado de asociación de las dos series y su dependencia lineal. Existen varios tipos de coeficientes de correlación usados en estadística. El R que se utilizará se define entre dos variables, X y Y, como (Zhou, 2000):

$$r_k^{ij} = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (x_t^{(i)} - \bar{x}_t^{(i)}) \cdot (x_{t+k}^{(j)} - \bar{x}_{t+k}^{(j)})}{\left[ \sum_{t=1}^{N-k} (x_t^{(i)} - \bar{x}_t^{(i)})^2 \cdot \sum_{t=1}^{N-k} (x_{t+k}^{(j)} - \bar{x}_{t+k}^{(j)})^2 \right]^{1/2}}$$

Donde  $\bar{x}_t^{(i)}$  es la media de los primeros N-k valores de la serie i,  $\bar{x}_{t+k}^{(j)}$  es la media de los últimos N-k valores de la serie j,  $n$  es el número total de observaciones (Salas, 1995) y  $X_i$  y  $Y_j$  son la  $j^{\text{th}}$  observación de las variables X y Y.

La variable  $k$  (llamada “lag” o salto), representa un desfase entre las dos series de tiempo a comparar.  $K$ , para efectos de ésta investigación, es una medida de tiempo en días, que varía entre 0 y 28 (estos límites se escogen a juicio de quien use el método). De esta forma, un  $k=0$  representaría, entre dos variables cualquiera, como por ejemplo la distancia y la precipitación, una relación entre la distancia a la que en un día cualquiera se encuentra un ciclón tropical y la precipitación que se registra el mismo día; mientras que un  $k=5$  estaría relacionando la distancia a la que en un día cualquiera se encuentra un ciclón y la precipitación que se registra 5 días después.

El valor del coeficiente de correlación varía entre -1 y 1. Si el coeficiente de correlación o covarianza es mayor de 0, se dice que las dos variables están correlacionadas positivamente; en este caso la variable Y tiende a incrementarse con los incrementos de la variable X. Por el contrario, si el coeficiente de covarianza es menor de 0, las variables están correlacionadas negativamente, en cuyo caso Y tiende a decrecer cuando X se incrementa. Cuando el coeficiente de correlación es 0, las variables X y Y están estadísticamente no correlacionadas (Zhou, 2000).

### **3.4. APLICACIÓN DEL MÉTODO**

Se usó como herramienta para calcular los coeficientes de covarianza (entre distancia-precipitación, velocidad-precipitación, componente  $X$ -precipitación y componente  $Y$ -precipitación) una hoja de cálculo en donde se introducían los argumentos (simplemente se “copiaban” desde otra hoja de cálculo que hacía las veces de “base de datos”) tales como nombre, días de ocurrencia del ciclón y la serie de tiempo con cada una de las variables propias de los ciclones (distancia, componente de la distancia en  $X$ , componente de la distancia en  $Y$  y velocidad).

La hoja de cálculo estaba programada para que a partir de la fecha de ocurrencia del ciclón tropical, buscara e introdujera las precipitaciones correspondientes a dichas fechas en todas las estaciones que registraban datos para esos días (incluyendo un promedio con los datos de las estaciones que estuvieran funcionando), calculando luego los respectivos coeficientes de covarianza para varios “lags” o saltos (se implementaron lags desde 0 hasta 28). Los resultados se iban almacenando en unas tablas de resultados que se generaban automáticamente cada vez que se introducían los argumentos (esto se logró con los llamados “macros” que proporciona Excel, que fue la hoja de cálculo utilizada). Estos resultados se encuentran adjuntos en los anexos digitales del libro.

### **3.5. LIMITANTES DEL MÉTODO EMPLEADO**

Luego de implementar el método estadístico para calcular los coeficientes de covarianza entre las múltiples variables, se encontraron algunos resultados que no representaban fielmente la relación física entre éstas. Se mencionan a continuación algunas de éstas limitantes, propias no del método en sí, sino de la variabilidad temporal de las series representativas de los ciclones y huracanes.

### **3.5.1. Comparación de series de poca extensión**

Algunos de los ciclones tropicales tienen una duración muy reducida, llegando a observar algunos de ellos que se forman y terminan el mismo día. El resultado de comparar dos series de variables con muy pocos elementos, es una alta probabilidad de obtener coeficientes de covarianza elevados (hasta de 1 o -1) que no representan su verdadera dependencia. Se puede decir que las series muy cortas son poco o nada representativas estadísticamente.

### **3.5.2. Variabilidad en la duración de eventos**

No es lo mismo comparar un huracán que dure 4 días con otro cuya duración sea, por ejemplo, de 23. Los coeficientes de covarianza del primero presentan una mayor probabilidad de acercarse más a 1 que los del segundo, no queriendo esto decir necesariamente que esté mejor relacionado con las posibles lluvias generadas por él.

### **3.5.3. Las series a comparar deben tener igual número de datos**

El método de análisis de covarianza requiere que las dos series a comparar tengan la misma cantidad de datos. Para el caso de esta investigación, esto implica que no se puedan tener en cuenta para el cálculo de los coeficientes, las precipitaciones generadas por un ciclón tropical uno o varios días después de que éste haya terminado, que de hecho es un caso muy común.

## **3.6. SOLUCIÓN PROPUESTA AL PROBLEMA ANTERIOR**

Se hizo necesario, en aras de realizar una interpretación adecuada de los resultados estadísticos, complementar éstos resultados con un análisis personal de cada uno de los eventos de ciclones, tanto del Océano Atlántico como del

Océano Pacífico, con el fin de complementar los resultados arrojados por la covarianza.

También se eliminaron del análisis los eventos de ciclones tropicales temporalmente cortos, considerando éstos últimos como los de duración inferior a 5 días, por considerarse poco representativos.

## **4. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **4.1. INTRODUCCIÓN**

De nada sirve emplear el método más avanzado, práctico u óptimo para realizar un análisis de datos, si no se interpreta adecuadamente. De hecho, el “análisis” en sí no lo hace ningún método estadístico, éste es sólo un medio para llegar a descubrir la realidad física que se oculta tras unos números que están tratando de decir algo, pero no siempre se les traduce de la mejor manera. En éste capítulo se muestran algunos de los razonamientos que se usaron para llegar a condensar en las conclusiones lo que se apreció durante el contacto con el comportamiento físico representado por las variables comparadas.

### **4.2. PROCESO DE ANÁLISIS**

Para la realización del análisis se tuvo en cuenta los siguientes aspectos: duración de cada ciclón; coeficientes de covarianza para Distancia-Precipitación, Distancia proyectada NS-Precipitación, Distancia proyectada EW-Precipitación y Distancia-Velocidad; estado que alcanza el ciclón (HR, DP o TT, dependiendo de la velocidad de los vientos); estaciones que registran datos; valores de precipitación (picos, lluvias registradas en todas las estaciones); desfases (lags) y relaciones dentro del ciclón y entre ciclones.

#### **4.2.1. Relación entre distancia total y precipitación**

Usando los resultados de covarianza obtenidos del tratamiento estadístico, se analizó evento por evento, de donde se tomaron los coeficientes de covarianza

mayores y se hizo una selección de los que tenían valor físico lógico, de tal manera que no se tuvieron en cuenta los coeficientes de correlación que correspondían a lags de valores muy reducidos cuando la distancia mínima del ciclón era muy elevada para éstos, por ejemplo, si el ciclón inicia a 3500Km y se aleja cada vez más, un coeficiente de correlación ocurrido con un lag de 1 (desfase de un día) no podría tener sentido físico, pues a esa distancia es poco probable que éste pudiera ser el causante de una lluvia al siguiente día.

Teniendo en cuenta lo anterior, se elaboró una tabla de observaciones en donde se extractaron los valores de los principales parámetros a analizar. Basados en éstos parámetros y en los registros de precipitación de todas las estaciones durante y unos días después (hasta 28) de la duración del ciclón, se fueron elaborando comentarios por evento, los cuales se tuvieron en cuenta para determinar si había o no influencia de una variable sobre la otra y qué grado de influencia. Posteriormente se redactaron conclusiones cada 10 años, para así llegar a determinar el tipo de relación entre las variables y su significado físico.

#### **4.2.2. Relación entre velocidad del viento y precipitación**

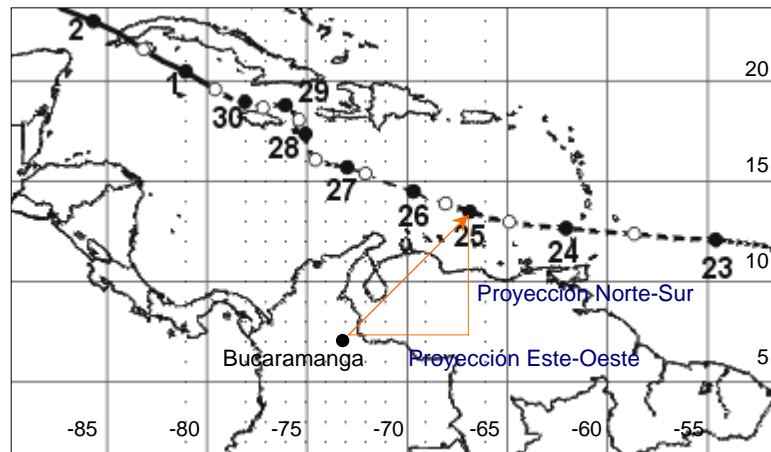
Este análisis se hizo de la misma manera que el anterior y en forma simultánea.

#### **4.2.3. Relación entre proyecciones (EW, NS) y precipitación**

Habiendo encontrado ya ciertas características generales en el comportamiento y en el desplazamiento de los ciclones tropicales, se buscó analizar el comportamiento de la precipitación con las componentes de desplazamiento (Norte-Sur, Este-Oeste). Para esto, se realizaron los mismos análisis estadísticos mencionados anteriormente, pero a diferencia de utilizar la distancia desde Bucaramanga hasta los puntos de posición del ciclón Tropical, se utilizaron las proyecciones calculadas para los puntos de posición del ciclón tropical y la zona

en estudio. En la figura 16 se ilustran las proyecciones para un huracán del Atlántico. El mismo proceso se siguió para los ciclones del Pacífico.

Figura 16. Proyecciones Este-Oeste y Norte-Sur para el Huracán Lili (Océano Atlántico, 24 Sep-04 Oct/2002) en el día 25 de Septiembre.



Fuente: Investigación de los autores.

Para éste análisis se eliminaron también los coeficientes de covarianza a diferentes lags que no proporcionaban resultados físicos lógicos y se tuvo en cuenta a todas las estaciones. Además se utilizaron los ciclones tropicales mayores a diez días para obtener así un análisis más representativo.

#### 4.2.4. Otras relaciones

Se establece una comparación entre rangos de magnitudes de precipitación presentados en días de ocurrencia de ciclones tropicales con el fin de identificar la cantidad de lluvia producida en ésta época. Para esto se tienen en cuenta el número de eventos de cada rango establecido, usando los registros de precipitación de cada estación.

## 4.3. RESULTADOS

### 4.3.1. Relación entre distancia total y precipitación

#### ✚ *Océano Atlántico:*

Según el análisis estadístico, la correlación positiva prima en éste caso, pues se obtienen coeficientes de covarianza un poco mayores que para la correlación negativa, con valores algo significativos en ambos casos (0.36 y -0.31). Esto se debe posiblemente a la relación entre el desplazamiento de los ciclones en éste océano y el punto de análisis de la precipitación, pues por lo general los ciclones tropicales en ésta área empiezan a distancias que progresivamente disminuyen, llegan al punto más cercano y se alejan de nuevo (ver figura 1, capítulo 1).

Se aprecia una relación inversa entre las longitudes en donde el ciclón se forma y los mayores picos de precipitación, de tal forma que las lluvias se producen casi en el mismo tiempo en que los ciclones se encuentran en el punto más cercano a la zona de estudio. Esto puede tener dos explicaciones: a) que los ciclones produzcan una onda apenas se forman, que viaja hacia el punto de análisis a medida que el ciclón lo hace también (que es lo que se muestra estadísticamente, correlación directa a lags entre 1 y 7) o b) que los ciclones produzcan lluvias inmediatas, el mismo día o uno, dos o tres días después de alcanzar sus posiciones más cercanas (correlación inversa en lags pequeños).

En general, luego de la inspección detallada de cada evento, se llegó a concluir que en el 53.6% de los ciclones tropicales y huracanes analizados en éste Océano, se presentaba algún evento de lluvia de mediana magnitud (entre 10 mm y 30 mm en promedio) registrado en todas las estaciones. En el 46.4% restante de los casos no se apreció realmente nada significativo.

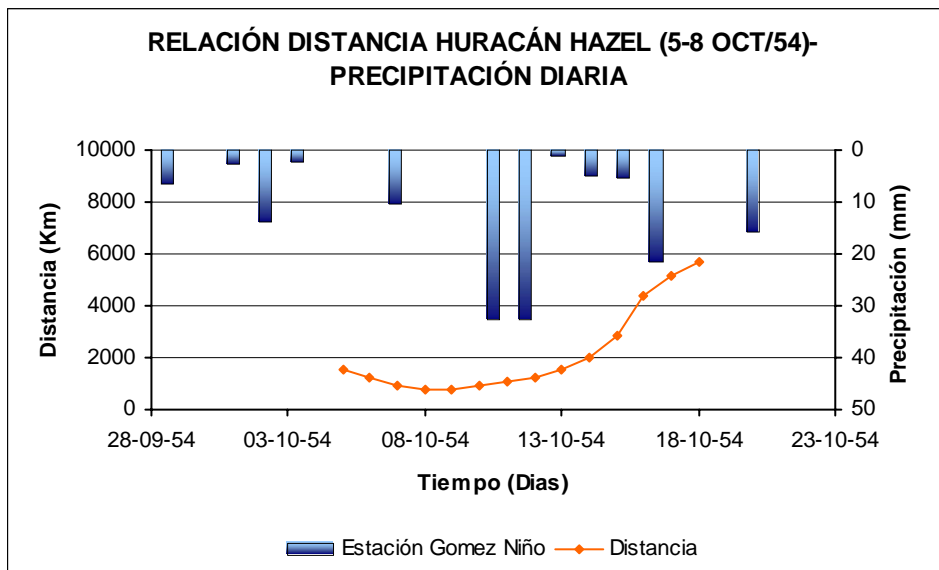
A continuación se muestran gráficas tipo de algunos de los ciclones estudiados con sus respectivas interpretaciones (en aquellos donde el comportamiento de la precipitación era similar en todas las estaciones), que permiten apreciar la forma como se complementaron analíticamente los resultados estadísticos para ésta relación.

Muchos de los ciclones Tropicales que pasaron por sus puntos más cercanos a Bucaramanga (menos de 1000 Km.), mostraban relación con los registros presentados en las estaciones en el mismo día en el que se encontraba en este punto o 1 a 3 días después de que empezaba a alejarse. Estos registros eran valores de precipitación entre 10-30 mm que se presentaban de manera muy similar en todas las estaciones, ya que la onda producida por estos fenómenos es lo suficientemente grande como para generar lluvias en todas ellas.

Esto se puede observar en la gráfica 12 en donde se aprecia el desfase de las lluvias en 2 y 3 días después de que el huracán Hazel pasara por su punto más cercano a 738.1 Km. Después se puede observar como a medida que el ciclón tropical se aleja, los registros de precipitación van disminuyendo. También se aprecia que la cantidad de precipitación generada se encuentra aproximadamente entre 10 y 30 mm.

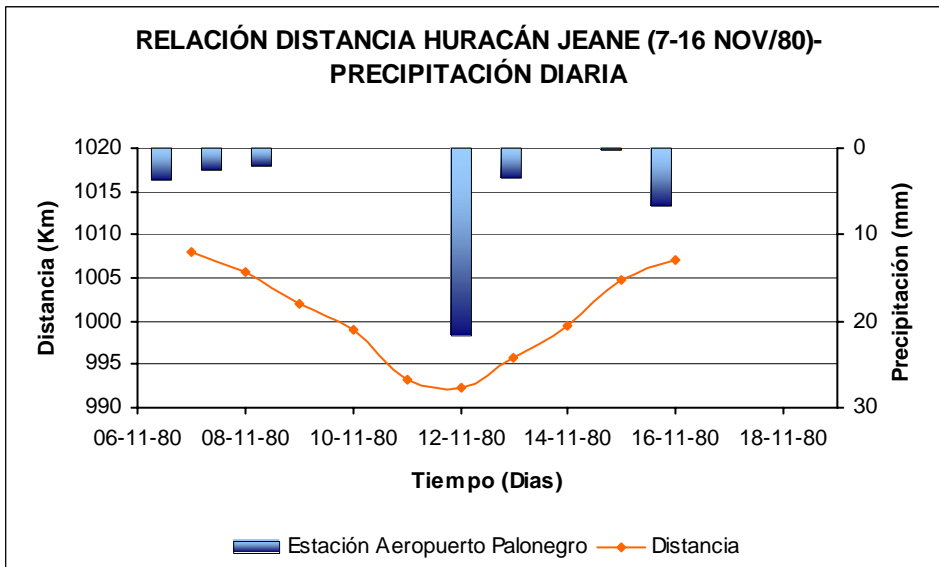
Otro caso particular que se presentó en los ciclones tropicales analizados fue que varios de ellos, que pasaron por su punto mas cercano, generaron lluvias solo en el día en que su distancia con respecto a Bucaramanga fue la menor, como los huracanes Edith en 1971 y Jeane en 1980, que solo presentaron lluvias considerables en el día en que se encontraron a la menor distancia (*gráficas 13 y 14*).

Gráfica 12. Relación Distancia –Precipitación diaria parte baja, huracán Hazel.



Fuente: Investigación de los autores.

Gráfica 13. Relación Distancia–Precipitación diaria parte baja, huracán Jeane.

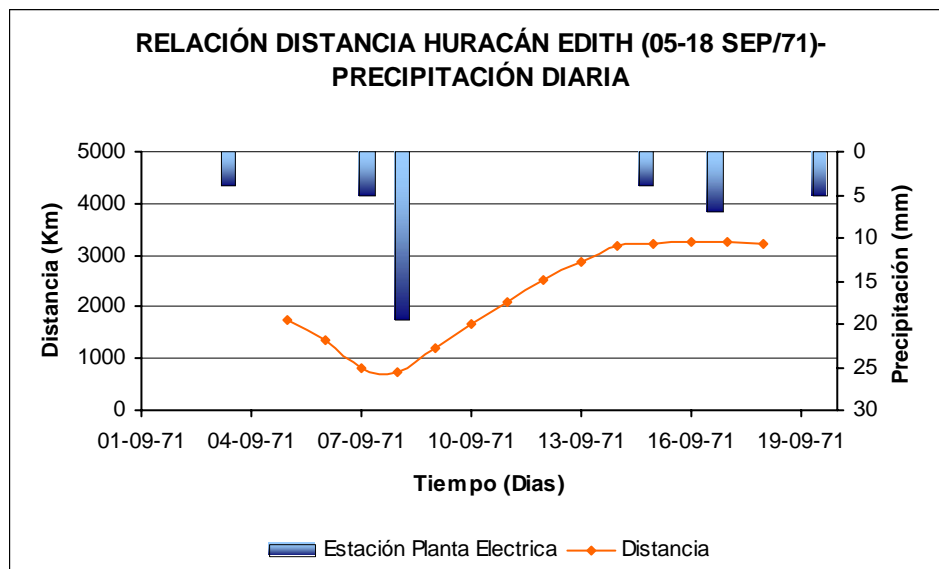


Fuente: Investigación de los autores.

Otro caso se presentó con los ciclones tropicales que terminaban en su punto más cercano a Bucaramanga, de los cuales algunos estadísticamente, como ya se

mencionó, no pudieron ser analizados debido a su corta duración. Estos ciclones en muchos casos presentaban lluvias desfasadas hasta en 4 días (dependiendo de la distancia a la que finalizaban), después de terminar, y no presentaban lluvias significativas en los días en los que el ciclón estuvo el océano, tal como lo muestra la gráfica 15

Gráfica 14. Relación Distancia–Precipitación diaria parte baja, huracán Edith.



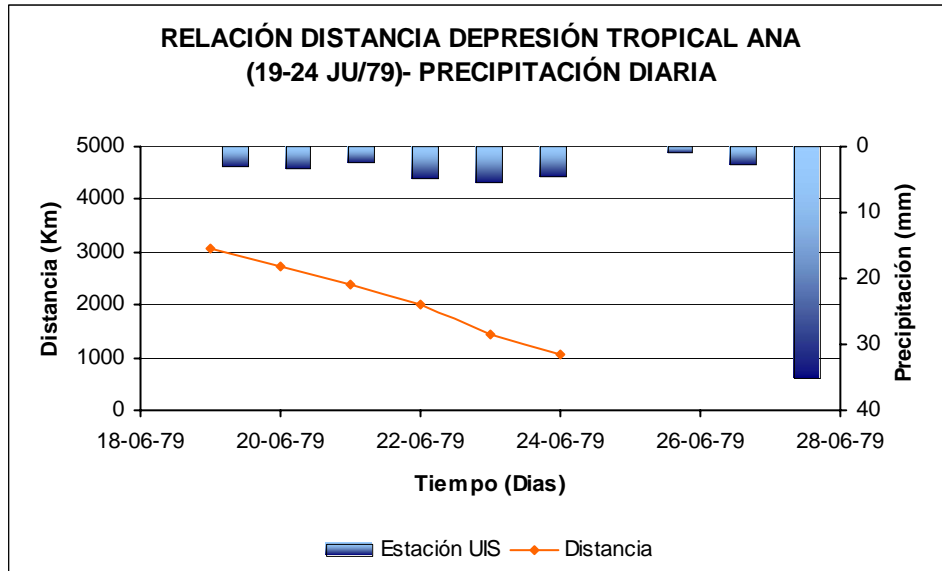
Fuente: Investigación de los autores.

Algunos ciclones tropicales también presentaron características especiales, como aquellos que al irse acercando a Bucaramanga provocan aumentos en la precipitación y luego al alejarse presentaban disminución en los registros. Esto se presentó en el huracán Joan, aunque el día en que se encontró en su punto más cercano, no se presentó el mayor valor de lluvia sino hasta 3 días después (gráfica 16).

Otros por el contrario, comienzan en su punto más cercano y progresivamente se van alejando, estos ciclones tropicales se generan cerca del caribe colombiano y

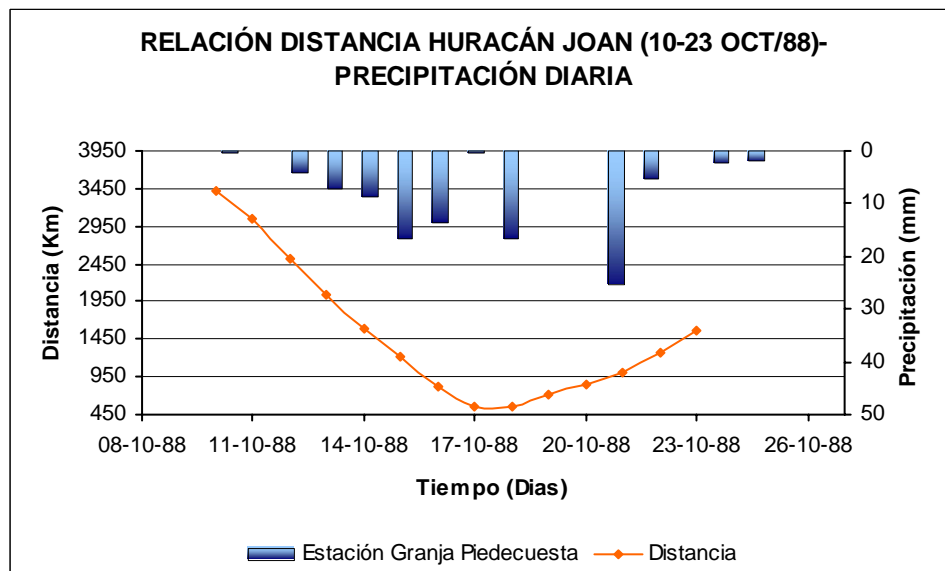
presentan mayor desfase de las lluvias que aquellos que llegan en sentido Este-Oeste (gráfica 17).

Gráfica 15. Relación Distancia–Precipitación diaria parte baja, Depresión Tropical Ana.



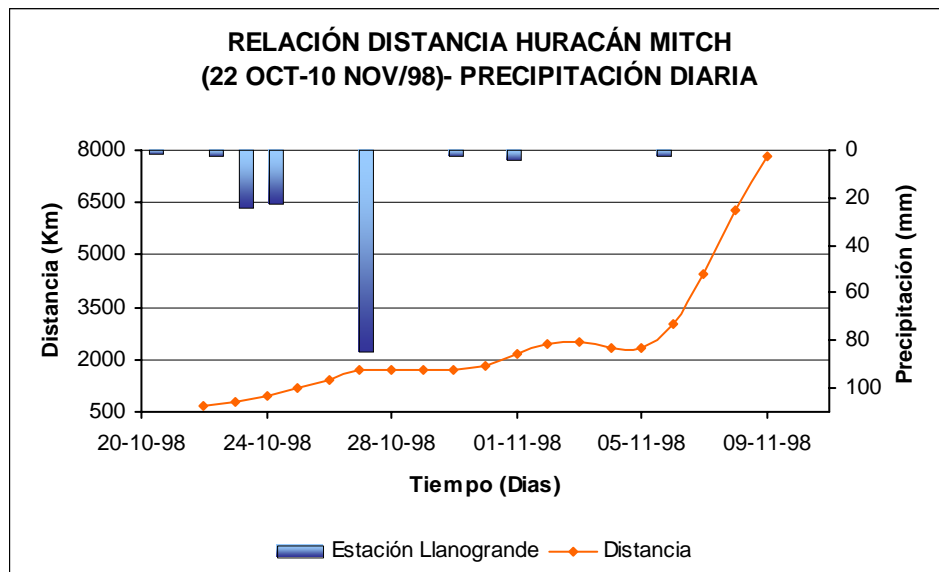
Fuente: Investigación de los autores.

Gráfica 16. Relación Distancia–Precipitación diaria parte baja, huracán Joan.



Fuente: Investigación de los autores.

Gráfica 17. Relación Distancia–Precipitación diaria parte baja, huracán Mitch.



Fuente: Investigación de los autores.

#### ✚ Océano Pacífico:

Para éste caso la relación predominante es inversa, pues se obtienen coeficientes de covarianza principalmente negativos, de -0.35 en promedio. Las mayores magnitudes de coeficientes de correlación o covarianza se obtuvieron al lag 3 (-0.43 en promedio), lo que se confirma con el análisis visual de los eventos, donde se detectó en una gran cantidad de casos que registraban precipitaciones en todas las estaciones y de valores relativamente altos (comparados con los registros que se venían dando), unos pocos días después de haberse formado el ciclón y de empezar a alejarse hacia el Oeste. En cuanto más velocidad alcanzaba el ciclón posteriormente, más duración tenía y menos distancia se interponía entre éste y la zona de estudio; más marcados eran los “picos” que se registraban. Pareciera que en la fase de formación del ciclón pudieran medirse con las lluvias que alcanzaban la zona de estudio unos días después, la magnitud que alcanzaría el ciclón.

En el Océano Pacífico los ciclones se forman a la menor distancia de la zona de estudio y se alejan a medida que avanzan y evolucionan, lo que puede explicar la relación apreciable entre distancia y precipitación, y el hecho de que las mayores lluvias se generan a los pocos días de inicio de los mismos.

El desfase o lag predominante en cuanto a número de ocurrencia o frecuencia fue el 7, con valores promedio de covarianza de  $-0.34$ . Se pudo apreciar que los efectos de los ciclones en el Pacífico pueden demorar varios días, pues se presentaron correlaciones del orden de  $-0.28$  desfasadas hasta 12 días, y visualmente se apreciaron casos de precipitación generada luego de 15 días, dependiendo de las longitudes alcanzadas desde el ciclón hasta la zona de estudio. Incluso se apreciaban los efectos cuando éstos habían ya finalizado.

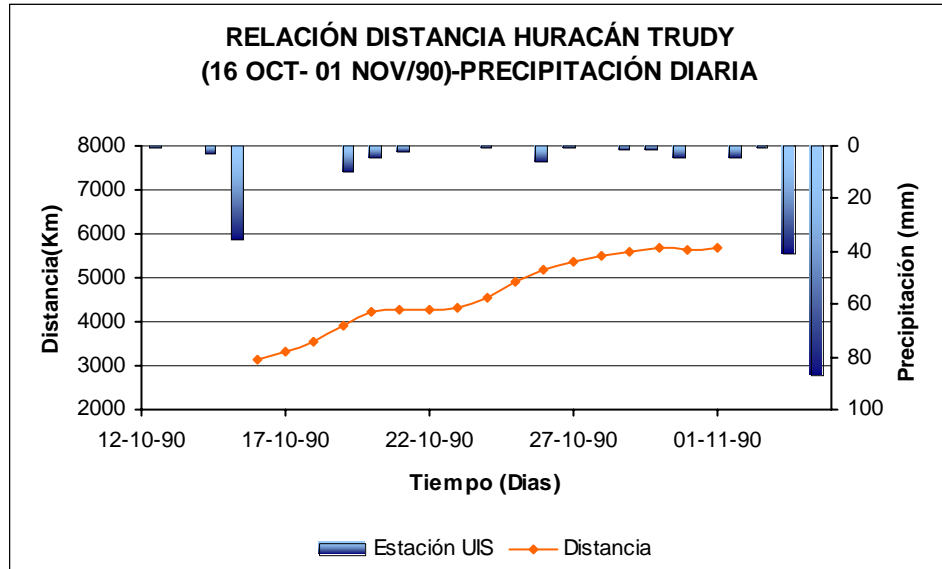
Se llegó a concluir que en el 78.3% de los ciclones tropicales y huracanes analizados en éste Océano, se presentaba algún evento de lluvia de mediana magnitud registrado en todas las estaciones, mientras que en el 21.7% restante de los casos no se apreció realmente nada significativo. Se aprecia que la influencia hallada en éste océano es más notoria que la hallada en el Atlántico.

Otro aspecto considerado de significancia fue el haber notado que los ciclones que no alcanzan categoría de huracán (es decir, de velocidades inferiores a 118Km/h) producían valores de precipitación apenas detectables por que se registraban en todas las estaciones, pero que duraban más tiempo, es decir, menos intensos. Esto se aplica también para el Océano Atlántico.

Se muestra ahora una serie de gráficas representativas de eventos de huracanes en el Pacífico con sus interpretaciones, de forma similar a como se hizo para el Océano Atlántico.

En la gráfica 18 se puede apreciar un caso en que durante la duración del huracán los registros de precipitación fueron menores de 10mm, pero a los tres días de que éste hubo terminado se presentaron picos muy fuertes en la estación de la UIS.

Gráfica 18. Relación Distancia–Precipitación diaria parte baja, huracán Trudy.

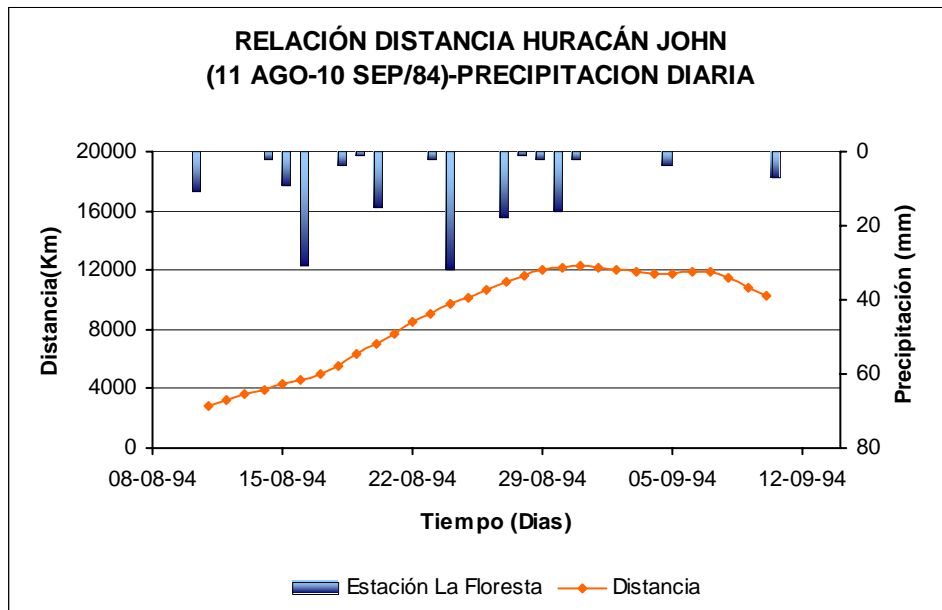


Fuente: Investigación de los autores.

En la gráfica 19, en la cual se muestra el huracán más largo en las series analizadas para los dos océanos (31 días de duración), se pueden apreciar las precipitaciones generadas por éste a partir del quinto día de su inicio. Se aprecia también que las magnitudes de precipitación disminuyen a medida que el huracán se aleja. Se ve claramente la relación inversa entre distancia y precipitación y el desfase de varios días entre las dos variables. A pesar de que el huracán sobresalió por su duración e intensidad, se desarrolló a distancias altas y no produjo precipitaciones en la estación graficada superiores a 30mm (lo que refuerza la hipótesis de que los huracanes no producen precipitaciones muy fuertes). Las demás estaciones muestran la misma tendencia.

En la gráfica 20 se aprecia un ciclón de corta duración que produce precipitaciones decrecientes a medida que éste se aleja de la zona de estudio, inclusive días después de este haber terminado, lo que confirma la correlación negativa existente entre la distancia a la que se presentan los ciclones en éste océano y la precipitación.

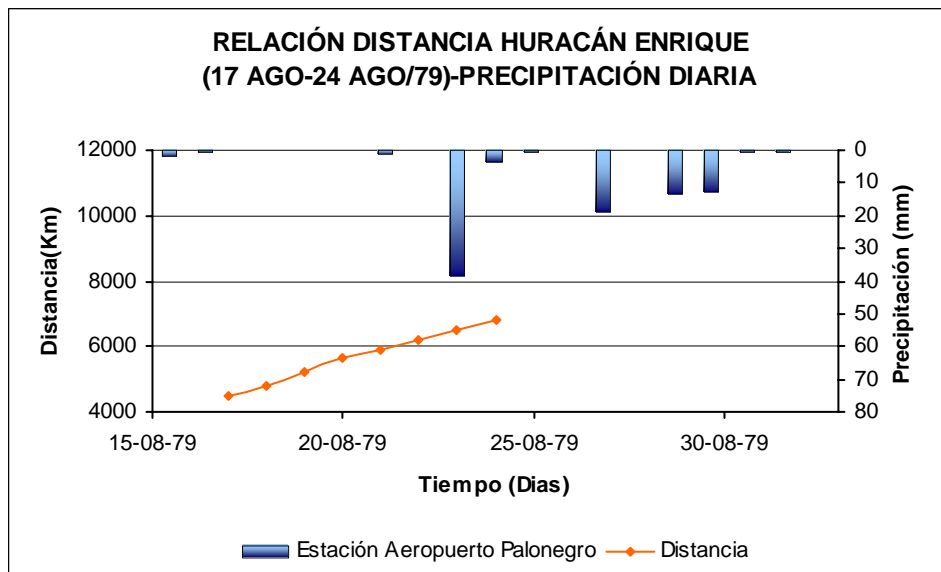
Gráfica 19. Relación Distancia–Precipitación diaria parte baja, huracán John.



Fuente: Investigación de los autores.

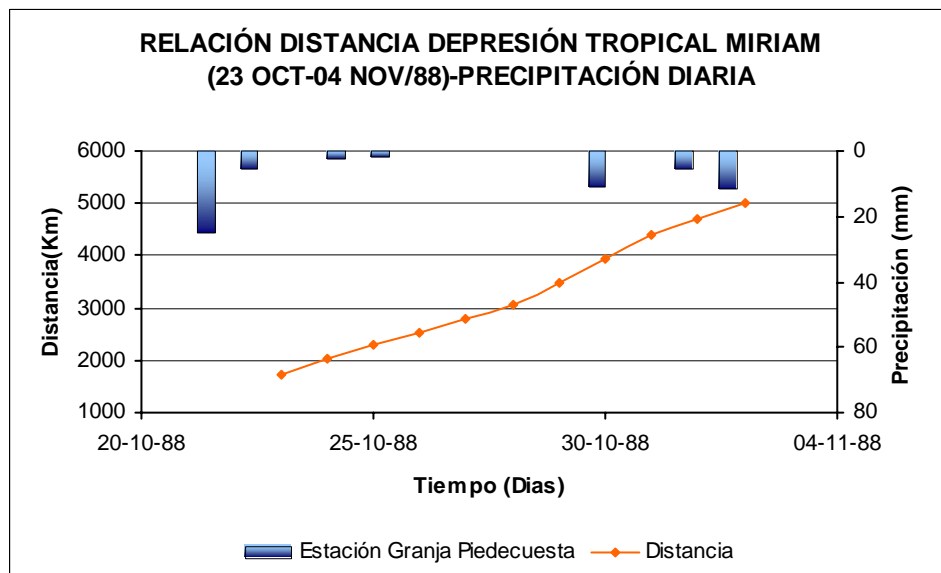
En la gráfica 21 se muestra la forma en que la que la Depresión Tropical Miriam produce precipitaciones inferiores a 10mm de 6 a 9 días después de haber iniciado a una distancia relativamente cercana para éste océano (1716,99Km).

Gráfica 20. Relación Distancia–Precipitación diaria parte baja, huracán Enrique



Fuente: Investigación de los autores.

Gráfica 21. Relación Distancia–Precipitación diaria parte baja, Depresión Tropical Miriam.



Fuente: Investigación de los autores.

#### **4.3.2. Relación entre velocidad del viento y precipitación**

No se encuentra una relación clara entre la velocidad de los vientos de los ciclones de los dos océanos y la precipitación generada. En primer lugar, los valores de velocidad se repiten frecuentemente y consecutivamente, lo que impide realizar un buen análisis estadístico. Por lo general las velocidades menores se presentan al inicio y al final del ciclón, cuando este se encuentra en estado de DT (Depresión Tropical) o TT (Tormenta Tropical), y muchas veces es la misma, por lo que no se puede concluir si una correlación negativa alta se debe al inicio del ciclón asociada a un lag determinado o al final del ciclón asociada a un lag menor que el anterior. Por otra parte, se encuentra mucha aleatoriedad entre los coeficientes de Covarianza y los lags a los que se presentan, posiblemente debido a lo estocástico de las dos series a comparar, diferente a lo que ocurre en la relación distancia-precipitación, donde la serie de precipitación tiene comportamiento estocástico mientras la de distancia tiene un comportamiento menos variable y más organizado.

#### **4.3.3. Relación entre proyecciones (EW, NS) y precipitación**

##### **✦ *Océano Atlántico:***

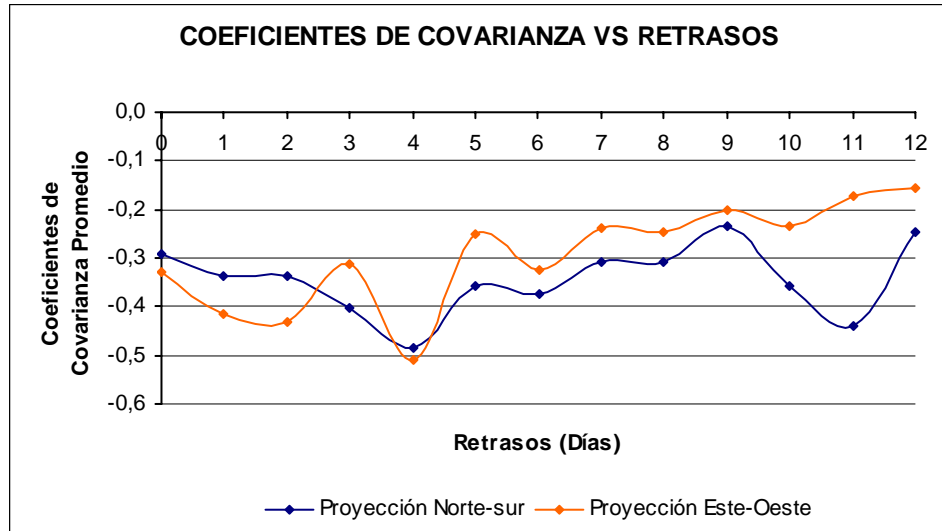
Realizando una comparación entre los coeficientes de covarianza, se observó que para las proyecciones Norte-Sur los valores que primaban eran los negativos, lo cual indica una relación inversa entre éstas proyecciones y la precipitación, es decir, los mayores valores de precipitación se encuentran asociados a los puntos donde los ciclones aparecen alejados en éste sentido, posiblemente debido a que éstas se producen luego del paso de los ciclones por el Norte de la zona de estudio, mientras alcanzan mayores latitudes. El coeficiente de covarianza promedio es de -0.33 para éste caso, y los resultados son inversos a los obtenidos para la relación entre distancia total y precipitación. También se observó que el mayor número de coeficientes de Covarianza representativos para el análisis se

presentó en el lag cero con valores de -0.29 en promedio, lo que parece deberse a las ocasiones en que los ciclones se acercan al Caribe colombiano y se producen picos de precipitación relativamente elevados al poco tiempo de que se alcance la menor distancia.

En los análisis de la proyección Este-Oeste se descubrió, al igual que para la relación distancia-precipitación, que los coeficientes de covarianza dominantes son los positivos, lo que hace pensar que el comportamiento de la relación distancia-precipitación está regida principalmente por el comportamiento de la relación proyección EW-precipitación. Los coeficientes obtenidos fueron de 0.36 en promedio. El mayor coeficiente de covarianza ocurrió en el lag 5 con un valor de 0.46. Para la relación negativa se obtuvo valores de coeficientes de covarianza de -0.32, que no distan mucho de los positivos, resultado también considerable y similar al hallado para la relación entre distancia y precipitación.

En la gráfica 22 se puede observar, no sólo el comportamiento de la relación (se tomó la relación inversa o negativa en ambos casos para lograr una comparación) existente entre las dos proyecciones (NS y EW) y la precipitación, sino además la similitud entre el comportamiento de las dos proyecciones, deducido de las formas parecidas de las curvas. Se aprecia que las covarianzas son mayores para la relación entre proyección Este-Oeste y precipitación en los primeros cuatro lags, y después del lag 4 los coeficientes son mayores para la relación entre proyección Norte-Sur y precipitación. Esta deducción adquiere sentido físico si se tiene en cuenta que en el Atlántico los ciclones se desplazan principalmente en los primeros días de Este a Oeste (*figura 16*) y luego de un tiempo avanzan principalmente en dirección Sur-Norte hasta alcanzar por lo general grandes latitudes.

Gráfica 22. Coeficientes de covarianza negativos entre proyecciones (NS y EW) y precipitación (parte baja) para varios retrasos o lags, en el Océano Atlántico.



Fuente: Investigación de los autores.

#### ✚ Océano Pacífico:

Tanto para la proyección Norte-Sur de la distancia desde el punto en donde se desarrolla el ciclón hasta la zona de estudio, como para la proyección Este-Oeste; la correlación negativa es la que prima, lo que significa que los valores de precipitación mayores están relacionados con la menores distancias (tanto polares como proyectadas), lo cual era de esperarse. No solo se encontró mayor número de coeficientes negativos con valores de correlación superiores a -0.25 (88% frente a un 12%, aproximadamente), sino que sus valores eran mucho mayores.

En el análisis de la proyección Norte-Sur, los coeficientes de covarianza mayores se obtienen en los lags 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10 y 11, con valores entre -0.32 y -0.38. El mayor número de coeficientes de covarianza considerados como representativos de las series analizadas se obtiene al lag 10 con un promedio de -0.34, aunque se obtienen coeficientes muy parecidos e igualmente válidos para los lags del 2 al 11, dependiendo de la proyección de distancia al punto de análisis.

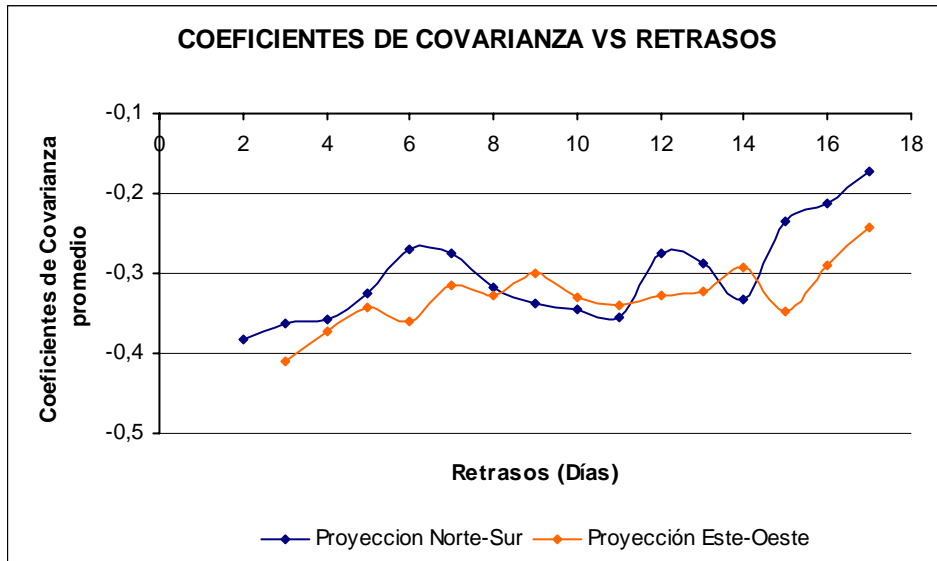
En la proyección Este-Oeste, Los coeficientes de covarianza mayores se obtienen al lag 3, con un promedio de -0.41. El mayor número de coeficientes de covarianza representativos se obtiene al lag 11 con un promedio de -0.34, con resultados similares para los lags del 3 al 13.

Como se ve en la gráfica 23, los resultados de precipitación parecen ser un poco más dependientes de las distancias proyectadas hacia el Este (proyecciones X), lo cual tiene sentido si se tiene en cuenta que la variabilidad en esta dirección es mucho mayor que la variabilidad en dirección Norte-Sur, pues los ciclones tropicales en el Océano Pacífico se desplazan principalmente de Este a Oeste. A pesar de esto, los resultados para las dos proyecciones coinciden en sus relaciones inversas y en los rangos de sus coeficientes de correlación (entre -0.3 y -0.4 en promedio de todos los eventos, para cada lag), así como en los lags para los que los coeficientes son mayores. Se omitieron en la gráfica 23 los valores de las covarianzas en los lags 0, 1 y 2 para la proyección EW, por presentar un escaso número de ocurrencia (0.95% del total de ocurrencia de los demás lags), debido a que se obviaron muchos de éstos valores por carecer de sentido físico, como se explica en 4.3.1.

#### **4.3.4. Otras relaciones**

Las gráficas mostraron una tendencia decreciente (*Gráficas 24a, 24-b, 25-a, 25-b*), lo cual significa que durante ciclones tropicales los eventos menores a 30mm son los que más se presentan. Esta tendencia sería obvia si los registros utilizados fueran los de todos los días (Incluyendo días sin ciclones tropicales), pues eventos extremos de precipitación (por ejemplo mayores a 30mm) siempre serán menos que los eventos relativamente pequeños.

Gráfica 23. Coeficientes de covarianza negativos entre proyecciones (NS y EW) y precipitación (parte baja) para varios retrasos o lags, en el Océano Pacífico.

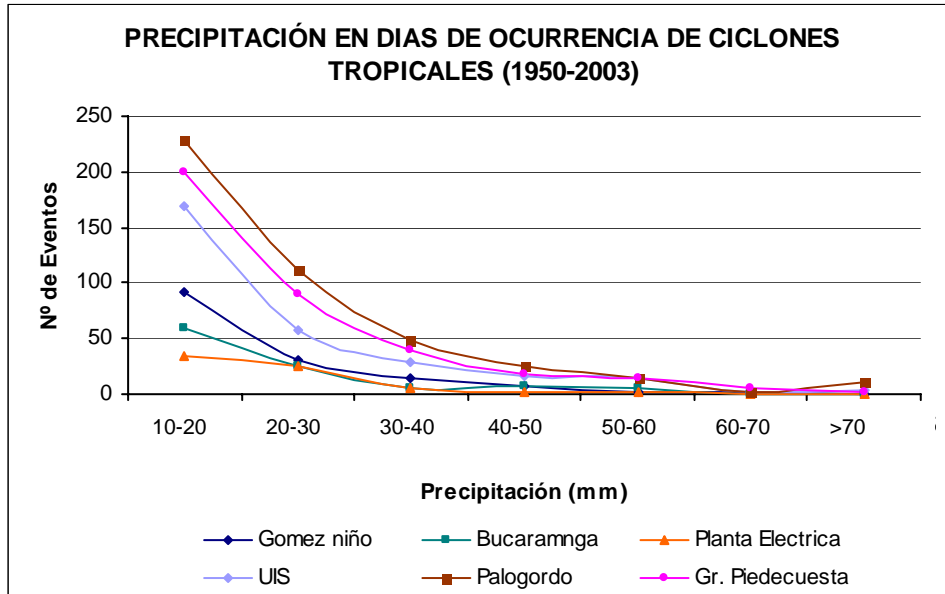


Fuente: Investigación de los autores.

Lo que se pretende mostrar es lo siguiente: por ejemplo, la estación Gómez Niño presentó 19 años y 3 meses de registros durante los 54 años de análisis. Durante este tiempo se presentaron 70 eventos entre 30mm y 40mm, 36 entre 40mm y 50mm, 19 entre 50mm y 60mm, 12 entre 60mm y 70mm y 6 mayores de 70mm. En días de ciclones tropicales se presentaron en esta estación, 14 eventos entre 30mm y 40mm, que equivalen al 20 % del total de los eventos presentados para esta estación; 8 entre 40mm y 50mm que equivalen al 22.2 %, 2 entre 50mm y 60mm que corresponden al 10.5 %, 2 entre 60mm y 70mm que equivalen al 16 % y ningún evento mayor a 70mm en días de ciclones tropicales.

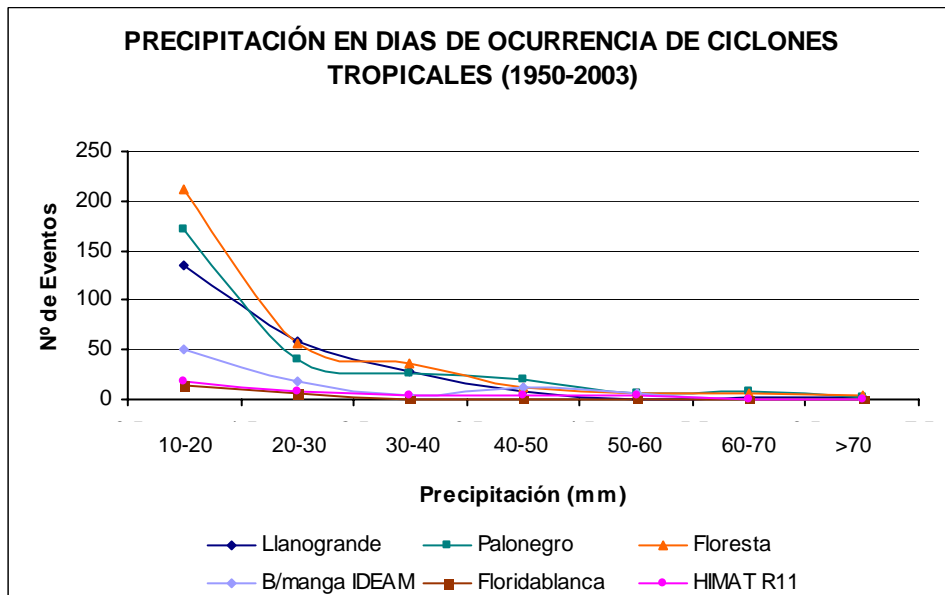
Estos porcentajes muestran para este caso en particular, que la estación Gómez Niño no presenta valores de precipitación altos en día de ciclones tropicales. Este comportamiento se encontró en todas las estaciones (teniendo en cuenta que éstas presentan diferentes tiempos de funcionamiento), incluido también para los ciclones formados en el Océano Pacífico.

Grafica 24-a. Número de eventos de precipitación (parte baja) en días de ciclones tropicales (1950-2003), Océano Atlántico.



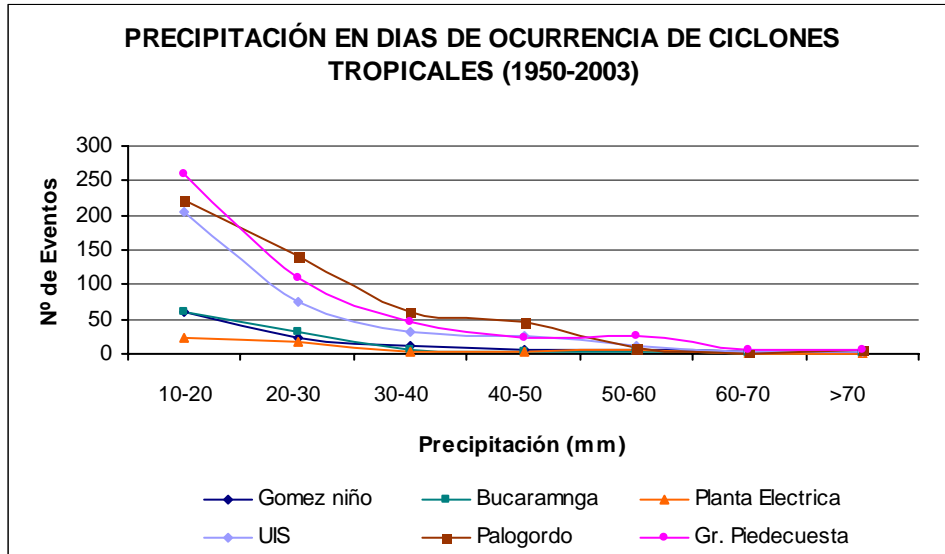
Fuente: Investigación de los autores.

Grafica 24-b. Número de eventos de precipitación (parte baja) en días de ciclones tropicales (1950-2003), Océano Atlántico.



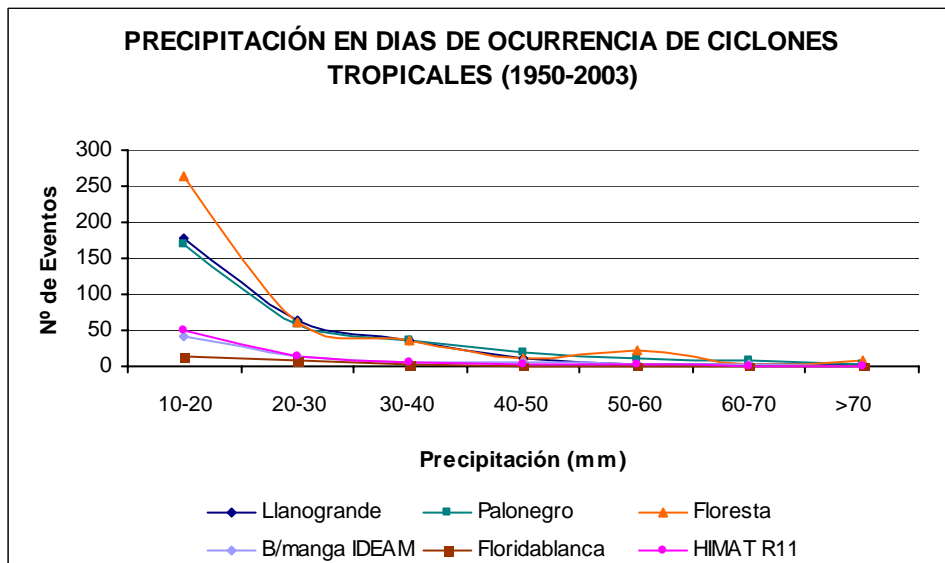
Fuente: Investigación de los autores.

Grafica 25-a. Número de eventos de precipitación (parte baja) en días de ciclones tropicales (1950-2003), Océano Pacífico.



Fuente: Investigación de los autores.

Grafica 25-b. Número de eventos de precipitación (parte baja) en días de ciclones tropicales (1950-2003), Océano Pacífico.



Fuente: Investigación de los autores.

## **5. ANÁLISIS DEL NÚMERO DE MANCHAS SOLARES Y DEL SOI CONTRA EL NÚMERO DE CICLONES TROPICALES**

### **5.1. INTRODUCCIÓN**

Otros de los análisis que se han considerado importantes dentro de esta investigación son el estudio de la posible relación entre manchas solares y el índice de oscilación del sur (SOI) con el número de ciclones tropicales ocurridos en las dos cuencas oceánicas (Atlántico y Pacífico). Estos análisis se han realizado teniendo en cuenta que estas variables generan cambios en los fenómenos climáticos globales y por tal razón pueden estar relacionadas con el número de ciclones tropicales que se forman por año en cada uno de los océanos.

### **5.2. MANCHAS SOLARES Y NÚMERO DE CICLONES TROPICALES**

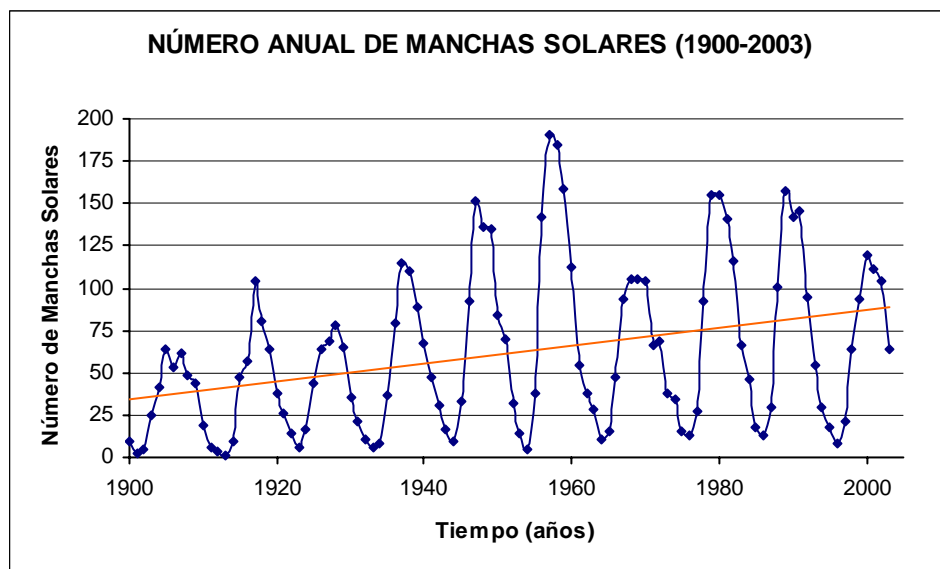
Para entender mejor los análisis posteriores es necesario hacer una pequeña explicación de la definición y características de las manchas solares. Las manchas solares son zonas oscuras y relativamente más frías de la superficie del Sol. Corresponden a zonas en que fuertes campos magnéticos retienen temporalmente el calor que fluye del interior del Sol hacia la fotosfera. Estas manchas emiten menos energía de la normal, pero las áreas que las rodean llamadas las “fáculas solares”, son por el contrario, mucho más brillantes. Por esta razón resulta, que en conjunto, el Sol emite más energía cuantas más manchas solares haya en un momento determinado (<http://homepage.mac.com/uriarte/manchas.html>).

Las manchas solares generalmente crecen por varios días y duran desde varios días hasta varios meses. Observaciones realizadas muestran que el número de

manchas solares no es constante y cambian en un periodo de 11 años llamado el “ciclo de los 11 años” (gráfica 26), o conocido también como el ciclo solar (<http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/sun/atmosphere/sunspots.html>).

Las primeras manchas de un ciclo aparecen junto a los polos solares, en los años siguientes surgen otras, cada vez más cercanas al ecuador solar, hasta completar el denominado “máximo solar”. Después van desapareciendo otra vez (<http://homepage.mac.com/uriarte/manchas.html>). Estudios realizados sobre este tema muestran que las manchas solares han ido progresando durante el paso de los años (gráfica 26).

Gráfica 26. Variación del número de manchas solares en el tiempo.



Datos tomados de: [ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/spt/solar\\_data/sunspot\\_numbers/yearly](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/spt/solar_data/sunspot_numbers/yearly).

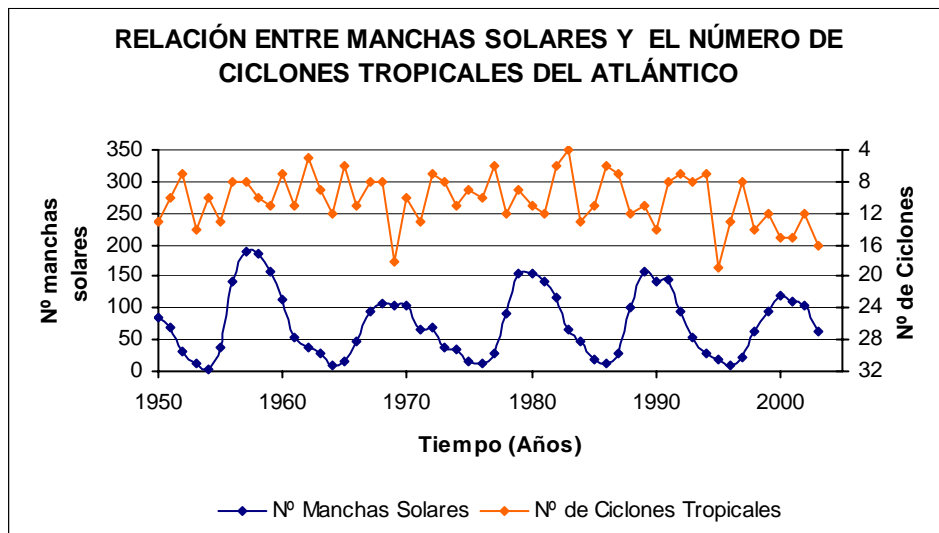
### 5.2.1. Análisis de Covarianza

Teniendo en cuenta que el número de manchas solares influye directamente en la actividad solar y por tal razón podrían tener cierta relación en la formación de ciclones tropicales, se ha realizado un análisis de covarianza similar a los

realizados anteriormente. Estos análisis se realizaron en ambos océanos para series anuales desde 1950 (ya que es la serie de los ciclones tropicales). Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Para el Océano Atlántico se obtuvieron coeficientes de covarianza bastante bajos: 0.06 para el lag cero y 0.02 para el lag uno, lo que indica una muy baja relación (casi nula) entre el número de manchas solares con la formación de ciclones tropicales en el Atlántico. Esto se puede observar en la gráfica 27, en donde la serie de ciclones tropicales presenta un comportamiento muy diferente a la del ciclo de las manchas solares.

Gráfica 27. Relación anual entre manchas solares y el número de ciclones en el Atlántico.

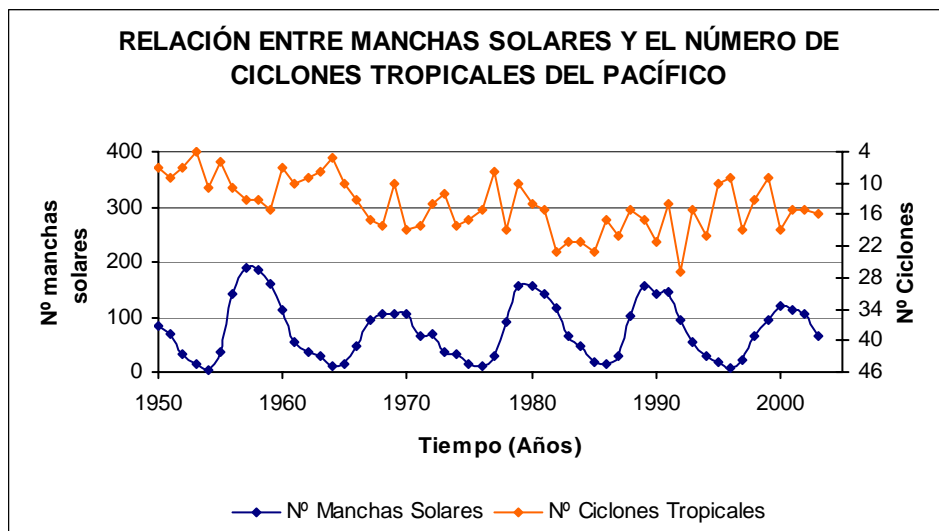


Fuente: Investigación de los autores.

Para el océano Pacífico, a pesar de que los coeficientes de Covarianza no son tan representativos, se presenta una mayor relación entre las manchas del sol con los ciclones generados en este océano. Los coeficientes de covarianza muestran al lag cero un valor de 0.17 y al lag uno 0.24. A pesar de que en los últimos años el número de manchas al igual que el número de ciclones en el pacífico se han incrementado (como ya se ha mencionado), los análisis estadísticos no permiten

comprobar que el incremento entre estas dos variables tenga alguna relación, aunque se debe tener en cuenta que la serie analizada solo es desde 1950 hasta 2004 y en estos años las manchas solares no presentan una tendencia clara de incremento (gráficas 27 y 28).

Gráfica 28. Relación anual entre manchas solares y el número de ciclones en el Pacífico.



Fuente: Investigación de los autores.

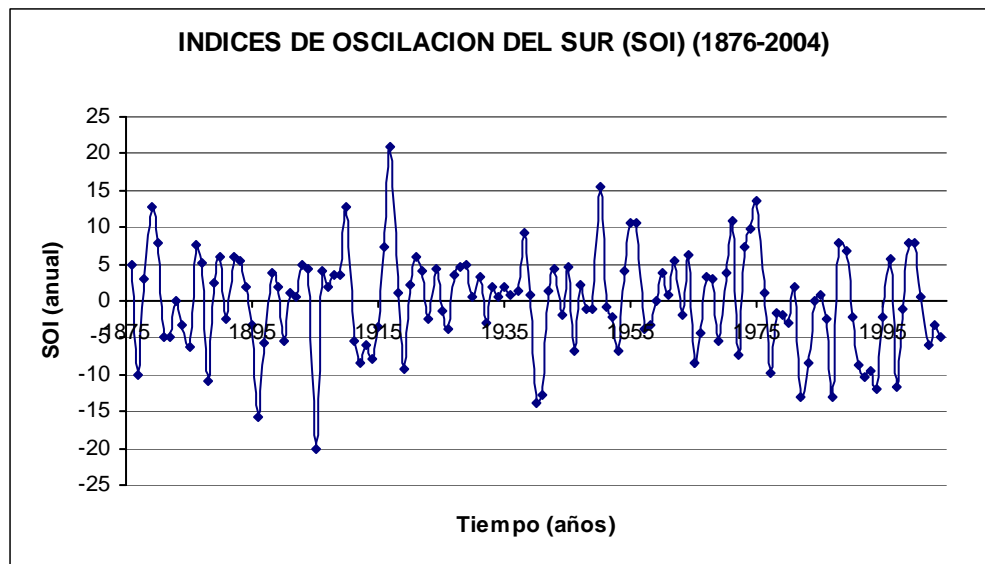
### 5.3. SOI Y EL NÚMERO DE CICLONES TROPICALES

Al igual que para el análisis realizado anteriormente, se dará una breve explicación acerca del fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENSO) y de su contraparte, La Niña; y de los Índices de Oscilación del Sur (SOI) que son los que miden el grado de intensidad de cada fenómeno. El SOI es el índice que mide las diferencias de presión atmosférica entre Tahití (Océano Pacífico) y Darwin (Australia); estas diferencias de presión ocurren en periodos cada dos y cuatro años y por esta razón se le conoce como la Oscilación del Sur (Magaña, Pérez, Conde, Gay, Medina, 2003). El signo negativo del índice indica episodios de El

Niño, mientras que los Índices de Oscilación del Sur positivos, indican episodios de La Niña (*gráfica 29*) (<http://www.bom.gov.au/climate/current/soihtm1.shtml>).

El fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENSO), es una perturbación interanual del sistema climático, oceánico y atmosférico que se caracteriza en el océano por un calentamiento de las aguas superficiales y subsuperficiales (0-300 m) en el Pacífico central y oriental, frente a las costas de Perú y Ecuador (Cane,1983), mientras que en la atmósfera se caracteriza principalmente por un desplazamiento desde su posición normal, de los grandes sistemas de formación de nubes y ascenso de humedad del pacifico tropical Indonesio hacia el Pacifico Americano (Rasmusson y Wallace, 1983).

*Gráfica 29. Índices de Oscilación del sur desde 1876 hasta 2004.*



*Datos ordenados de <http://www.bom.gov.au/climate/glossary/soi.shtml>*

Durante años de Niño o ENSO, los vientos alisios en el Pacífico se debilitan por lo que las aguas más calientes del Pacífico tropical se esparcen a lo largo del ecuador y por tanto, las temperaturas de la superficie del mar en el Pacífico central y del Este son mas elevadas en uno o dos grados centígrados. Aunque no parece

un gran aumento en la temperatura del océano, la cantidad de energía (calor) que esto involucra es muy grande (Magaña, Pérez, Conde, Gay, Medina, 2003).

Con la aparición de una zona de agua caliente en el Pacífico central y del este, la región de mayor actividad convectiva, es decir la zona de precipitaciones más intensas, se desplaza hacia esta parte de los trópicos. Con tales cambios, donde antes llovía poco (por ejemplo, en las islas del Pacífico o frente a las costas de Perú y Ecuador) ahora se producirán lluvias, mientras que donde antes llovía mucho lloverá menos durante El Niño, como en el Pacífico del oeste (Indonesia, norte de Australia, Filipinas). (Magaña, Pérez, Conde, Gay, Medina, 2003).

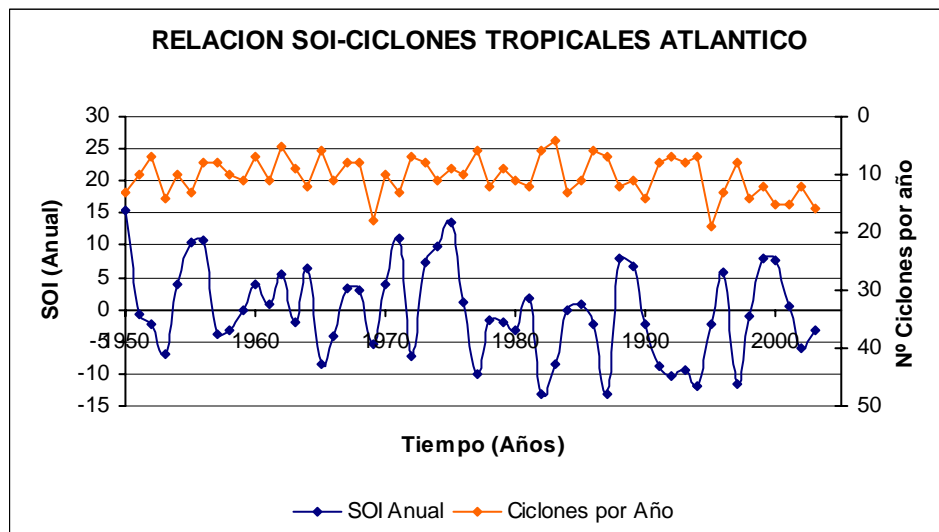
En el caso contrario, en condiciones de No ENSO (Niña), los vientos alisios del noreste en el hemisferio Norte y del sureste del Sur, favorecen el transporte de considerables volúmenes de agua superficial hacia el occidente en donde se acumulan y aumentan el desnivel de la superficie del mar entre el Pacífico ecuatorial occidental (más alto) y el oriental (más bajo). El agua superficial recibe grandes cantidades de radiación solar formando una gran poza cálida en una región que se extiende horizontalmente desde el sudeste de Asia e Indonesia hasta el noreste de Australia. En ella comúnmente se observan temperaturas superficiales mayores de 28.5 °C, lo cual favorece que enormes cantidades de agua sean evaporadas, y que todo el sudeste de Asia e Indonesia sea normalmente muy lluvioso; mientras que, por el contrario, en la región oriental a lo largo del Pacífico tropical americano se observan condiciones de sequía, ("The TAO Project Office", 1997).

### **5.3.1. Análisis de Covarianza**

El análisis de Covarianza permitió encontrar los siguientes resultados:

Para el océano Atlántico se obtuvo un coeficiente de Covarianza de 0.31 al lag cero, aunque el valor de este coeficiente no es muy alto como para poder concluir con certeza que el aumento de los ciclones tropicales tiene una relación directa con los fenómenos del ENSO, es bastante significativo para el análisis. A pesar de que el signo del coeficiente de Covarianza es positivo, los estudios muestran una correlación negativa entre ambas variables en el caso de eventos ENSO, es decir que el aumento de el índice de oscilación del sur para el fenómeno del Niño genera una disminución en el número de ciclones del Océano Atlántico (ya que el fenómeno de El Niño está caracterizado con índices negativos). De la misma forma, para eventos No ENSO (La Niña), se encuentra un aumento en el número de ciclones relacionados con este fenómeno. Esto se puede apreciar claramente en la gráfica 30.

Gráfica 30. Relación del Índice de Oscilación del Sur con el número de ciclones tropicales en el Océano atlántico.



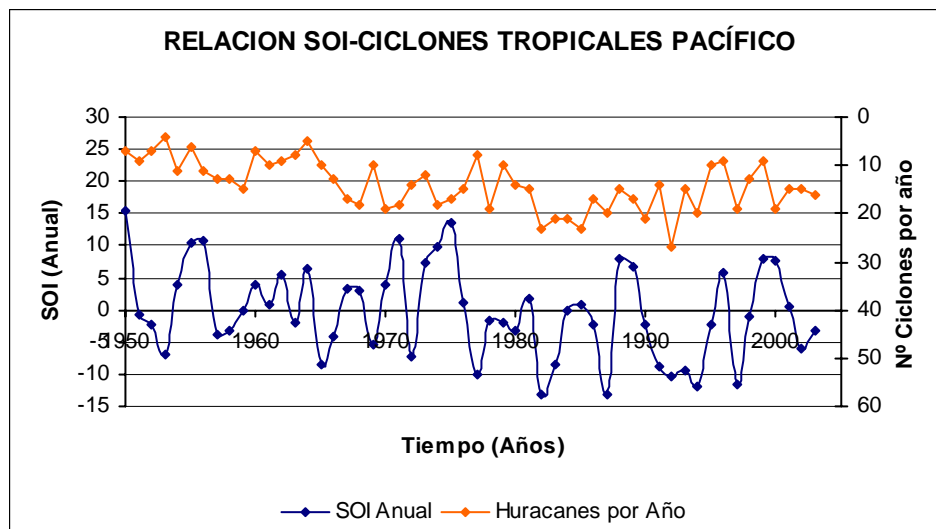
Fuente: Investigación de los autores.

También se pudo comprobar lo anteriormente dicho analizando los años con eventos representativos del ENSO y No ENSO. Para esto se tomó el número de ciclones formados en cada uno de estos años y se compararon con el promedio

de ciclones tropicales ocurridos en los 54 años en análisis (cuadros 5-a y 5-b). Se pudo observar que, en época de ENSO, el número de ciclones en promedio fue de 6.9 por año, bastante menor al promedio obtenido en los 54 años que fue de 10.3; por el contrario, en eventos No ENSO el número de ciclones por año fue de 11.4, algo mayor al promedio anual de 10.3.

Para el Pacífico el análisis fue similar, encontrando un coeficiente de Covarianza de -0.26 al lag cero; de igual forma, se observa que el número de ciclones en el Pacífico aumenta durante eventos de El Niño y disminuye para eventos La Niña (*gráfica 31*). En este estudio se encontró que el número promedio de ciclones durante eventos del ENSO fue de 17.2, mayor que el promedio de los 54 años que fue de 14.1 por año. Para eventos No ENSO, en promedio, los ciclones disminuyeron de 12.7 con respecto al promedio de 14.1 mencionado anteriormente.

*Gráfica 31. Relación del Índice de Oscilación del Sur con el número de ciclones tropicales en el Océano Pacífico.*



*Fuente: Investigación de los Autores.*

Cuadro 5-a. Número de Ciclones tropicales ocurridos durante eventos ENSO en el Atlántico y Pacífico.

AÑO	SOI (-) (ANUAL)	Nº DE CICLONES TROPICALES ATLÁNTICO	Nº DE CICLONES TROPICALES PACÍFICO
1965	-8.43	6	10
1972	-7.35	7	14
1977	-9.90	6	8
1982	-13.05	6	23
1987	-13.08	7	20
1991	-8.78	8	14
1992	-10.38	7	27
1994	-11.93	7	20
1997	-11.67	8	19
	<b>Promedio</b>	6.9	17.2

Fuente: Investigación de los Autores.

Cuadro 5-b. Número de Ciclones tropicales ocurridos durante eventos No ENSO en el Atlántico y Pacífico.

AÑO	SOI (+) (ANUAL)	Nº DE CICLONES TROPICALES ATLÁNTICO	Nº DE CICLONES TROPICALES PACÍFICO
1950	15.38	13	7
1955	10.58	13	6
1956	10.73	8	11
1971	10.95	13	18
1973	7.28	8	12
1975	13.60	9	17
1988	7.82	12	15
1999	7.85	12	9
2000	7.80	15	19
	<b>Promedio</b>	11.4	12.7

Fuente: Investigación de los Autores.

Hasta fines de la década de los años setenta se había observado que el evento ENSO ocurría con una frecuencia de 2 a 10 años y duración de un año (Rasmusson y Wallace, 1983); sin embargo, durante los últimos veinte años se ha observado que los eventos ENSO se han hecho más frecuentes, más intensos y de mayor duración, que se pueden extender hasta dos años, (Mc Phaden, 1993). Esta conclusión puede tener relación con el hecho de que también en los últimos años, el número de ciclones tropicales en los océanos Atlántico y Pacífico se hayan incrementado notoriamente, tal como se explicó en los capítulos 1 y 2.

## CONCLUSIONES

✦ Los ciclones tropicales formados en los Océanos Atlántico y Pacífico están directamente relacionados con muchos de los eventos de precipitación que se producen en el área metropolitana de Bucaramanga durante la misma época. El porcentaje de eventos de ciclones formados en el Atlántico y que al parecer influyen en dicha precipitación es del 53.6%, mientras el del Pacífico es del 78.3%; siendo las magnitudes de las precipitaciones generalmente inferiores a 30mm, a tal punto que para el Océano Pacífico únicamente el 4.6% de las precipitaciones diarias ocurridas durante la temporada de huracanes superan los 30mm. En el Océano Atlántico los resultados son un poco diferentes, pues algunos ciclones alcanzan distancias inferiores a los 1000 Km. entre éstos y la zona de estudio, por lo cual se pueden presentar valores de hasta 50mm en promedio en todas las estaciones, pero en éstos casos específicos; aunque teniendo en cuenta la totalidad de los ciclones analizados, el promedio de precipitación con valores entre 10mm y 30mm se mantiene. En éste océano el 11.4% de los eventos de precipitación superan los 30mm.

✦ Es claro que durante la temporada de huracanes hay una correlación negativa entre la distancia a la cual ocurren los ciclones en el Océano Pacífico y las magnitudes de registros de precipitación de la zona metropolitana de Bucaramanga. En éste océano, los ciclones se forman hacia el Este del mismo y avanzan en dirección Oeste, lo que significa que las menores distancias entre éstos y la zona de estudio se tendrán siempre cuando los ciclones se forman. Las precipitaciones mayores durante la ocurrencia de los ciclones parecen estar relacionadas con éstos primeros días en un desfase o salto temporal que se cree depende de la distancia a la zona de estudio y de la magnitud que el ciclón alcanzará (lo que se refleja en la velocidad tangencial de los vientos dentro del

ciclón y en su duración). Para el Océano Atlántico dicha relación entre distancia y precipitación es menos evidente debido a la inconstancia de las trayectorias de los ciclones, aunque se puede apreciar una tendencia clara en los valores de precipitación, dependiente también del inicio de los ciclones y de la cercanía que alcancen, lo que se evidencia en valores de precipitación relativamente elevados y registrados simultáneamente en todas las estaciones tras el inicio del ciclón, y en picos de precipitación en todas las estaciones, en el día 0, 1 o 2 después de que el ciclón se encontraba en el punto más cercano, en los pocos casos en que los ciclones se acercan considerablemente a la zona de estudio.

⊕ No fue posible detectar una relación clara entre la velocidad tangencial alcanzada por los ciclones tropicales y la precipitación generada en la zona de estudio, debido a al carácter estocástico de ambas series, diferente a lo que sucede con la relación entre distancia y precipitación, en donde a pesar de la variabilidad de los datos de ésta última, las series de distancia son más determinísticas y menos aleatorias.

⊕ En el Océano Atlántico la relación entre distancia y precipitación parece estar un poco más asociada a la variación espacial de los ciclones tropicales en el sentido Este-Oeste que en el sentido Norte-Sur, mientras que en el Océano Pacífico se encontró una correlación inversa considerable (teniendo en cuenta las limitantes estadísticas mencionadas) entre cada una de las dos proyecciones con la precipitación, y similar a la hallada entre distancia y precipitación.

⊕ Los ciclones del Pacífico parecen estar ligeramente relacionados con el número de manchas solares y con sus ciclos de oscilación de 11 años, mientras los del Atlántico parecen estar más ligados al Fenómeno del Niño o ENSO. En el caso de las temporadas con eventos de El Niño, en el Pacífico se aprecia un ligero incremento del número de ciclones tropicales con respecto al promedio anual (de 14.1 a 17.2 por año) mientras que en el Atlántico el número decrece

significativamente (de 10.3 a 6.9), con resultados inversos durante La Niña, pero en menor proporción.

## RECOMENDACIONES

✦ El método estadístico empleado para evaluar la influencia de los ciclones tropicales en los eventos de precipitación de la zona metropolitana de Bucaramanga no fue suficiente para lograr un estimativo confiable de dicha influencia debido al reducido tamaño de las series empleadas (pues éstas dependen de la duración de los ciclones), a la variabilidad en la duración entre eventos y a la limitante que se genera al no tener el cuenta los datos de precipitación registrados con posterioridad a la finalización de cada ciclón, por lo que se recomienda el complemento del presente estudio o su continuación, usando registros pluviográficos con mediciones a escalas de tiempo menores de un día, con el fin de obtener series con un mayor número de datos. También se sugiere la exploración de otros métodos estadísticos.

✦ Se recomienda realizar un estudio similar a la presente investigación, pero analizando los datos de precipitación en las zonas costeras, para llegar así a conocer la distribución de las lluvias a medida que la zona de estudio se aleja del punto de ocurrencia de los ciclones tropicales.

## BIBLIOGRAFÍA

BARRERA RODRÍGUEZ, José Ricardo; GÉLVEZ GÉLVEZ, Giovanni; MANTILLA FLÓREZ, Silvia Margarita; VILLARREAL SOLANO, German Alirio. Estudio de la precipitación para el departamento de Santander. Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Civil, UIS. Bucaramanga, 1998.

DUARTE REYES, Daniel Ricardo. Estudio de valores extremos de precipitación en la cuenca del Río de Oro. Tesis de grado para optar el título de Ingeniero Civil, UIS. Bucaramanga, 2002.

El Medio Ambiente en Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), pág. 97-110.

FRANCOIS Atilio. Ciclo de formación sobre geodesia, referencial geográfico y proyecciones para los sistemas de información geográficos. Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. Montevideo, 2000.

HAIR, Joseph F. Jr; ANDERSON, Rolph E.; TATHAM, Ronald L.; BLACK William C. Multivariate data analysis. Editorial Prentice Hall, 5 Edición, 1998. Informe final de la vigésima sexta reunión. Organización Meteorológica Mundial, comité de huracanes de la ar iv. Miami, 2004.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Normas Colombianas para la presentación de trabajos de investigación. Quinta actualización. Santa fe de Bogota DC. INCONTEC, 2002.NTC 1486.

INZUNZA, Juan. Meteorología Descriptiva. Cáp. 6,7, Chile, 2003.

MAGAÑA R, Víctor O; PÉREZ, José Luís; CONDE, Cecilia; GAY Carlos y MEDINA Socorro. El fenómeno de El Niño y la Oscilación del Sur (ENOS) y sus impactos en México. Departamento de Meteorología General Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México. México, 2004.

PAVÍA, Edgar G. La influencia de los ciclones tropicales en la lluvia del noroeste de baja California y suroeste de California. Departamento de Oceanografía Física, CICESE. México, 2004.

PLA Laura E. Análisis multivariado: método de componentes principales”. Organización de Estados Americanos, 1996.

POVEDA, Germán. La Hidroclimatología: una síntesis desde la escala Inter-decadal hasta la escala diurna. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2004.

POVEDA, Germán; GIL, Marta Maria y QUICENO Natalia. El ciclo anual de la hidrología de Colombia en relación con el ENSO y la NAO. Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2000.

REYES COCA, Sergio y TRONCOSO GAYTÁN, Ricardo. El impacto del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur en la generación de ciclones tropicales alrededor de México. Laboratorio de Climatología, Instituto Nacional de la Pesca. SEMARNAP. Ensenada, B.C. México, 2000.

REYES COCA, Sergio y TRONCOSO GAYTÁN, Ricardo. El Niño Oscilación del Sur y los fenómenos hidrometeorológicos en Baja California: el evento de 1997/98.

Laboratorio de Climatología, Instituto Nacional de la Pesca. SEMARNAP. Ensenada, B.C. México, 2000.

SALAS, J.D; DELLEUR, J.W; YEVJEVICH, V.V; LANE W.L. Applied modeling of hydrologic time series. Resources publications. Littleton Colorado, Cáp. 2, USA, 1980.

SOLEY, Francisco Javier y ALFARO, Eric J. Aplicación de análisis multivariado al campo de anomalías de precipitación en Centroamérica. Centro de Investigaciones Geofísicas y DFAOP-Escuela de Física, Universidad de Costa Rica, San José, 1999.

WALPOLE; MYERS; MYERS. Probabilidad y estadística para ingenieros, sexta edición. Editorial Prentice Hall, 1998.

ZHOU Y. Hydrogeostatistics. International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering (IHE). Editorial DELFT, 2 edición, pág.69-91, 2000.