

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE CIENCIAS**

### **CONSTRUCCIÓN DE LA CLIMATOLOGÍA EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO PARA EVENTOS METEOROLÓGICOS EXTREMOS CON TÉCNICAS MATEMÁTICAS Y SU CONTRASTE CON EL MODELO WRF**

#### **PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MATEMÁTICO**

**MIGUEL ANDRÉS ZAMBRANO GARCÉS**

miguel.zambrano.garces@gmail.com

**DIEGO POLIVIO ESCOBAR GONZÁLEZ**

diego.p.escobar.g@gmail.com

**DIRECTOR: DR. JULIO MEDINA**

julio.medina@epn.edu.ec

**QUITO, ABRIL 2013**



## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

### FACULTAD DE CIENCIAS

#### ORDEN DE ENCUADERNACIÓN

De acuerdo con lo estipulado en el Art. 17 del instructivo para la Aplicación del Reglamento del Sistema de Estudios, dictado por la Comisión de Docencia y Bienestar Estudiantil el 9 de agosto del 2000, y una vez comprobado que se han realizado las correcciones, modificaciones y más sugerencias realizadas por los miembros del Tribunal Examinador al informe del proyecto de titulación presentado por MIGUEL ANDRÉS ZAMBRANO GARCÉS y DIEGO POLIVIO ESCOBAR GONZÁLEZ. Se emite la presente orden de empastado, con fecha XX de XXXXXX de 2013. Para constancia firman los miembros del Tribunal Examinador:

<b>NOMBRE</b>	<b>FUNCIÓN</b>	<b>FIRMA</b>
Dr. Julio Medina	Director	
Dr. Polo Vaca	Examinador	
Dr. Luis Horna	Examinador	

---

Dr. Eduardo Ávalos  
DECANO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS

## DECLARACIÓN

Nosotros, MIGUEL ANDRÉS ZAMBRANO GARCÉS y DIEGO POLIVIO ESCOBAR GONZÁLEZ, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Miguel Andrés Zambrano Garcés

---

Diego Polivio Escobar González

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por MIGUEL ANDRÉS ZAMBRANO GARCÉS y, DIEGO POLIVIO ESCOBAR GONZÁLEZ bajo mi supervisión.

---

Dr. Julio Medina  
DIRECTOR DE PROYECTO



## **AGRADECIMIENTOS**

Nuestros sinceros agradecimientos a la EPMAPS,  
a la Escuela Politécnica Nacional,  
a Enrique Palacios por su valiosa colaboración en este trabajo,  
al doctor Julio Medina por su continuo apoyo.

## **DEDICATORIA**

*A mi mamá  
A mi papá  
y a Wellapon*

***Migue :)***

*A mis padres*

***Diego***

# TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	<b>xiii</b>
ABSTRACT	<b>xiv</b>
1 INTRODUCCIÓN	<b>1</b>
2 IDENTIFICACIÓN DE EVENTOS EXTREMOS EN EL DMQ	<b>5</b>
2.1 Diagnóstico del estado actual en la creación de climatologías de eventos extremos en el Distrito Metropolitano de Quito . . . . .	5
2.2 Estudio de la relación Intensidad-Duración-Frecuencia para lluvias extremas en el Distrito Metropolitano de Quito . . . . .	8
2.3 Análisis de la intensidad de lluvias . . . . .	14
2.4 Análisis de las series de precipitación máxima, ajuste mediante la función de distribución Gamma . . . . .	15
2.5 Aproximación de las IDF mediante la curva de Talbot . . . . .	21
2.6 Aproximación de las IDF mediante la curva de Sherman . . . . .	23
3 CLASIFICACIÓN DEL DMQ POR ZONAS ATMOSFÉRICAS HOMOGÉNEAS	<b>27</b>
3.1 Clasificación objetiva de eventos por estación . . . . .	27
3.2 Clasificación objetiva de las estaciones seleccionadas . . . . .	33
4 INTERPOLACIÓN ESPACIAL DE SERIES CLIMATOLÓGICAS EN EL DMQ	<b>39</b>
4.1 Interpolación espacial - Análisis objetivo . . . . .	40
4.2 Método de Cressman . . . . .	40
5 SIMULACIÓN NUMÉRICA DE EVENTOS EXTREMOS MEDIANTE EL MODELO DE MESOESCALA WRF	<b>44</b>
5.1 Modelos numéricos de simulación atmosférica . . . . .	44
5.2 Modelo de simulación atmosférica WRF . . . . .	46
5.3 Datos para el Reanálisis Atmosférico . . . . .	49

6	RESULTADOS	<b>51</b>
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	<b>74</b>
7.1	Conclusiones . . . . .	74
7.2	Recomendaciones . . . . .	75
	REFERENCIAS	<b>76</b>
A	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO WRF	<b>78</b>
A.1	Instalación . . . . .	78
A.2	Uso del modelo WRF . . . . .	79
B	LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN Y ALGORITMOS	<b>82</b>
B.1	GrADS (Grid Analysis and Display System) . . . . .	82
B.2	R . . . . .	83
B.3	Bash . . . . .	85
B.4	Lista de códigos . . . . .	85
C	CURVAS IDF	<b>87</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Inundación en el sector de “la Y” en el centro norte de la ciudad de Quito . . . . .	2
1.2	Incendio en el sector de Lumbisí al nororiente de la ciudad de Quito . . . . .	3
2.1	Ubicación de las estaciones pluviométricas . . . . .	10
2.2	Información pluviométrica cada 5 min sin depurar de la Estación Toctiuco P12 . . .	11
2.3	Información pluviométrica cada 5 min depurada de la Estación Toctiuco P12 . . . .	12
2.4	Separación entre eventos . . . . .	13
2.5	Precipitación acumulada máxima por evento . . . . .	13
2.6	Funciones de densidad desnormalizadas de la Distribución Gamma, estación Toc- tiuco P12 . . . . .	18
2.7	Intensidad de lluvia máxima, estación Toctiuco P12 . . . . .	21
2.8	Relación lineal entre el inverso de la Intensidad y la duración, estación Toctiuco P12	24
2.9	Relación lineal entre $(a, \log T)$ , estación Toctiuco P12 . . . . .	25
3.1	Matriz de correlación para la estación P12 . . . . .	28
3.2	Matriz de correlación para la estación P15 . . . . .	28
3.3	Dendograma de la estación P12 utilizando el método UPGMA . . . . .	31
3.4	Dendograma de la estación P12 utilizando el método de Ward . . . . .	32
3.5	Eventos extremos en la estación P12 utilizando el método de Ward . . . . .	32
3.6	Eventos extremos en la estación P12 utilizando el método UPGMA . . . . .	32
3.7	HCPC para todos los eventos extremos . . . . .	34
3.8	Clasificación objetiva de todos los eventos extremos estudiados . . . . .	35
3.9	Dendograma utilizando HCPC para las estaciones seleccionadas . . . . .	37
3.10	Ubicación espacial de los clusters . . . . .	38
4.1	Análisis de Cressman - Radio de acción . . . . .	41
4.2	Cobertura máxima para el relleno mediante Cressman . . . . .	42
4.3	Relleno mediante Cressman . . . . .	43
5.1	Incorporación de variables . . . . .	45

5.2	Evolución en el mallado en modelos atmosféricos . . . . .	46
5.3	Resolución vertical y horizontal de un modelo atmosférico . . . . .	47
5.4	Parametrizaciones físicas en un modelo de simulación atmosférica . . . . .	48
5.5	Resolución espacial de la climatología . . . . .	49
6.1	Hietograma del evento del 15/03/2001 . . . . .	53
6.2	Modelo WRF-FNL 19:00-22:00 15/03/2001 . . . . .	54
6.3	Relleno WRF-FNL 19:00-22:00 15/03/2001 . . . . .	54
6.4	Diferencia WRF-FNL 19:00-22:00 15/03/2001 . . . . .	54
6.5	Cantidad WRF-FNL 19:00-22:00 15/03/2001 . . . . .	54
6.6	Modelo WRF-ERA 19:00-22:00 15/03/2001 . . . . .	55
6.7	Relleno WRF-ERA 19:00-22:00 15/03/2001 . . . . .	55
6.8	Diferencia WRF-ERA 19:00-22:00 15/03/2001 . . . . .	55
6.9	Cantidad WRF-ERA 19:00-22:00 15/03/2001 . . . . .	55
6.10	Hietograma del evento del 12/02/2005 . . . . .	57
6.11	Modelo WRF-FNL 13:00-16:00 12/02/2005 . . . . .	58
6.12	Relleno WRF-FNL 13:00-16:00 12/02/2005 . . . . .	58
6.13	Diferencia WRF-FNL 13:00-16:00 12/02/2005 . . . . .	58
6.14	Cantidad WRF-FNL 13:00-16:00 12/02/2005 . . . . .	58
6.15	Modelo WRF-ERA 13:00-16:00 12/02/2005 . . . . .	59
6.16	Relleno WRF-ERA 13:00-16:00 12/02/2005 . . . . .	59
6.17	Diferencia WRF-ERA 13:00-16:00 12/02/2005 . . . . .	59
6.18	Cantidad WRF-ERA 13:00-16:00 12/02/2005 . . . . .	59
6.19	Hietograma del evento del 21/02/2006 . . . . .	61
6.20	Modelo WRF-FNL 16:00-19:00 21/02/2006 . . . . .	62
6.21	Relleno WRF-FNL 16:00-19:00 21/02/2006 . . . . .	62
6.22	Diferencia WRF-FNL 16:00-19:00 21/02/2006 . . . . .	62
6.23	Cantidad WRF-FNL 16:00-19:00 21/02/2006 . . . . .	62
6.24	Modelo WRF-ERA 16:00-19:00 21/02/2006 . . . . .	63
6.25	Relleno WRF-ERA 16:00-19:00 21/02/2006 . . . . .	63
6.26	Diferencia WRF-ERA 16:00-19:00 21/02/2006 . . . . .	63
6.27	Cantidad WRF-ERA 16:00-19:00 21/02/2006 . . . . .	63
6.28	Hietograma del evento del 21/05/2002 . . . . .	65
6.29	Modelo WRF-FNL 13:00-16:00 21/05/2002 . . . . .	66
6.30	Relleno WRF-FNL 13:00-16:00 21/05/2002 . . . . .	66
6.31	Diferencia WRF-FNL 13:00-16:00 21/05/2002 . . . . .	66
6.32	Cantidad WRF-FNL 13:00-16:00 21/05/2002 . . . . .	66
6.33	Modelo WRF-ERA 13:00-16:00 21/05/2002 . . . . .	67
6.34	Relleno WRF-ERA 13:00-16:00 21/05/2002 . . . . .	67

6.35	Diferencia WRF-ERA 13:00-16:00 21/05/2002 . . . . .	67
6.36	Cantidad WRF-ERA 13:00-16:00 21/05/2002 . . . . .	67
6.37	Noticia del evento del 21/05/2002 . . . . .	68
6.38	Hietograma del evento del 03/10/2005 . . . . .	69
6.39	Modelo WRF-FNL 13:00-16:00 03/10/2005 . . . . .	70
6.40	Relleno WRF-FNL 13:00-16:00 03/10/2005 . . . . .	70
6.41	Diferencia WRF-FNL 13:00-16:00 03/10/2005 . . . . .	70
6.42	Cantidad WRF-FNL 13:00-16:00 03/10/2005 . . . . .	70
6.43	Modelo WRF-ERA 13:00-16:00 03/10/2005 . . . . .	71
6.44	Relleno WRF-ERA 13:00-16:00 03/10/2005 . . . . .	71
6.45	Diferencia WRF-ERA 13:00-16:00 03/10/2005 . . . . .	71
6.46	Cantidad WRF-ERA 13:00-16:00 03/10/2005 . . . . .	71
6.47	Noticia del evento del 03/10/2005 . . . . .	72
6.48	RMSE del total de eventos simulados . . . . .	73
C.1	Ecuación IDF, escala logarítmica, estación Rumihurco-Machangara P03 . . . . .	88
C.2	Ecuación IDF, escala logarítmica, estación Rumipamba-Bodegas P08 . . . . .	89
C.3	Ecuación IDF, escala logarítmica, estación Iñaquito-INAMHI P09 . . . . .	90
C.4	Ecuación IDF, escala logarítmica, estación DAC-Aeropuerto P10 . . . . .	91
C.5	Ecuación IDF, escala logarítmica, estación Antenas P11 . . . . .	92
C.6	Ecuación IDF, escala logarítmica, estación Toctiuco P12 . . . . .	93
C.7	Ecuación IDF, escala logarítmica, estación Cumbayá P13 . . . . .	94
C.8	Ecuación IDF, escala logarítmica, estación El Cinto P15 . . . . .	95
C.9	Ecuación IDF, escala logarítmica, estación Izobamba P16 . . . . .	96
C.10	Ecuación IDF, escala logarítmica, estación El Tingo P17 . . . . .	97
C.11	Ecuación IDF, escala logarítmica, estación La Tola P19 . . . . .	98
C.12	Ecuación IDF, escala logarítmica, estación Calderón P20 . . . . .	99
C.13	Ecuación IDF, escala logarítmica, estación Chillogallo P21 . . . . .	100
C.14	Ecuación IDF, escala logarítmica, estación Atacazo P23 . . . . .	101
C.15	Ecuación IDF, escala logarítmica, estación El Troje P25 . . . . .	102

## ÍNDICE DE CUADROS

2.1 Estaciones seleccionadas . . . . .	9
2.2 Media, varianza, valor máximo $P_{max}(mm)$ y parámetros $\lambda$ y $k$ de la función de distribución Gamma, estación Toctiuco P12 . . . . .	16
2.3 Número de eventos de precipitación máxima $D$ , estación Toctiuco P12 . . . . .	17
2.4 Frecuencias acumuladas. estación Toctiuco P12 . . . . .	20
2.5 Intensidades máximas de precipitación, estación Toctiuco P12 . . . . .	22
2.6 Parámetros $a, b$ de ajuste e las curvas IDF para la función de Talbot y coeficiente de correlación lineal $r$ , estación Toctiuco P12 . . . . .	23
2.7 Parámetros $a, b, c$ de ajuste e las curvas IDF para la función de Sherman y coeficiente de correlación $r$ , estación Toctiuco P12 . . . . .	24
2.8 Ajuste del parámetro $a$ de la función de Sherman, estación Toctiuco P12 . . . . .	25
2.9 Ecuaciones IDF, para las 15 estaciones analizadas . . . . .	26
3.1 Episodios lluviosos que superan o igualan el período de retorno para 5 años en la estación P12 . . . . .	29
3.2 Clasificación de las estaciones . . . . .	36
C.1 Cantidad de precipitación máxima (mm), Rumihurco-Machangara P03 . . . . .	88
C.2 Cantidad de precipitación máxima (mm), Rumipamba-Bodegas P08 . . . . .	89
C.3 Cantidad de precipitación máxima (mm), Ñaquito-INAMHI . . . . .	90
C.4 Cantidad de precipitación máxima (mm), DAC-Aeropuerto P10 . . . . .	91
C.5 Cantidad de precipitación máxima (mm), Antenas P11 . . . . .	92
C.6 Cantidad de precipitación máxima (mm), Toctiuco P12 . . . . .	93
C.7 Cantidad de precipitación máxima (mm), Cumbayá P13 . . . . .	94
C.8 Cantidad de precipitación máxima (mm), El Cinto P15 . . . . .	95
C.9 Cantidad de precipitación máxima (mm), Izobamba P16 . . . . .	96
C.10 Cantidad de precipitación máxima (mm), El Tingo P17 . . . . .	97
C.11 Cantidad de precipitación máxima (mm), La Tola P19 . . . . .	98
C.12 Cantidad de precipitación máxima (mm), Calderón P20 . . . . .	99
C.13 Cantidad de precipitación máxima (mm), Chillogallo P21 . . . . .	100



C.14 Cantidad de precipitación máxima (mm), Atacazo P23 . . . . .	101
C.15 Cantidad de precipitación máxima (mm), El Troje P25 . . . . .	102

## RESUMEN

En el presente trabajo se construye una climatología para eventos meteorológicos extremos con la variable precipitación, para lo que se utiliza la red de pluviómetros de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS). Se depuran las series y se encuentran las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF). Se clasifican los eventos encontrados por estación, así como el conjunto de estaciones, usando análisis de clusters. Se realiza una interpolación espacial de los datos utilizando el esquema de Cressman. Se simulan los eventos extremos mediante el modelo WRF y los conjuntos de datos FNL y ERA-Interim; se los compara con la interpolación espacial para obtener su grado de acierto.

**Palabras claves:** Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, clasificación jerárquica, climatología de eventos extremos, simulación del clima, modelo WRF, método de Cressman, reanálisis climatológico.

## ABSTRACT

In this work we build an extreme weather climatology with the precipitation variable, for which the gauges network of the Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS) is used. We deplete the series and found the Intensity-Duration-Frequency curves (IDF). We classify the events found per station, and the set of stations using cluster analysis. Also, we perform a spatial interpolation of the data using the Cressman scheme. Extreme events are simulated using the WRF model with FNL and ERA-Interim datasets, those are compared with the spatial interpolation to get their degree of success.

**Keywords:** Intensity-Duration-Frequency curves, hierarchical classification, climatology of extreme events, climate simulation, WRF, Cressman method, reanalysis climatology.

*“Il est impossible que l'improbable n'arrive jamais.”*

**Emil Gumbel**

*All in hot and copper sky,  
The bloody Sun, at noon,  
'Right up above the mast did stand,  
No bigger than the Moon.*

*Day after day, day after day,  
We stuck, nor breath nor motion;  
As idle as a painted ship  
Upon a painted ocean.*

Samuel Taylor Coleridge

# 1

## INTRODUCCIÓN

Al modelar fenómenos ambientales extremos se desea entender frecuentemente su comportamiento sobre una región, en particular la dependencia entre eventos extremos en diferentes locaciones. Esta modelización es normalmente complicada, puesto que los eventos extremos son escasos y hay pocos lugares en los que se recolecta información acerca de ellos. Existen muchas situaciones en que la comprensión de la dependencia entre los eventos extremos es importante, en especial para los fenómenos ambientales. Por ejemplo, para la industria de los seguros es vital saber la susceptibilidad de un lugar a las inundaciones, si se tienen estimaciones zonales de cantidad de precipitación acumulada a lo largo de la captación de un río se puede entender y estimar su susceptibilidad ante una inundación. La construcción naval es otro ámbito en el que la comprensión de la dependencia entre los extremos es importante porque el nivel de castigo experimentado por un buque en un determinado viaje se verá afectado por el nivel de dependencia entre las olas del mar en diferentes lugares [Youngman, 2012].

La precipitación es una de las variables atmosféricas más relevantes para el ser humano en cuestiones que van desde la generación de energía eléctrica, gestión de riesgos, agricultura, planificación de eventos al aire libre hasta los asuntos más cotidianos como la vestimenta o el medio de transporte a elegir.



**Figura 1.1:** Inundación en el sector de “la Y” en el centro norte de la ciudad de Quito. Evento sucedido el 16 de abril de 2011.

Fuente: [www.elcomercio.com](http://www.elcomercio.com)

La salud humana se ve profundamente afectada por el tiempo atmosférico y el clima. Los fenómenos meteorológicos extremos matan a decenas de miles de personas cada año y ponen en riesgo la integridad física y la salud psicológica de millones de personas. Las sequías afectan directamente la nutrición y la incidencia de enfermedades asociadas con la malnutrición. Las inundaciones y los ciclones pueden desencadenar brotes de enfermedades infecciosas y dañar hospitales y más infraestructura de salud, sobrecargando los servicios de salud justamente cuando más se necesitan [World Health Organization and World Meteorological Organization, 2012].

El Ecuador debido a su posición geográfica y otros factores posee un clima muy particular. La influencia de la zona de convergencia intertropical en el comportamiento del tiempo atmosférico en el país complica la predicción del tiempo atmosférico para los modelos numéricos en la zona ecuatorial. La cordillera de los Andes que se extiende a lo largo de toda Sudamérica es una formación montañosa “estrecha” principalmente en la parte norte del continente; esta provoca una interrupción en la circulación atmosférica lo cual ocasiona una variedad de fenómenos de mesoescala así como condiciones climáticas muy marcadas en distancias cortas [Garreaud, 2009].

Por ejemplo, a finales del año 2012 se pudo evidenciar como la disminución en las precipitaciones y el aumento de la temperatura junto con actitudes inescrupulosas llevaron a la declaración de alertas por la presencia de incendios forestales que afectaron tanto a la población humana como a la biodiversidad de varios sectores del país.



**Figura 1.2:** Incendio en el sector de Lumbisí al nororiente de la ciudad de Quito, septiembre de 2012.

Fuente: [www.elcomercio.com](http://www.elcomercio.com)

En este trabajo se analiza la precipitación en el Distrito Metropolitano de Quito gracias a la red de pluviómetros de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS) que dispone de datos con una buena cobertura tanto espacial como temporal de la ciudad de Quito. En el capítulo 2 se identifican los eventos extremos de la precipitación en el Distrito Metropolitano de Quito, utilizando las series temporales de 15 estaciones pluviométricas pertenecientes a la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento entre los años 2000 y 2012, con una recurrencia de 5 minutos. Se estudian los eventos extremos de precipitación, utilizando la función de distribución Gamma, para luego obtener las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), siendo considerados extremos aquellos eventos que tengan un período de retorno mayor o igual a 5 años.

En el capítulo 3 se realiza una clasificación de las estaciones pluviométricas analizadas en el capítulo 2 (siguiendo como esquema el trabajo realizado en [Casas Castillo, 2005]), se clasifica también los eventos extremos determinados para cada estación así como también al conjunto general de los eventos extremos encontrados en el presente estudio. Este análisis se realiza para el total de estaciones; se toma la estación Toctiuco P12 como *estación modelo* para la clasificación objetiva de eventos extremos así como para la posterior reconstrucción de los eventos con el modelo numérico WRF. El estudio en este capítulo se centra en *zonas pluviométricas homogéneas*, esto debido a que los datos necesarios para realizar un estudio más completo, para crear *zonas atmosféricas homogéneas*, no fue posible debido a la falta de información requerida en intervalos de cinco minutos en los sitios estudiados.

En el capítulo 4 se describe el método de interpolación espacial de Cressman, se detallan tanto

los problemas que presenta como las ventajas de su uso. Dentro del capítulo 5 se detalla el uso del modelo numérico de mesoescala WRF (Weather Research and Forecasting Model) para realizar simulaciones de los eventos extremos encontrados en este trabajo. Los resultados de las simulaciones se muestran en el capítulo ??, en el cual se analiza tres eventos extremos que por sus características representan los tres tipos de precipitación presentadas en este estudio, como son: sistemas convectivos, sistemas nubosos de escala sinóptica y una combinación de sistemas convectivos y sinópticos. También se analizan dos eventos extremos que superaron ampliamente el comportamiento de todo el conjunto de eventos. Los tres primeros eventos pertenecen a la estación modelo Toctiuco P12 y los dos restantes a la estación DAC-Aeropuerto P10.



*“Some mathematician has said pleasure lies not in discovering truth, but in seeking it.”*

Lev Nikolayevich Tolstoy

# 2

## IDENTIFICACIÓN DE EVENTOS EXTREMOS EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

En el presente capítulo se identifican los eventos extremos de la precipitación en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), utilizando las series temporales de 15 estaciones pluviométricas pertenecientes a la Empresa Publica Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS) entre los años 2000 y 2012, con una recurrencia de 5 minutos. Se estudian los eventos extremos de precipitación, utilizando la función de distribución Gamma, pues se limita a valores positivos y con asimetría a la derecha en las series de precipitación máxima, para luego obtener las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), siendo considerados extremos aquellos eventos que tengan un período de retorno mayor o igual a 5 años.

### 2.1 DIAGNÓSTICO DEL ESTADO ACTUAL EN LA CREACIÓN DE CLIMATOLOGÍAS DE EVENTOS EXTREMOS EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

Los estudios en meteorología y climatología se han enfocado en los pronósticos a largo y mediano plazos más no en la construcción de climatologías específicas para el DMQ, menos aún en la construcción de una climatología específica para eventos extremos. Es de suma importancia crear una climatología consistente y verificada, esto permite conocer de una mejor manera el desarrollo de los

procesos atmosféricos dentro del DMQ.

Cabe señalar que los estudios anteriores sobre intensidades de lluvias, se han realizado principalmente a nivel nacional, entre algunos se puede señalar los siguientes: En el año de 1980 el INAMHI, publicó “Estudio de Intensidades” [Rodríguez L., 1980], en el mismo se utilizó la distribución de Gumbel en 24 estaciones del Ecuador y se obtuvieron ecuaciones del tipo potencial:

$$I = \frac{KT^m}{t^n},$$

donde:

$I$ : intensidad (mm/h),

$T$ : período de retorno (año),

$t$ : tiempo de duración (min),

$K, m$  y  $n$ : constantes de ajuste propias de cada estación.

En este mismo estudio también se incorpora luego un parámetro adicional, como es la precipitación máxima  $P_{max}$ . En este trabajo además se presenta una división del territorio ecuatoriano, para las cuales se proponen ecuaciones de intensidad del tipo:

$$I = \frac{KT^m}{t^n} P_{max},$$

una característica de este tipo de curvas IDF, es que se necesitan por lo menos dos ecuaciones de ese tipo para poder describir de manera adecuada la intensidad.

Otro trabajo interesante es “Normas Pluviométricas Propuestas para Ecuador” [Nouvelot J.F, 1982], en éste se presentan ecuaciones IDF de 24 estaciones representativas de algunas zonas homogéneas definidas por los autores. Estas curvas han sido determinadas para duraciones entre 5 y 1440 minutos utilizando la distribución de Pearson III. En el caso de la estación Quito-Observatorio, sus intensidades están definidas por tres ecuaciones del tipo:

$$I = I_0 t^a T^{b+c \log t},$$

donde:

$I_0$ : intensidad correspondiente a  $t = 1$  hora y  $T = 1$  año,

$a, b$  y  $c$ : constantes propias de cada estación.

Los estudios a nivel local se inician con la consultora Cam Dresser and McKee en 1977 [Camp Dresser and McKee, 1977], para el Plan Maestro de Agua Potable y Alcantarillado de Quito. Para este estudio se basan en los registros de la estación Quito-Observatorio y proponen ocho ecuaciones, para

los períodos de retorno de 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20 y 50 años del tipo:

$$I = \frac{m}{t + b},$$

donde:

$I$ : intensidad,

$t$ : tiempo de concentración o duración de la lluvia,

$m$  y  $b$ : constantes de calibración propias de cada período de retorno.

Otro trabajo de interés es el desarrollado en [GZT, 1991], en el mismo se desarrollan ecuaciones IDF para las estaciones de Izobamba, Quito-Observatorio e Ñaquito-INAMHI, para períodos de retorno entre 2 y 100 años, usando ecuaciones de tipo potencial:

$$I = \frac{KT^m}{t^n},$$

donde:

$I$ : intensidad (mm/h),

$T$ : período de retorno (año),

$t$ : tiempo de duración (min),

$K, m$  y  $n$ : constantes de ajuste propias de cada estación.

Los trabajos indicados atrás no son convenientes para los intereses del presente proyecto, pues requieren de varias ecuaciones para un mismo período de retorno y por tanto un mayor número de coeficientes a determinar.

El trabajo realizado para el Proyecto Sistema de Pronóstico Hidrológico de las Laderas del Pichincha y Área Metropolitana de Quito [Ayabaca E., 1996], para el cálculo de ecuaciones IDF y de Coeficientes de Escorrentía, donde se utiliza la ley de Gumbel y la fórmula de Weibull:

$$I = \frac{aT^b}{t^c} (\ln(t + 3))^m (\ln T)^n,$$

donde:

$I$ : intensidad (mm/h),

$T$ : período de retorno (años),

$t$ : duración de la lluvia (min),

$a, b, c, m$  y  $n$ : constantes de ajuste propias de cada estación.

Los resultados son muy satisfactorios, pero se tienen varios inconvenientes, como es el de su relativa complejidad que puede inducir a errores en su utilización práctica y solamente puede ser útil

para duraciones inferiores a 360 minutos, pues luego se tienen errores como el decrecimiento de la curva.

## 2.2 ESTUDIO DE LA RELACIÓN INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA PARA LLUVIAS EXTREMAS EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

El Distrito Metropolitano de Quito se ubica en la cordillera de los Andes entre 2400 a 4700 m.s.n.m de altitud aproximadamente, atravesado por la línea ecuatorial, donde la lluvia se produce principalmente por acción de:

- *Sistemas convectivos*, donde se involucran grandes cantidades de calor absorbido por el agua, produciendo nubes que generalmente tienen un gran desarrollo vertical que pueden generar lluvias de fuerte intensidad en ocasiones con tormentas eléctricas, incluso alcanzar una altura de 12 a 14 km y al enfriarse violentamente pueden generar granizo, ya que las gotas de lluvia se van congelando al ascender violentamente y luego se precipitan al suelo ya en estado sólido.
- *Sistemas nubosos de escala sinóptica*, también conocida como escala grande o escala ciclónica que corresponde a una escala de longitud horizontal del orden de los 1000 km o más. Esto corresponde a una escala horizontal típica de depresiones de latitudes medias.
- *Una combinación entre los sistemas convectivos y sinópticos.*

Usualmente, la falta de homogeneidad de los instrumentos de medida de la intensidad de precipitación, hacen que en muchas ocasiones sea difícil disponer de datos adecuados, que permitan comparar los rasgos climatológicos más significativos de la intensidad en diferentes lugares o clasificar de forma lo más objetiva posible, las lluvias registradas en un mismo lugar.

El comportamiento de la intensidad de lluvia promediada en intervalos de tiempo de 24 horas o superiores, normalmente se estudia a partir de los datos proporcionados por pluviómetros totalizadores, en nuestra región por ejemplo se han realizado estudios como [Rodríguez L., 1980]. Por otro lado, cuando se requiere un conocimiento más fino de la intensidad se deben utilizar los registros obtenidos por pluviómetros que permitan elegir la duración del intervalo en el que se desea promediar la intensidad de la lluvia, como lo sugiere [Casas Castillo, 2005]. La EPMAAPS dispone de una red de estaciones pluviométricas que posee dichas características, el Cuadro 2.1 muestra el nombre de las estaciones seleccionadas su código según la EPMAAPS, ubicación este<sup>1</sup>, norte<sup>1</sup> y elevación en metros. Las estaciones fueron consideradas siempre y cuando se tenía información de por lo menos 10 años.

---

<sup>1</sup>WGS84, Zona 17 Sur.

Nombre de estación	Código EPMAPS	Este	Norte	Altura (msnm)
Rumihurco	P03	774550	9985125	3575
Rumipamba	P08	776350	9980525	3200
Iñaquito	P09	779850	9980750	2789
DAC Aeropuerto	P10	779725	9983925	2794
Antenas	P11	775860	9982013	3760
Toctiuco	P12	775485	9977570	3225
Cumbayá	P13	786325	9976750	2360
El Cinto	P15	770750	9972900	3200
Izobamba	P16	772390	9959890	3060
El Tingo	P17	785000	9968000	2440
La Tola	P19	792960	9974720	2500
Calderón	P20	785900	9991825	2765
Chillogallo	P21	768981	9969599	3203
Atacazo	P23	767195	9965170	3865
El Troje	P25	775910	9963490	3145

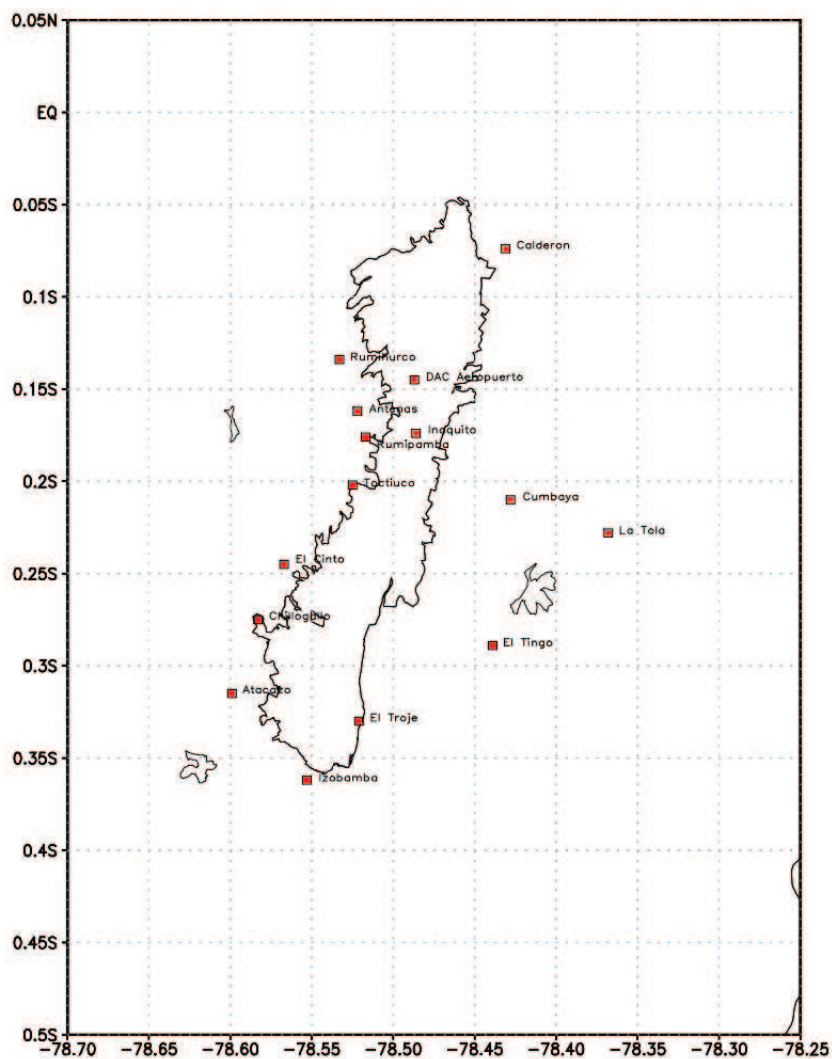
**Cuadro 2.1:** Estaciones seleccionadas.

Elaboración: Los autores.

Toda la información obtenida de las estaciones pluviométricas ha sido validada, para la posterior obtención de curvas teóricas de distribución de frecuencias de los valores de la intensidad de lluvia promediada en diferentes intervalos de tiempo, para luego estudiar la relación entre estos valores en una misma precipitación, siendo esta información de gran importancia relacionada con el origen y la evolución de la situación meteorológica que provoca la precipitación.

La curva Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), es una relación matemática, generalmente empírica, entre la intensidad de una precipitación, su duración y la frecuencia con la que se observa, como se señala en [Témez, J., 1978]. Su obtención directa sólo es posible en las estaciones dotadas de pluviógrafos o pluviómetros.

En este capítulo, se calculó la precipitación máxima en intervalos de tiempo entre 5 minutos y 30 horas registrada por los pluviómetros de balancín perteneciente a la red climatológica de la EPMAPS, entre los años 2000 y 2012. La investigación de la relación entre la intensidad máxima de precipitación, su duración y su frecuencia, permite obtener ecuaciones que describen el comportamiento de la Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), de las 15 estaciones en el Distrito Metropolitano de Quito, que fueron seleccionadas. En la Figura 2.1 se puede ver las ubicaciones de las estaciones pluviométricas.



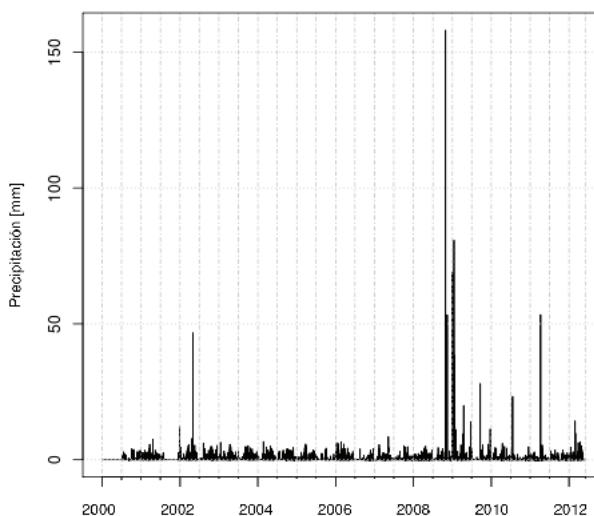
**Figura 2.1:** Ubicación de las 15 estaciones pluviométricas seleccionadas de la EPMAPS .  
Fuente: Los autores.

### 2.2.1 TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN DE INTENSIDAD DE LLUVIA

Los datos de precipitación que se utilizan en este estudio, son los registrados, cada 5 minutos por los pluviómetros de balancín de la red de estaciones de la EPMAPS en el Distrito Metropolitano de Quito durante el periodo 2000-2012, la Figura 2.2 muestra la información sin depurar.

La depuración de la información siguió el siguiente proceso:

- Se eliminaron los valores duplicados, que surgen por fallas del sensor o errores al ingreso manual de la información.
- Dentro del manejo de la base de datos en años atrás, en el ingreso manual de la información, se



**Figura 2.2:** Información pluviométrica cada 5 min sin depurar de la Estación Toctiuco P12.  
Fuente: Los autores.

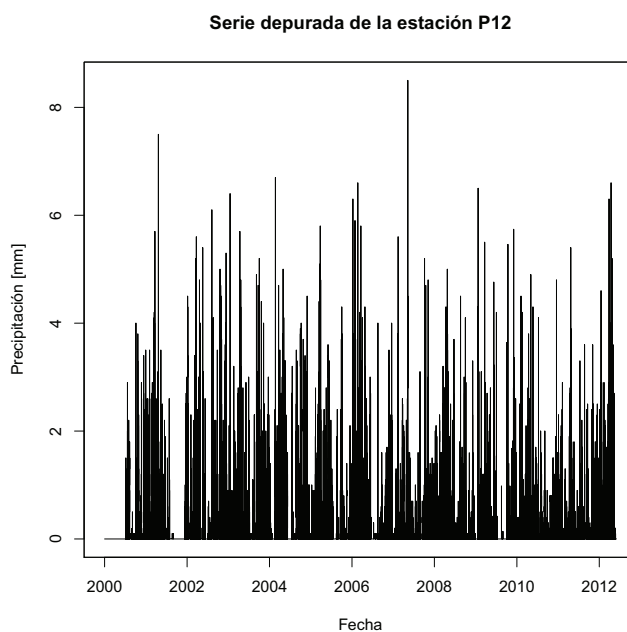
eliminaron los registros que marcaron cero, justificándose esto por la poca capacidad de almacenamiento y como consecuencia, confundiéndose con los registros de cuando el sensor no daba valor alguno por alguna avería, para el análisis que se hizo fueron rellenados con valores cero sin importar si era cierto o era un valor faltante.

- Revisión minuciosa, sobre la base de los valores que sobrepasan los valores máximos que puede registrar el sensor de precipitación, por ejemplo una precipitación aislada de 15 mm a las 11 AM con una duración de 5 min, en la estación Calderón P20.
- Para la validación o discriminación de algunos eventos se recurrió a la revisión de los registros diarios realizados por un observador en la estación de Izobamba.

El resultado del proceso antes descrito, se puede ver en la Figura 2.3 la información depurada de la estación Toctiuco P12.

La información depurada fue estadísticamente tratada, realizando los siguientes cálculos:

- La cantidad de precipitación total para cada episodio de lluvia individual.
- La cantidad de precipitación máxima registrada en intervalos de tiempo entre 5 minutos y 30 horas. Mediante un programa informático, se calcula la máxima cantidad de precipitación caída en los intervalos de tiempo de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70 y 75 minutos y 2, 4, 6, 9, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24 y 30 horas para cada evento individual, considerándose éste como cualquier episodio de lluvia separado temporalmente del resto por una

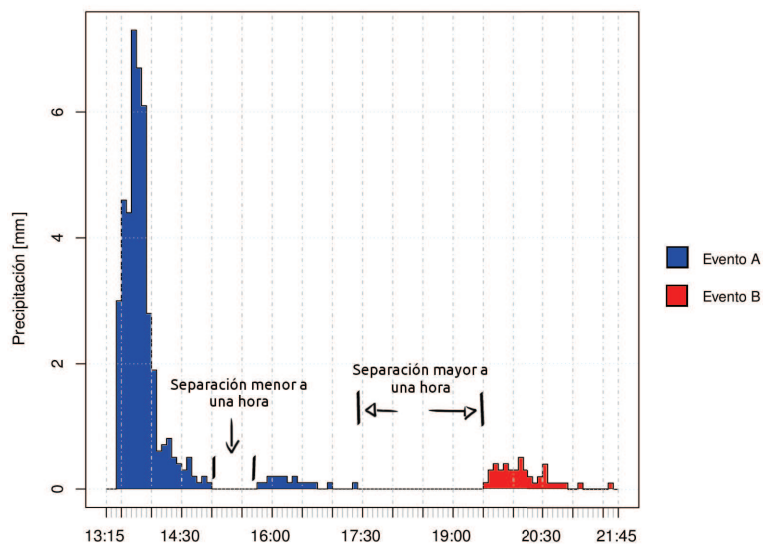


**Figura 2.3:** Información pluviométrica cada 5 min depurada de la Estación Toctiuco P12 .  
Fuente: Los autores.

distancia mayor que el intervalo de tiempo que se esté considerando, como se sugiere en [Casas Castillo, 2005]. Es decir, cuando el tiempo entre dos valores seguidos de intensidad de precipitación 0 (mm/min) es mayor que el intervalo considerado. En el caso en que dos o más eventos están separados un tiempo menor que el del intervalo que se estudia, se han tratado como dos o más partes integrantes de un evento único. En la Figura 2.4 se muestra un ejemplo para el intervalo de una hora.

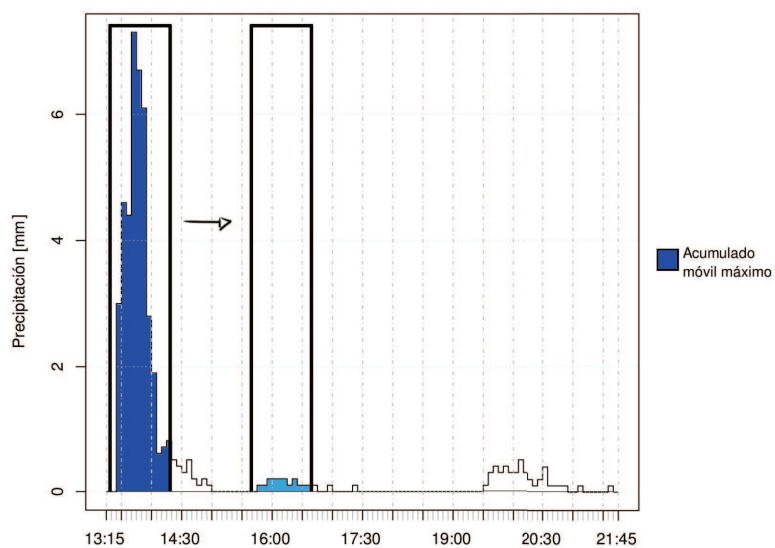
El funcionamiento del programa es el siguiente: dado un evento en particular, se calcula la precipitación total correspondiente a una ventana cuya anchura temporal (ver el ejemplo que se muestra en la Figura 2.5) coincide con el intervalo de tiempo que se está analizando. Así se obtiene un primer valor para la precipitación caída en dicho intervalo para esa lluvia. La ventana se va moviendo hacia la derecha a intervalos de cinco minutos, hasta barrer la superficie total del evento. De todos los valores obtenidos se selecciona el mayor, que será la cantidad de precipitación máxima en el intervalo de tiempo considerado para dicha precipitación, el programa escrito en R se lo puede ver en el Anexo B.





**Figura 2.4:** La zona azul se considera como un solo evento, pues la separación temporal es menor a la duración considerada (una hora), la zona roja es otro evento.

Fuente: Los autores.



**Figura 2.5:** La zona azul representa la mayor cantidad de precipitación del evento para el intervalo de una hora.

Fuente: Los autores.

De esta manera, se obtuvieron las series con los valores de precipitación máxima, calculados para cada duración de todas las precipitaciones registradas por el pluviómetro de balancín entre 2000 y 2012, de todas las estaciones.

### 2.3 ANÁLISIS DE LA INTENSIDAD DE LLUVIAS

El análisis de las principales características de la precipitación, como son: intensidad, duración, frecuencia, distribución, proveen información indispensable para la climatología así como por ejemplo el diseño y construcción de obras de drenaje, sistemas de canalización urbano y rural, los cuales son problemas de ingeniería que son cada vez más difíciles de solucionar, considerando el crecimiento de las ciudades, población, industria, entre otros factores, como lo señala por ejemplo [Rodríguez L., 1980].

Considerando la heterogeneidad de las precipitaciones en el Distrito Metropolitano de Quito [Ayabaca E., 1996], se propone encontrar ecuaciones Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), para cada una de las estaciones pluviométricas seleccionadas.

Considerando los datos de precipitación y su duración  $t$  en (5, 10, 15, 20,...,360,..., 1800 min) y fijando el período de retorno  $T$  en (3, 5, 10, 15, 25, 30, 50 años), existe un gran número de aproximaciones empíricas que relacionan la intensidad  $I$ , duración  $t$  y el período de retorno  $T$ , como por ejemplo:

- *Fórmula de Talbot*, se trata de una hipérbola frecuentemente utilizada con dos parámetros ( $a$ ,  $b$ ) que pueden ser ajustados mediante mínimos cuadrados, para cada período de retorno  $T$ , tal como se describe en [Casas Castillo, 2005]:

$$I = \frac{a}{b + t}. \quad (2.1)$$

- *Fórmula de Sherman*, con tres parámetros ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) que pueden ser ajustados mediante mínimos cuadrados, para cada período de retorno  $T$ , tal como se describe en [Sherman C., 1931]:

$$I(t) = \frac{a}{(t + b)^c}. \quad (2.2)$$

- *Fórmula de Chow*, también con tres parámetros ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) que pueden ser ajustados mediante mínimos cuadrados, para cada período de retorno  $T$ , como se describe en [Pizarro R., 2003]:

$$I(t) = \frac{a}{t^c + b}. \quad (2.3)$$

Para obtener una curva IDF teórica a partir de una distribución de probabilidad  $F(x)$ , se puede seguir el proceso descrito en [Témez, J., 1978], para esto es necesario aislar matemáticamente la precipitación  $x$ , que está directamente relacionada con la intensidad media  $I$  y la duración  $t$ , gracias a la ecuación  $x = It$ , puesto que el período de retorno  $T$  se define como la inversa de  $1 - F(x)$ , podemos encontrar la función  $f(T)$ , como la inversa de  $F(x)$ , según:

$$T = \frac{1}{1 - F(It)} \Rightarrow It = f(T).$$

Se puede ver que  $I(T) = kT^m$ , se puede obtener a partir de la distribución de Pareto

$$F(x) = 1 - \left(\frac{L}{x}\right)^\alpha,$$

donde  $L = kt$ ,  $x = It$ ,  $\alpha = 1/m$ , pues en efecto

$$F(It) = 1 - \left(\frac{kt}{It}\right)^{1/m} = 1 - \frac{1}{T}.$$

Partiendo de la distribución de Gumbel:

$$F(I) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{I-\mu}{\sigma}\right)\right) = 1 - \frac{1}{T},$$

se tiene que

$$I(T) = \mu + \sigma \ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right).$$

De esta manera se pueden deducir algunas aproximaciones teóricas, partiendo de una función de probabilidad dada.

#### 2.4 ANÁLISIS DE LAS SERIES DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA, AJUSTE MEDIANTE LA FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN GAMMA

Se analizan las series de cantidad de precipitación máxima, siguiendo las recomendaciones citadas en [Casas Castillo, 2005], para las respectivas duraciones  $t$  indicadas en la subsección 2.2.1, en períodos de 5 minutos a 30 horas. Para cada una de las series se obtiene un ajuste mediante la función de distribución Gamma, que para este estudio resulta beneficiosa, pues está limitada a valores positivos y con asimetría hacia la derecha y su función de densidad es:

$$f(x) = \frac{\lambda(\lambda x)^{k-1}}{\Gamma(k)} e^{-\lambda x}, \quad x \geq 0, \quad (2.4)$$

siendo  $\lambda$  y  $k$  los parámetros de escala y forma respectivamente de la distribución, que se obtiene a partir de la media  $m$  y la desviación estándar  $\sigma$ , según las ecuaciones:

$$m = \frac{k}{\lambda},$$

$$\sigma^2 = \frac{k}{\lambda^2}.$$

De la estación pluviométrica Toctiuco P12, se utiliza la serie temporal de la información pluvio-

métrica cada 5 minutos la cual fue previamente tratada siguiendo los pasos descritos en la subsección 2.2.1. El Cuadro 2.2, muestra la media, la varianza y el valor máximo de las series en todas las duraciones  $t$ , así como los parámetros  $\lambda$  y  $k$  obtenidos en el ajuste de cada una de éstas por la función de distribución Gamma.

$t(\text{min})$	media	$\sigma^2$	$k$	$\lambda$	$P_{max}(\text{mm})$
5	0.24	0.2614	0.2222	0.9220	8.5
10	0.40	0.9323	0.1753	0.4336	16.4
15	0.55	1.7659	0.1704	0.3106	20.1
20	0.68	2.6405	0.1742	0.2568	24.3
25	0.80	3.5683	0.1771	0.2228	27.9
30	0.90	4.4620	0.1821	0.2020	31.2
35	1.00	5.2852	0.1882	0.1887	34.1
40	1.09	6.0614	0.1955	0.1796	34.1
45	1.17	6.8011	0.2019	0.1723	34.3
50	1.26	7.5174	0.2098	0.1671	34.6
55	1.33	8.1632	0.2163	0.1628	34.8
60	1.40	8.7805	0.2230	0.1594	35.5
65	1.47	9.4313	0.2286	0.1557	36.7
70	1.53	10.0117	0.2348	0.1531	37.3
75	1.60	10.6285	0.2416	0.1508	38.2
120	2.15	15.5828	0.2959	0.1378	38.6
240	3.23	26.1010	0.3999	0.1238	44.8
360	4.06	34.4623	0.4791	0.1179	46.7
540	4.90	44.7803	0.5360	0.1094	48.2
720	5.49	53.8092	0.5601	0.1020	49.4
840	5.97	60.3478	0.5902	0.0989	50.4
960	6.42	67.6133	0.6092	0.0949	52.0
1080	6.84	75.9596	0.6168	0.0901	55.6
1200	7.19	85.8684	0.6018	0.0837	61.3
1320	7.80	99.0509	0.6146	0.0788	65.7
1440	8.51	115.7143	0.6260	0.0736	71.5
1800	10.38	161.1467	0.6688	0.0644	77.3

**Cuadro 2.2:** Media, varianza, valor máximo de precipitación  $P_{max}(\text{mm})$  y parámetros  $\lambda$  y  $k$ , de la función de distribución Gamma, ajustada a las series de cantidad de precipitación máxima, para cada duración  $t$  considerada, en la estación Toctiuco P12.

Elaboración: Los autores.

El Cuadro 2.3, indica el número de datos de precipitación máxima  $D$ , para cada una de las duraciones 5 a 1800 minutos. Para representar los datos obtenidos en una misma gráfica, se procede a eliminar la normalización de cada una de las funciones de distribución Gamma obtenidas, siguiendo el proceso descrito en [Casas Castillo, 2005] de la siguiente manera: se fracciona cada serie en

intervalos de longitud variable  $l$ , utilizamos la fórmula de Sturges [Pizarro R., 2003], para obtener histogramas con un número de clases próximo a  $1 + 3.32 \log D$ . Si se multiplica cada función de densidad por la longitud  $l$  correspondiente dada por:

$$l = \frac{P_{max}}{1 + 3.32 \log D},$$

se obtiene la función de densidad desnormalizada de la distribución Gamma:

$$f(x) = l \frac{\lambda^k}{\Gamma(k)} x^{k-1} e^{-\lambda x}, \quad (2.5)$$

donde  $x$  es la cantidad de precipitación.

Para el rango de 5 a 75 minutos se han considerado 14 intervalos de clase, mientras que para las superiores a 120 minutos se consideraron 13 intervalos.

$t(\text{min})$	$D$	$t(\text{min})$	$D$
5	17316	120	4126
10	12849	240	2905
15	10810	360	2321
20	9553	540	1796
25	8709	720	1474
30	8052	840	1306
35	7554	960	1162
40	7119	1080	1055
45	6746	1200	951
50	6390	1320	851
55	6133	1440	741
60	5905	1800	607
65	5678		
70	5498		
75	5312		

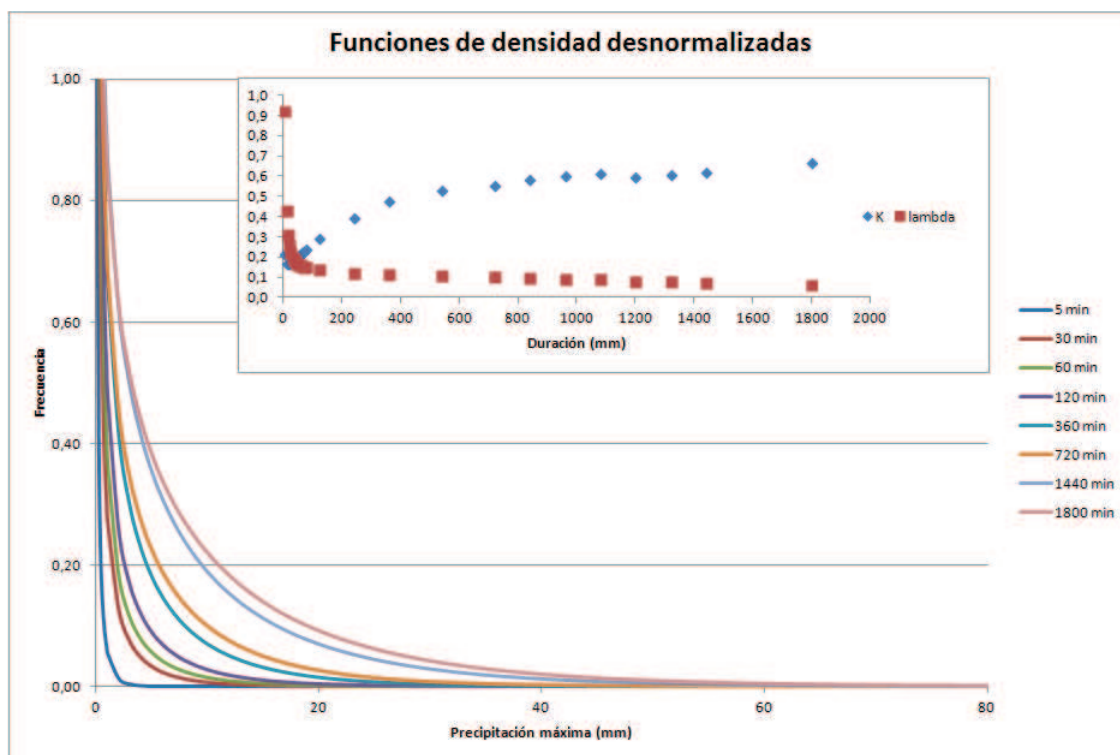
**Cuadro 2.3:** Número de eventos de precipitación máxima  $D$ , para duraciones entre 5 minutos y 30 horas, para la estación de Toctiuco P12 en el período 2000-2012.

Elaboración: Los autores.

Utilizando el valor calculado de  $l$  y la ecuación 2.5 junto a los resultados obtenidos en el Cuadro 2.2, se calculó la expresión analítica de la función de densidad desnormalizada de la distribución Gamma, para todas las duraciones analizadas, es decir 5, 10, 15,...,1800 minutos. A continuación, se presenta como ejemplo el resultado para la función de densidad en 5 minutos:

$$f(x) = 0.135x^{-0.7778} e^{-0.9220x}. \quad (2.6)$$

En la Figura 2.6, se presentan las funciones de densidad desnormalizadas para la distribución Gamma, para algunas de las duraciones seleccionadas y en la parte superior se presentan los valores  $k$  y  $\lambda$  para todas las duraciones analizadas.



**Figura 2.6:** Funciones de densidad desnormalizadas de la Distribución Gamma, que ajustan las series de cantidad de precipitación máxima para algunas de las duraciones consideradas. La figura insertada muestra los valores que toman los parámetros  $k$  y  $\lambda$  de dichas funciones para cada duración.

Fuente: Los autores.

Para hacer el cálculo de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, utilizando la función de distribución Gamma, calculamos las frecuencias acumuladas  $F$  correspondientes a 3, 5, 10, 15, 25, 30, 50 años que son los períodos de retorno  $T$ , para todas las duraciones consideradas  $t$ . Como lo recomienda [Casas Castillo, 2005] para el cálculo de la frecuencia acumulada  $F$ , usamos la siguiente ecuación:

$$F = 1 - \frac{N/T}{D},$$

donde  $N$  es el número de años del cual se tiene información, 12 años para el caso de la estación Tociuco P12,  $D$  es el número de datos de la serie que se está considerando y  $T$  el período de retorno. El Cuadro 2.4 muestra las frecuencias acumuladas, para cada duración y período de retorno calculadas.

Con las funciones de distribución Gamma calculadas, como la del ejemplo 2.6 se puede calcular la precipitación correspondiente a las frecuencias acumuladas del Cuadro 2.4.

Es decir, que para calcular la precipitación para una duración dada tenemos que resolver ecuaciones no-lineales, similares a 2.6, que son de la forma:

$$f(x) = ax^b e^{cx}, \quad (2.7)$$

donde  $x$  es la cantidad de precipitación y  $f(x)$  es la frecuencia que está dada por  $1 - F$ .

Se calcula la función de densidad de la ecuación 2.6, que corresponde a una duración de 5 minutos, para un período de retorno de por ejemplo 10 años, se tiene que la ecuación a resolver es:

$$0.135x^{-0.7778} e^{-0.9220x} = 1 - 0.999942,$$

esta ecuación se puede resolver fácilmente, utilizando cualquier método numérico de resolución de ecuaciones no lineales por ejemplo el método de Newton, donde la precipitación máxima  $x$  en 5 minutos es aproximadamente 6.8 (mm) para un período de retorno de 10 años y la intensidad de lluvia máxima correspondiente es aproximadamente 1.4 (mm/min).

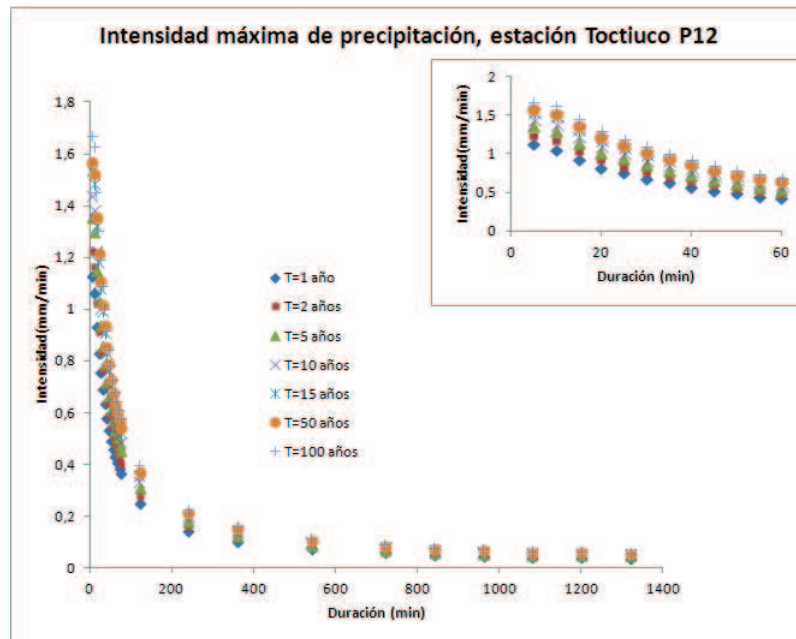
t(min)	Período de retorno $T$ (años)						
	3	5	10	15	25	30	50
5	0.999807	0.999884	0.999942	0.999961	0.999977	0.999981	0.999988
10	0.999741	0.999844	0.999922	0.999948	0.999969	0.999974	0.999984
15	0.999692	0.999815	0.999907	0.999938	0.999963	0.999969	0.999981
20	0.999651	0.999791	0.999895	0.999930	0.999958	0.999965	0.999979
25	0.999617	0.999770	0.999885	0.999923	0.999954	0.999962	0.999977
30	0.999586	0.999752	0.999876	0.999917	0.999950	0.999959	0.999975
35	0.999559	0.999735	0.999868	0.999912	0.999947	0.999956	0.999974
40	0.999532	0.999719	0.999860	0.999906	0.999944	0.999953	0.999972
45	0.999506	0.999704	0.999852	0.999901	0.999941	0.999951	0.999970
50	0.999478	0.999687	0.999844	0.999896	0.999937	0.999948	0.999969
55	0.999456	0.999674	0.999837	0.999891	0.999935	0.999946	0.999967
60	0.999436	0.999661	0.999831	0.999887	0.999932	0.999944	0.999966
65	0.999413	0.999648	0.999824	0.999883	0.999930	0.999941	0.999965
70	0.999394	0.999636	0.999818	0.999879	0.999927	0.999939	0.999964
75	0.999372	0.999623	0.999812	0.999874	0.999925	0.999937	0.999962
120	0.999192	0.999515	0.999758	0.999838	0.999903	0.999919	0.999952
240	0.998853	0.999312	0.999656	0.999771	0.999862	0.999885	0.999931
360	0.998564	0.999138	0.999569	0.999713	0.999828	0.999856	0.999914
540	0.998144	0.998886	0.999443	0.999629	0.999777	0.999814	0.999889
720	0.997739	0.998643	0.999322	0.999548	0.999729	0.999774	0.999864
840	0.997448	0.998469	0.999234	0.999490	0.999694	0.999745	0.999847
960	0.997131	0.998279	0.999139	0.999426	0.999656	0.999713	0.999828
1080	0.996840	0.998104	0.999052	0.999368	0.999621	0.999684	0.999810
1200	0.996495	0.997897	0.998948	0.999299	0.999579	0.999649	0.999790
1320	0.996083	0.997650	0.998825	0.999217	0.999530	0.999608	0.999765
1440	0.995502	0.997301	0.998650	0.999100	0.999460	0.999550	0.999730
1800	0.994509	0.996705	0.998353	0.998902	0.999341	0.999451	0.999671

**Cuadro 2.4:** Frecuencias acumuladas para cada período de retorno  $T$  (años) y la duración  $t$  (min) correspondiente, para la estación Toctiuco P12.

Elaboración: Los autores.

Además, si se dividen los valores de precipitación para su duración correspondiente en cada caso, se puede obtener también los valores promedio de intensidad de precipitación, como se lo puede ver en la Figura 2.7.





**Figura 2.7:** Intensidad de lluvia máxima, estación Toctiuco P12.  
Fuente: Los autores.

El Cuadro 2.5, muestra los valores aproximados calculados de intensidad de precipitación máxima, calculados a partir de la función de distribución Gamma, para la estación Toctiuco P12.

## 2.5 APROXIMACIÓN DE LAS IDF MEDIANTE LA CURVA DE TALBOT

Para obtener una primera aproximación de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), es decir una relación entre la intensidad de precipitación  $I$  (mm/min) y la duración  $t$  (min) para un período de retorno  $T$  (años) dado, utilizamos un primer ajuste mediante la curva empírica de Talbot descrita en 2.1, dada por:

$$I = \frac{a}{b + t},$$

puesto que:

$$\frac{1}{I} = \frac{b}{a} + \frac{1}{a}t,$$

se verifica que el inverso de la intensidad  $I$  tiene una relación lineal con la duración  $t$ , donde la pendiente es  $1/a$  y la ordenada en el origen es  $b/a$ , de esta manera podemos ajustar los valores  $(1/I, t)$ , mediante una regresión lineal por medio de mínimos cuadrados.

Analizando todo el rango de duraciones, es decir de 5 a 1800 minutos, se verifica que la aproximación lineal no resulta muy satisfactoria, como se lo puede observar en la primera tabla del Cuadro 2.6.

t(min)	Intensidad máxima (mm/min), estación P12						
	3	5	10	15	25	30	50
5	1.1292	1.2261	1.3591	1.4376	1.5371	1.5728	1.6731
10	1.0634	1.1640	1.3025	1.3844	1.4885	1.5258	1.6310
15	0.9311	1.0238	1.1516	1.2273	1.3235	1.3580	1.4554
20	0.8310	0.9150	1.0308	1.0994	1.1866	1.2179	1.3061
25	0.7566	0.8340	0.9406	1.0038	1.0841	1.1130	1.1943
30	0.6926	0.7637	0.8617	0.9198	0.9937	1.0202	1.0950
35	0.6364	0.7017	0.7918	0.8452	0.9131	0.9374	1.0061
40	0.5791	0.6391	0.7219	0.7710	0.8334	0.8558	0.9189
45	0.5321	0.5878	0.6646	0.7101	0.7679	0.7887	0.8472
50	0.4920	0.5437	0.6151	0.6573	0.7110	0.7303	0.7847
55	0.4576	0.5059	0.5725	0.6120	0.6621	0.6801	0.7309
60	0.4290	0.4743	0.5368	0.5737	0.6208	0.6376	0.6852
65	0.4062	0.4490	0.5081	0.5430	0.5875	0.6035	0.6485
70	0.3841	0.4245	0.4804	0.5135	0.5555	0.5706	0.6131
75	0.3652	0.4037	0.4567	0.4881	0.5280	0.5423	0.5826
120	0.2492	0.2757	0.3123	0.3340	0.3615	0.3714	0.3992
240	0.1443	0.1595	0.1803	0.1927	0.2083	0.2139	0.2296
360	0.1029	0.1138	0.1286	0.1373	0.1484	0.1524	0.1635
540	0.0728	0.0807	0.0914	0.0977	0.1058	0.1086	0.1167
720	0.0568	0.0631	0.0718	0.0769	0.0834	0.0857	0.0922
840	0.0500	0.0556	0.0633	0.0678	0.0736	0.0756	0.0814
960	0.0450	0.0501	0.0572	0.0613	0.0666	0.0685	0.0738
1080	0.0417	0.0465	0.0531	0.0570	0.0619	0.0637	0.0686
1200	0.0394	0.0440	0.0504	0.0542	0.0589	0.0606	0.0654
1320	0.0376	0.0421	0.0483	0.0519	0.0565	0.0582	0.0628
1440	0.0363	0.0407	0.0468	0.0504	0.0549	0.0565	0.0610
1800	0.0323	0.0364	0.0419	0.0452	0.0494	0.0509	0.0550

**Cuadro 2.5:** Intensidades máximas de precipitación, estación Toctiuco P12.  
Elaboración: Los autores.

Sin embargo, si se hace un análisis por separado, considerando los siguientes rangos de duración:

- $t \leq 60$  min,
- $65 \leq t \leq 840$  min,
- $960 \leq t \leq 1800$  min,

se puede ver que la curva de Talbot ofrece un ajuste muy satisfactorio, considerando los rangos por separado, como efectivamente se lo describe en las tablas del Cuadro 2.6. También se puede apreciar en la Figura 2.8 la relación lineal, entre el inverso de la intensidad  $1/I$  y los diferentes rangos de

tiempo analizados, donde se presentan las ecuaciones de ajuste.

Puesto que las curvas IDF construidas de esta manera, requerirían la combinación de tres ecuaciones y eso tan solo para un único período de retorno, no resulta muy conveniente para los propósitos del presente proyecto.

Todas las duraciones				Duraciones $t \leq 60$ min			
$T$ (años)	$a$	$b$	$r$	$T$ (años)	$a$	$b$	$r$
3	52.6	80.9	0.9896	3	37.1	25.0	0.9974
5	58.9	83.7	0.9888	5	41.4	25.6	0.9971
10	67.6	86.7	0.9878	10	47.3	26.4	0.9967
15	72.8	88.1	0.9873	15	50.8	26.8	0.9965
25	79.3	89.6	0.9868	25	55.2	27.2	0.9962
30	81.6	90.1	0.9866	30	56.9	27.4	0.9961
50	88.2	91.3	0.9862	50	61.4	27.8	0.9958

Duraciones $65 \leq t \leq 840$ min				Duraciones $960 \leq t \leq 1800$ min			
$T$ (años)	$a$	$b$	$r$	$T$ (años)	$a$	$b$	$r$
3	43.9	52.5	0.9994	3	98.8	1278.7	0.9955
5	48.8	53.8	0.9993	5	114.5	1369.6	0.9950
10	55.6	55.2	0.9992	10	136.3	1473.7	0.9944
15	59.6	55.8	0.9991	15	149.3	1526.2	0.9940
25	64.6	56.4	0.9990	25	165.9	1585.1	0.9937
30	66.4	56.6	0.9990	30	171.9	1604.4	0.9936
50	71.5	57.0	0.9989	50	188.8	1654.2	0.9933

**Cuadro 2.6:** Parámetros  $a$ ,  $b$  de ajuste para la función de Talbot y coeficiente de correlación lineal  $r$ , estación Toctiuco P12.

Elaboración: Los autores.

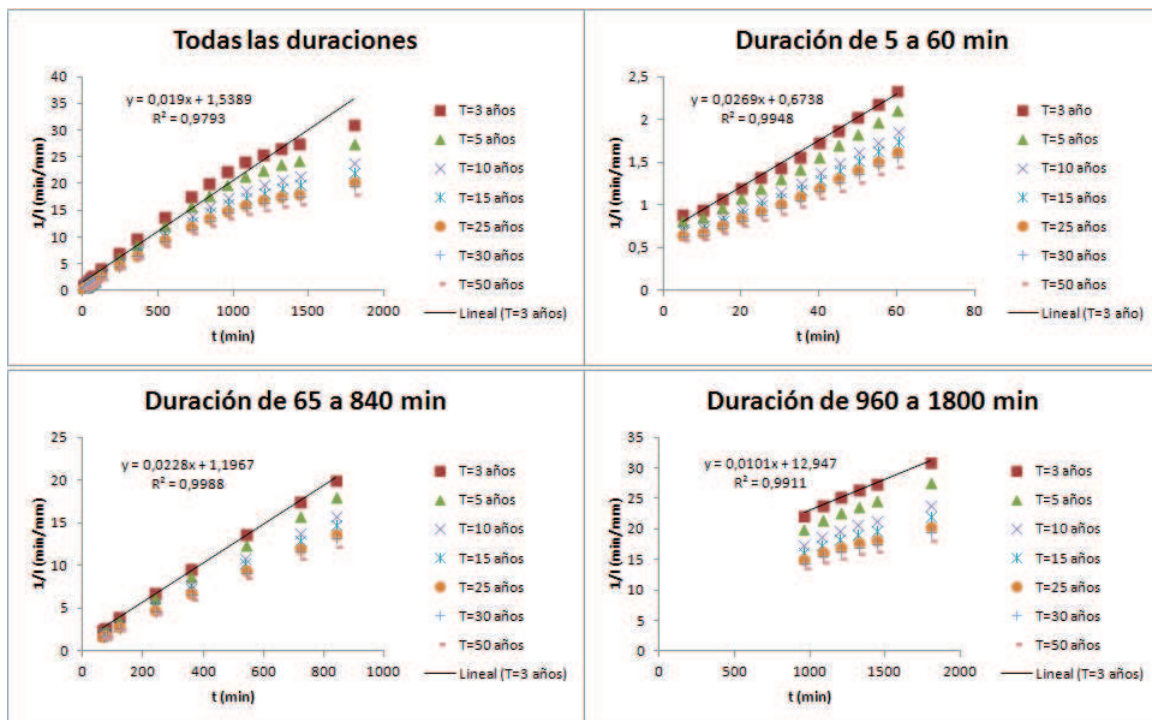
## 2.6 APROXIMACIÓN DE LAS IDF MEDIANTE LA CURVA DE SHERMAN

Para obtener otra expresión que describa las curvas IDF, se prueba el ajuste propuesto por Sherman, descrita en [Sherman C., 1931], cuya ecuación es:

$$I = \frac{a}{(b + t)^c}.$$

El ajuste se lo hace mediante el método de mínimos cuadrados, para los cálculos se utilizó la herramienta de análisis Solver<sup>2</sup>, para encontrar el valor óptimo de una celda objetivo. El ajuste propuesto

<sup>2</sup>Microsoft Office Excel 2007.



**Figura 2.8:** Relación lineal entre el inverso de la Intensidad  $1/I$  y la duración  $t$ , estación Toctiuco P12. Fuente: Los autores.

se muestra satisfactorio, como se efectivamente se aprecia en el Cuadro 2.7, se pueden observar los valores de los parámetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$  ajustados y los respectivos coeficientes de correlación  $r$ .

$T$ (años)	$a$	$b$	$c$	$r$
3	39.4	28.4	0.999857	0.998740
5	44.0	29.2	0.999900	0.998570
10	50.4	30.2	0.999900	0.998349
15	54.1	30.6	0.999397	0.998226
25	59.1	31.2	0.999900	0.998081
30	60.7	31.4	0.999900	0.998031
50	65.6	31.9	0.999795	0.997895

**Cuadro 2.7:** Parámetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$  de ajuste e las curvas IDF para la función de Sherman y coeficiente de correlación  $r$ , estación Toctiuco P12.

Elaboración: Los autores.

Como se puede ver en el Cuadro 2.7, los coeficientes  $b$  y  $c$  no presentan una mayor variación, por tanto los mismos no dependen del período de retorno, lo cual concuerda con lo propuesto en [Pizarro R., 2003].

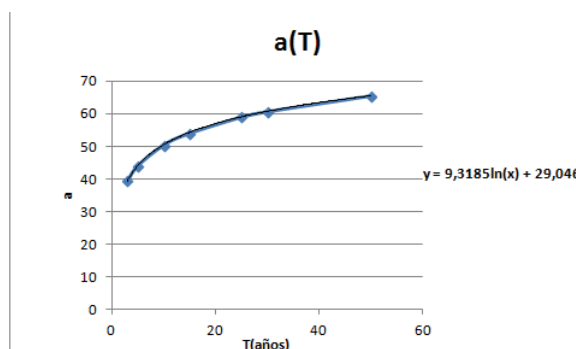
Se hace un nuevo ajuste del parámetro  $a$ , utilizando mínimos cuadrados, fijando los parámetros  $b = 28.40652127$  y  $c = 0.99939665$  como los valores medios del primer ajuste, obteniendo de esta manera los valores que se presentan en el Cuadro 2.8.

$T$ (años)	$a$
3	39.4
5	43.3
10	48.6
15	51.8
25	55.8
30	57.2
50	61.3

**Cuadro 2.8:** Ajuste del parámetro  $a$  de la función de Sherman, con los parámetros  $b$  y  $c$  fijos, estación Toctiuco P12.

Elaboración: Los autores.

Se puede observar que los parámetros  $a$ , presentan una dependencia logarítmica con respecto al período de retorno  $T$ , por tanto se procede a hacer una regresión lineal entre  $(a, \log T)$  y se obtiene que el coeficiente de correlación lineal es 0.999916, la Figura 2.9 muestra el comportamiento del parámetro  $a$  con respecto al período de retorno  $T$  y el respectivo ajuste.



**Figura 2.9:** Relación lineal entre  $(a, \log T)$ , estación Toctiuco P12.

Fuente: Los autores.

De esta manera se puede obtener la intensidad máxima de precipitación, como función de la duración  $t$  y el período de retorno  $T$ , considerando los coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$ . Para el caso de la estación Toctiuco P12, se tiene la siguiente ecuación:

$$I(t, T) = \frac{9.3185 \log T + 29.0457}{(28.4065 + t)^{0.9993}}, \quad (2.8)$$

con  $t$  en minutos,  $I$  en mm/min y  $T$  en años.

El cuadro 2.9 indica las ecuaciones IDF de todas las estaciones analizadas.

Nombre de estación	Código EPMAPS	Ecuación IDF
Rumihurco	P03	$I(t, T) = \frac{11.7842 \log T + 20.6591}{(33.9898 + t)^{0.9529}}$
Rumipamba	P08	$I(t, T) = \frac{10.4502 \log T + 19.9919}{(28.9484 + t)^{0.9327}}$
Ñaquito	P09	$I(t, T) = \frac{13.5806 \log T + 20.0822}{(26.7556 + t)^{0.9996}}$
DAC Aeropuerto	P10	$I(t, T) = \frac{13.9378 \log T + 40.7176}{(34.5037 + t)^{0.9993}}$
Antenas	P11	$I(t, T) = \frac{13.1725 \log T + 27.8643}{(44.6890 + t)^{0.9948}}$
Toctiuco	P12	$I(t, T) = \frac{9.3185 \log T + 29.0457}{(28.4065 + t)^{0.9993}}$
Cumbayá	P13	$I(t, T) = \frac{11.6546 \log T + 31.9457}{(26.4166 + t)^{0.9999}}$
El Cinto	P15	$I(t, T) = \frac{15.4566 \log T + 21.8338}{(29.5855 + t)^{0.9659}}$
Izobamba	P16	$I(t, T) = \frac{10.9896 \log T + 10.6041}{(17.1663 + t)^{0.9359}}$
El Tingo	P17	$I(t, T) = \frac{9.3185 \log T + 29.0457}{(28.4065 + t)^{0.9993}}$
La Tola	P19	$I(t, T) = \frac{3.2763 \log T + 33.2727}{(33.1217 + t)^{0.9998}}$
Calderón	P20	$I(t, T) = \frac{9.3756 \log T + 22.6219}{(41.6779 + t)^{0.9989}}$
Chillogallo	P21	$I(t, T) = \frac{6.6120 \log T + 9.5343}{(12.7538 + t)^{0.8858}}$
Atacazo	P23	$I(t, T) = \frac{6.3114 \log T + 12.4481}{(27.7446 + t)^{0.8954}}$
El Troje	P25	$I(t, T) = \frac{10.5211 \log T + 32.3910}{(25.7508 + t)^{0.9993}}$

**Cuadro 2.9:** Ecuaciones IDF, para las 15 estaciones analizadas.

Elaboración: Los autores.

*“It has been an axiom of mine that the little things are infinitely the most important.”*

Arthur Conan Doyle, A case of Identity

# 3

## CLASIFICACIÓN DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO POR ZONAS ATMOSFÉRICAS HOMOGÉNEAS

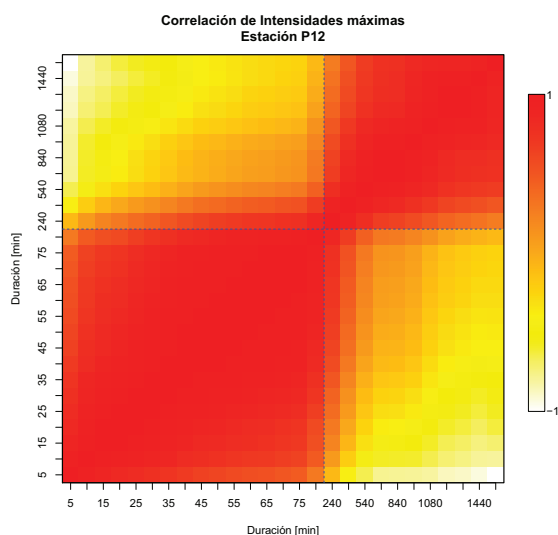
En el presente capítulo se realiza una clasificación de las estaciones pluviométricas analizadas en el capítulo anterior (siguiendo como esquema el trabajo realizado en [Casas Castillo, 2005]), se clasifica también los eventos extremos determinados para cada estación así como también al conjunto general de los eventos extremos encontrados en el presente estudio. Este análisis se realiza para el total de estaciones; se toma la estación Toctiuco P12 como *estación modelo* para la clasificación objetiva de eventos extremos así como para la posterior reconstrucción de los eventos con el modelo numérico WRF. El estudio en este capítulo se centra en *zonas pluviométricas homogéneas*, esto debido a que los datos necesarios para realizar un estudio más completo, para crear *zonas atmosféricas homogéneas*, no fue posible debido a la falta de información requerida en intervalos de cinco minutos en los sitios estudiados.

### 3.1 CLASIFICACIÓN OBJETIVA DE EVENTOS POR ESTACIÓN

Para la estación Toctiuco P12 se han encontrado en los casi doce años de información diecinueve eventos clasificados como extremos, es decir, que para al menos un período de tiempo analizado han igualado o superado el valor calculado para el período de retorno de cinco años. Se completa el cua-

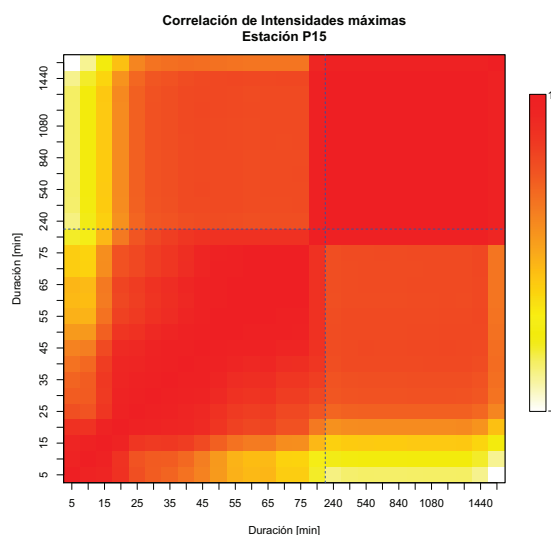
dro 3.1 con los valores de precipitación acumulada para todos los períodos. Se coloca en negrita los valores en los que se ha igualado o superado el período de retorno  $T = 5$  años (el cuadro muestra únicamente algunos de los valores utilizados en el presente análisis).

Se calcula con los episodios extremos de cada estación la matriz de correlación, la cual se muestra en forma gráfica como un *heat map*, ver Figuras 3.1 y 3.2, para obtener una idea de los resultados de una manera más rápida. En el caso de la estación P12, ver Figura 3.1, se puede observar dos grupos marcados entre las lluvias extremas con duraciones menores a 120 minutos y las que duran entre 240 y 1800 minutos. Este caso no es el único, otras estaciones han mostrado hasta tres o cuatro grupos de duraciones no siempre muy diferenciados en la matriz de correlaciones. Para la estación El Cinto P15 se obtuvo una mayor correlación entre los episodios extremos con duraciones menores a los veinte minutos y dos grupos no claramente diferenciados de eventos de entre 25 y 120 minutos, así como otro para las de duración mayor a 240 minutos. En esta estación los eventos extremos encontrados de carácter convectivo tienen una corta duración.



**Figura 3.1:** Matriz de correlación para la estación Toctiuco P12, nótese la separación en el valor 120[*min*].

Elaboración: Los autores.



**Figura 3.2:** Matriz de correlación para la estación El Cinto P15, nótese la separación en el valor 120[*min*].

Elaboración: Los autores.

Según los resultados del análisis de las matrices de correlación para las estaciones analizadas y el comportamiento meteorológico de la precipitación en el Distrito Metropolitano de Quito, particularmente sobre la ciudad de Quito, se ha determinado tomar tres grupos para la clasificación de eventos extremos los mismos que fueron descritos en el Capítulo 2.



ddmmaa	t (min)																				
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	120	240	360	540	720	960	1200	1440	1800
<b>150301</b>	4.2	7.7	11.8	15.3	18.1	19.5	22.0	24.8	26.8	27.4	28.0	28.2	30.4	44.8	46.7	48.2	49.2	49.4	52.0	57.3	62.2
<b>210401</b>	7.5	14.1	19.6	24.3	27.9	29.0	29.5	29.5	29.5	29.5	29.5	29.5	29.5	30.3	30.3	30.3	30.3	30.3	30.3	30.3	43.5
<b>230302</b>	5.6	10.9	15.7	18.5	20.4	21.4	21.8	22.1	22.2	22.5	22.7	22.7	23.0	23.0	23.0	23.2	23.6	23.6	23.6	23.8	46.1
<b>270402</b>	4.0	5.6	7.3	9.2	11.1	12.5	14.4	15.6	16.1	16.3	16.4	16.4	18.3	20.6	20.6	21.2	26.2	29.7	37.0	40.3	45.3
<b>161202</b>	1.7	3.2	4.4	5.0	5.5	6.1	6.4	6.7	6.9	7.1	7.4	7.9	10.2	14.9	17.6	23.1	24.5	24.9	26.8	34.7	45.3
<b>150403</b>	5.7	9.8	12.5	15.7	19.3	22.0	24.4	25.5	26.3	27.1	27.6	27.9	29.0	29.1	30.0	30.8	32.2	35.4	38.4	47.5	55.9
<b>140404</b>	1.7	3.2	4.6	5.2	6.4	7.0	7.3	7.4	7.6	7.7	7.8	7.8	11.5	13.6	18.5	24.3	31.2	33.6	33.6	42.1	46.4
<b>220204</b>	6.7	10.2	11.7	12.6	13.6	14.3	14.7	15.1	15.2	15.3	15.3	15.3	15.3	15.5	15.5	15.7	15.9	16.1	16.3	16.5	24.7
<b>120205</b>	2.8	4.6	6.3	7.9	8.8	9.6	10.0	10.2	10.4	11.0	11.6	12.2	16.4	26.7	37.8	43.4	49.4	52.0	61.3	71.5	77.3
<b>210206</b>	6.6	10.4	12.0	13.6	14.3	14.8	15.0	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.3	15.3	15.3	15.3	15.8	17.8	23.7	30.0	31.1
<b>241106</b>	3.5	6.3	9.0	10.4	13.0	15.7	18.0	20.7	22.1	23.2	25.4	26.3	35.6	40.3	40.3	40.4	40.4	40.4	40.4	44.7	47.8
<b>260107</b>	1.3	2.2	3.2	4.3	5.1	5.9	7.0	8.0	8.9	9.7	10.4	10.8	16.1	21.3	30.8	33.0	36.0	36.6	41.0	41.0	45.8
<b>100507</b>	8.5	16.4	20.1	23.0	27.4	31.2	34.1	34.1	34.3	34.6	34.8	35.5	38.6	38.9	38.9	38.9	38.9	38.9	38.9	38.9	38.9
<b>101107</b>	1.5	2.6	3.6	4.4	4.9	5.5	6.1	6.6	7.2	7.5	8.1	8.7	12.4	18.0	21.7	30.4	30.8	31.0	32.8	33.2	49.1
<b>310308</b>	2.8	5.5	7.5	8.7	9.9	10.6	11.4	12.6	14.5	15.1	16.2	17.9	21.4	27.5	29.1	31.2	31.8	35.6	54.5	61.7	61.8
<b>120408</b>	4.3	8.0	8.9	9.8	10.6	11.5	12.8	13.8	14.4	14.8	15.1	16.0	20.2	24.4	27.2	34.9	39.6	49.4	60.1	64.7	69.8
<b>280309</b>	2.9	5.1	5.7	6.7	7.0	7.8	8.5	9.6	10.2	11.2	11.5	12.3	21.8	25.8	30.7	31.8	31.8	32.4	44.1	50.6	55.2
<b>060210</b>	4.5	6.7	10.5	12.4	13.4	13.9	14.5	15.0	15.5	15.9	16.3	16.7	21.1	31.2	33.6	38.8	40.0	40.1	50.8	55.0	55.3
<b>140412</b>	6.6	8.7	10.6	11.5	11.9	12.0	12.1	12.1	12.1	12.2	12.2	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3

**Cuadro 3.1:** Episodios lluviosos que superan o igualan el período de retorno para 5 años en la estación P12 (Toctiuco).

Elaboración: Los autores.

Se realiza un análisis de conglomerados, el cual es un método utilizado en varias ramas de la ciencia para clasificar grandes cantidades de información, en climatología, por ejemplo, se utiliza para encontrar patrones climáticos de presión atmosférica. Para esto se normaliza la matriz de los eventos extremos por estación, ver cuadro 3.1, para lograr que las variables tengan el mismo peso al realizar el análisis, esto se hace restando la media y dividiendo para la desviación estándar, con lo que se obtiene variables con media cero y desviación estándar uno [Casas Castillo, 2005]. Se utilizan dos métodos aglomerativos, UPGMA (unweighted pair group arithmetic averages) y Ward; utilizando como distancia entre conglomerados la euclídea.

Las variables a clasificarse son los eventos extremos determinados por cada estación. Una vez normalizada la matriz de eventos se procede a calcular la matriz de distancias utilizando la distancia euclídea,

$$d(a, b) = \sqrt{(x_{a,1} - x_{b,1})^2 + (x_{a,2} - x_{b,2})^2 + \dots + (x_{a,n} - x_{b,n})^2},$$

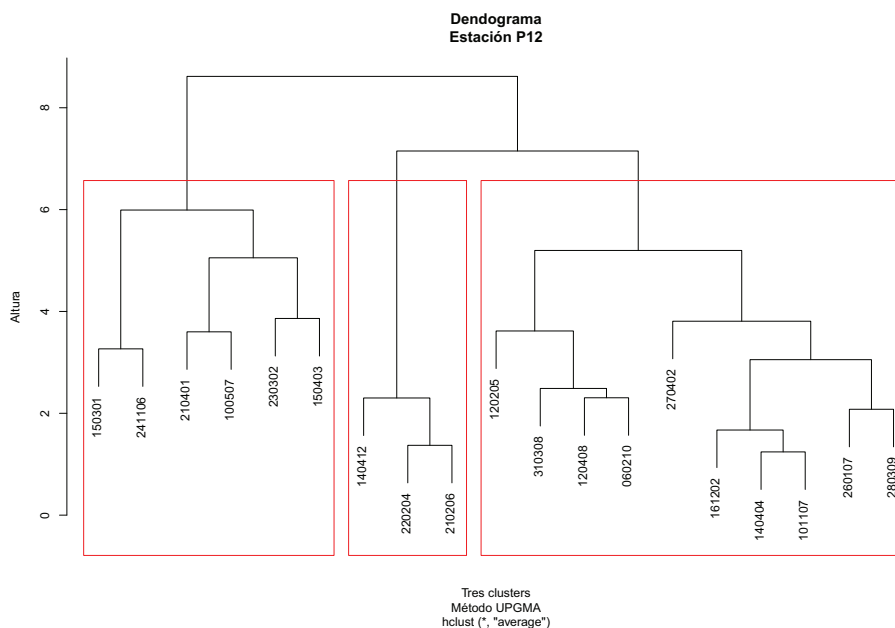
con  $a$  y  $b$  dos eventos extremos y  $x_{k,j}$  el valor de la precipitación acumulada en el tiempo  $j$  para el evento  $k$ . Al emplear un método aglomerativo se procede a formar clusters uniendo iterativamente eventos según el método utilizado.

### 3.1.1 MÉTODO UPGMA

Es un método aglomerativo jerárquico en el que se toma la distancia mínima, se utiliza la distancia euclídea. Se toma primero la distancia mínima entre elementos  $d_m = \min d(x, y)$  donde  $x$  e  $y$  son eventos extremos. Se calcula la profundidad de la rama (del dendograma), como  $\frac{1}{2} d_m$ . La distancia entre clusters se calcula como:

$$d(C_i, C_j) = \frac{1}{|C_i| \cdot |C_j|} \sum_{x_i \in C_i} \sum_{x_j \in C_j} d(x_i, x_j),$$

con esta distancia se genera una nueva matriz en la cual se busca una nueva distancia mínima, volviendo a repetir el ciclo.

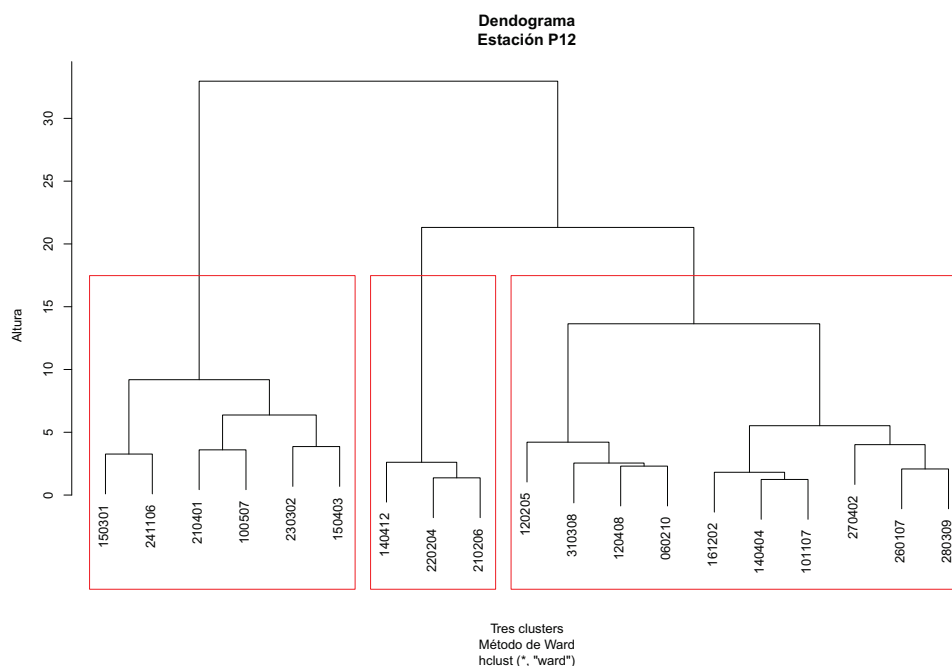


**Figura 3.3:** Dendrograma de la estación Toctiuco P12 utilizando el método UPGMA.  
Elaboración: Los autores.

### 3.1.2 MÉTODO DE WARD

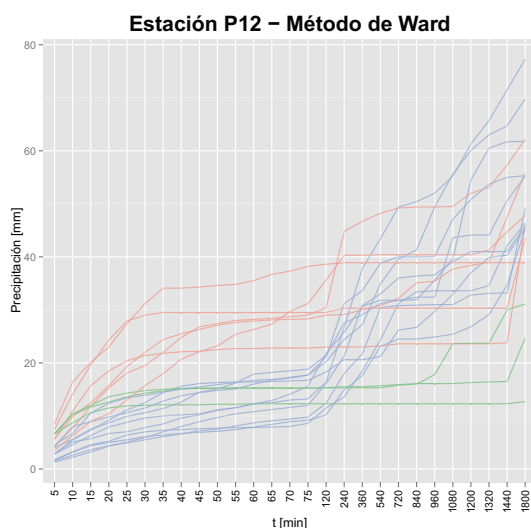
Es un método aglomerativo jerárquico en el que se minimiza la varianza para cada agrupamiento, utilizando la distancia euclídea. La distancia inicial para este método se calcula como la distancia euclídea al cuadrado. Para clusters disjuntos  $C_i$ ,  $C_j$  y  $C_k$  con tamaños  $n_i$ ,  $n_j$  y  $n_k$  respectivamente se calcula la distancia como:

$$d(C_i \cup C_j, C_k) = \frac{n_i + n_k}{n_i + n_j + n_k} d(C_i, C_k) + \frac{n_j + n_k}{n_i + n_j + n_k} d(C_j, C_k) - \frac{n_k}{n_i + n_j + n_k} d(C_i, C_j).$$

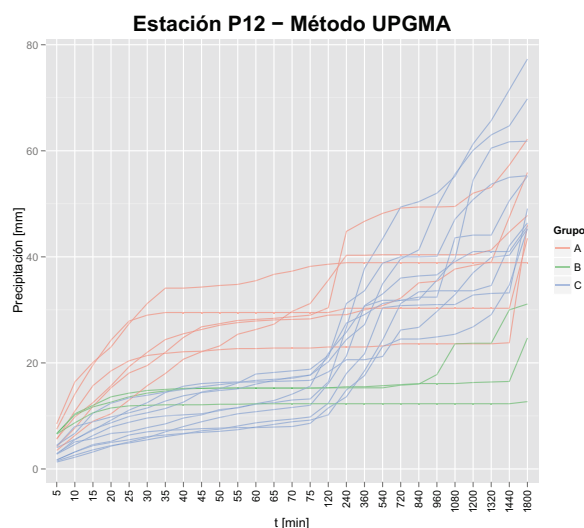


**Figura 3.4:** Dendrograma de la estación Toctiuco P12 utilizando el método de Ward.  
Elaboración: Los autores.

El dendrograma muestra el desarrollo del análisis de conglomerados, se puede apreciar de manera sencilla los clusters de datos y la forma de agrupamiento. Se encierra en recuadros rojos los clusters seleccionados. Se puede ver que para ambos métodos los dendogramas coinciden, aunque no conservan la misma profundidad debido a las diferentes formas de cálculo.



**Figura 3.5:** Eventos extremos en la estación Toctiuco P12 agrupadas en clusters mediante el método de Ward.  
Elaboración: Los autores.



**Figura 3.6:** Eventos extremos en la estación Toctiuco P12 agrupadas en clusters mediante el método UPGMA.  
Elaboración: Los autores.

Para ilustrar mejor el resultado de estos métodos se han generado imágenes de la cantidad de pre-

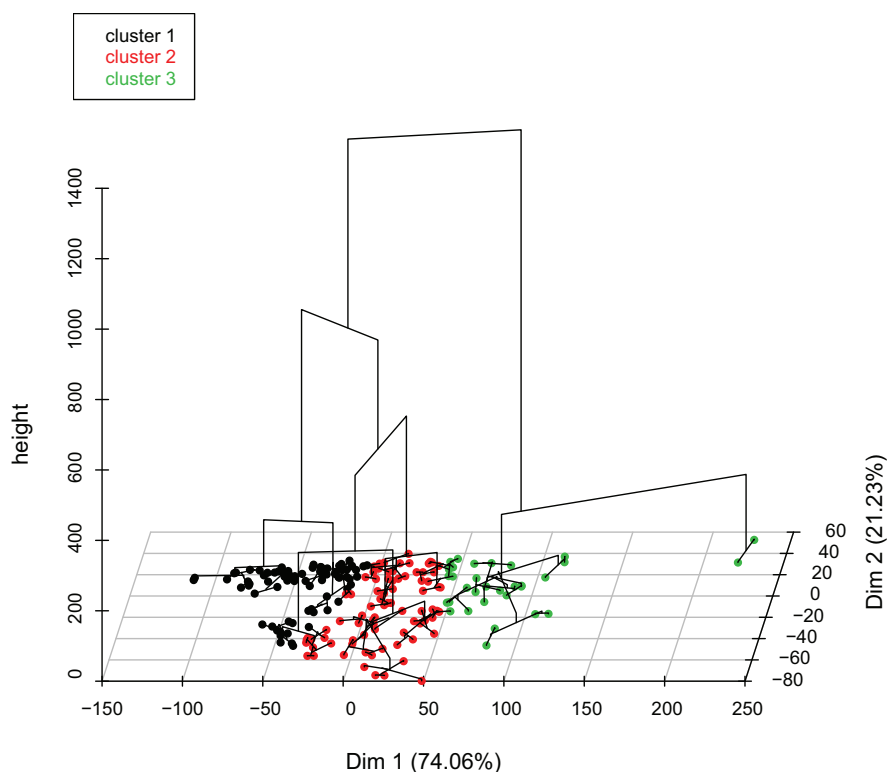
cipitación acumulada en cada intervalo de tiempo para todos los eventos extremos por estación y se ha marcado en colores el cluster al que pertenece cada episodio extremo según el método de clasificación. En las Figuras 3.5 y 3.6 se observa como el grupo B (en color verde) corresponde a lluvias de gran intensidad y corta duración, el grupo C (en color azul) contiene los eventos de larga duración y menor intensidad, mientras que en el grupo A (en color rojo) se encuentran los eventos que son una combinación de los anteriores. Nótese aquí que la clasificación mediante el método de Ward y el UPGMA coinciden, esto hace suponer que existe una *agrupación natural* de los eventos seleccionados en la estación. Este caso es común, aunque no sucede en todas las estaciones, se puede observar en estos casos que el método de Ward clasifica de una mejor manera los eventos pero sin que haya una diferencia significativa.

### 3.2 CLASIFICACIÓN OBJETIVA DE LAS ESTACIONES SELECCIONADAS

Para la clasificación de las estaciones seleccionadas se muestran únicamente los resultados obtenidos mediante el método de Ward y la distancia euclídea, esto debido a que del análisis anterior se verificó que existen pocas diferencias entre los métodos utilizados y que el método de Ward tiene un ligero mejor desempeño. Se construye una matriz con el total de eventos extremos con un identificador de estación y fecha. Mediante el programa R se normaliza los datos y se realiza un análisis HCPC<sup>1</sup> de donde se obtiene una clasificación en tres clusters para el total de los eventos.

---

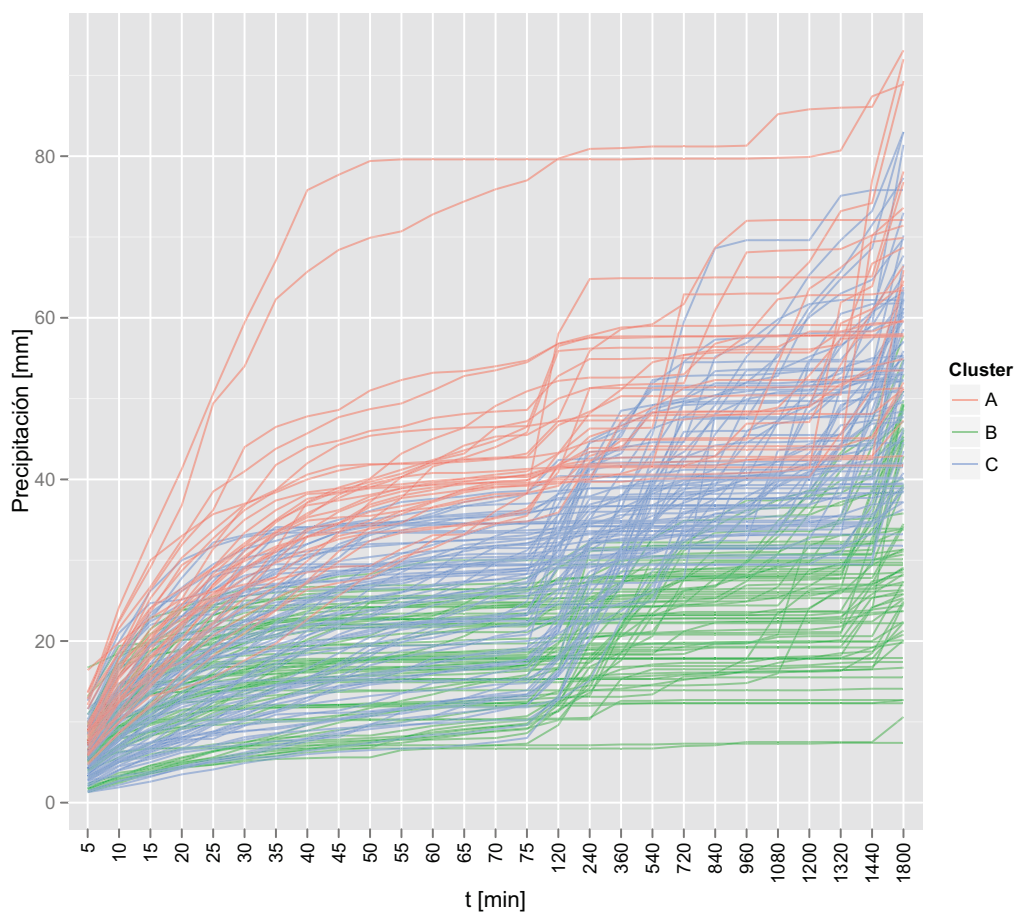
<sup>1</sup>Función para Análisis de clusters con Componentes Principales disponible en el software R, perteneciente al paquete FactoMineR.



**Figura 3.7:** HCPC para todos los eventos extremos con el árbol de clasificación. Se omiten los nombres de los valores para mejorar la visualización.

Elaboración: Los autores.

Se puede notar aquí dos eventos en particular que salen del comportamiento normal (los puntos verdes hacia la derecha), los cuales pertenecen a dos eventos registrados por la estación DAC Aeropuerto P10. Se comprobó que estos eventos en realidad fueron aguaceros muy fuertes (de carácter convectivo), ver [El Universo, 2002] y [El Universo, 2005]. Se debe notar también en el gráfico que en los valores 75 y 1440 existe una variación brusca de las curvas, esto se debe a que la escala temporal aumenta de manera significativa en tales períodos. El tomar la escala temporal utilizada permite lograr una mejor cobertura de los eventos sin aumentar considerablemente la cantidad de información analizada, estos saltos no representan problema dentro del estudio.



**Figura 3.8:** Clasificación objetiva en tres clusters de los eventos extremos encontrados en las estaciones analizadas.

Elaboración: Los autores.

Se define una matriz de estaciones en la que se consideran los valores de: este, norte, altura y el porcentaje de eventos extremos de cada tipo encontrados en el análisis anterior. Esta clasificación generaliza la realizada en cada estación, ya que reescala los eventos en el conjunto completo de las estaciones analizadas. Se toma en cuenta tanto la posición geográfica como el aporte de cada uno de los tipos de eventos extremos determinados en el presente estudio.

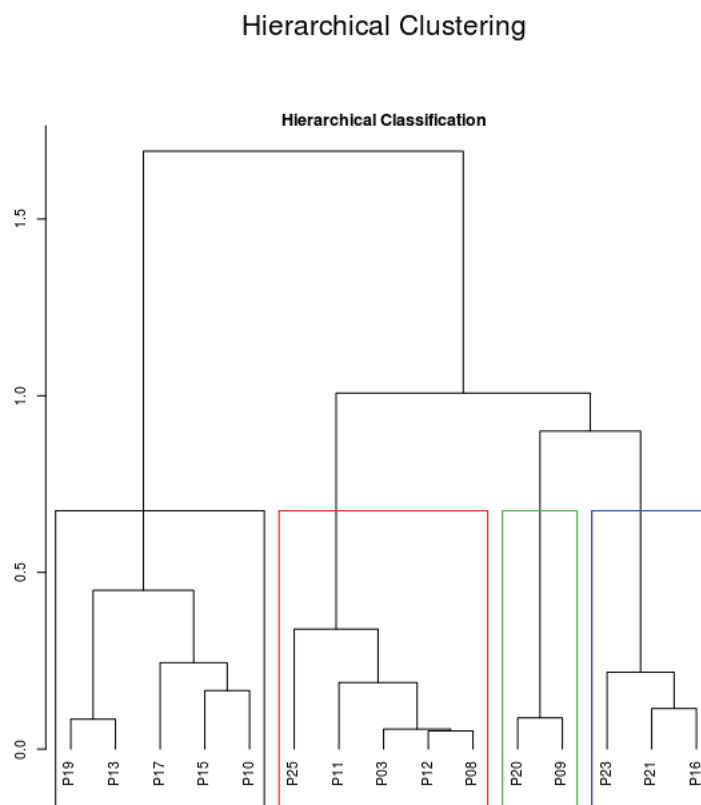
Nombre	Cód. EPMAFS	Este	Norte	Altura (msnm)	A (%)	B (%)	C (%)
Rumihurco	P03	774550	9985125	3575	9.1	36.4	54.5
Rumipamba	P08	776350	9980525	3200	15.4	23.1	61.5
Iñaquito	P09	779850	9980750	2789	8.3	66.7	25.0
DAC Aerop.	P10	779725	9983925	2794	40.0	13.3	46.7
Antenas	P11	775860	9982013	3760	5.3	57.9	36.8
Toctiuco	P12	775485	9977570	3225	0.0	42.1	57.9
Cumbayá	P13	786325	9976750	2360	26.7	20.0	53.3
El Cinto	P15	770750	9972900	3200	50.0	16.7	33.3
Izobamba	P16	772390	9959890	3060	18.2	45.5	36.4
El Tingo	P17	785000	9968000	2440	55.6	0.0	44.4
La Tola	P19	792960	9974720	2500	23.1	38.5	38.5
Calderón	P20	785900	9991825	2765	0.0	76.9	23.1
Chillogallo	P21	768981	9969599	3203	18.2	63.6	18.2
Atacazo	P23	767195	9965170	3865	0.0	77.8	22.2
El Troje	P25	775910	9963490	3145	16.7	16.7	66.7

**Cuadro 3.2:** Clasificación de las estaciones.

Elaboración: Los autores.

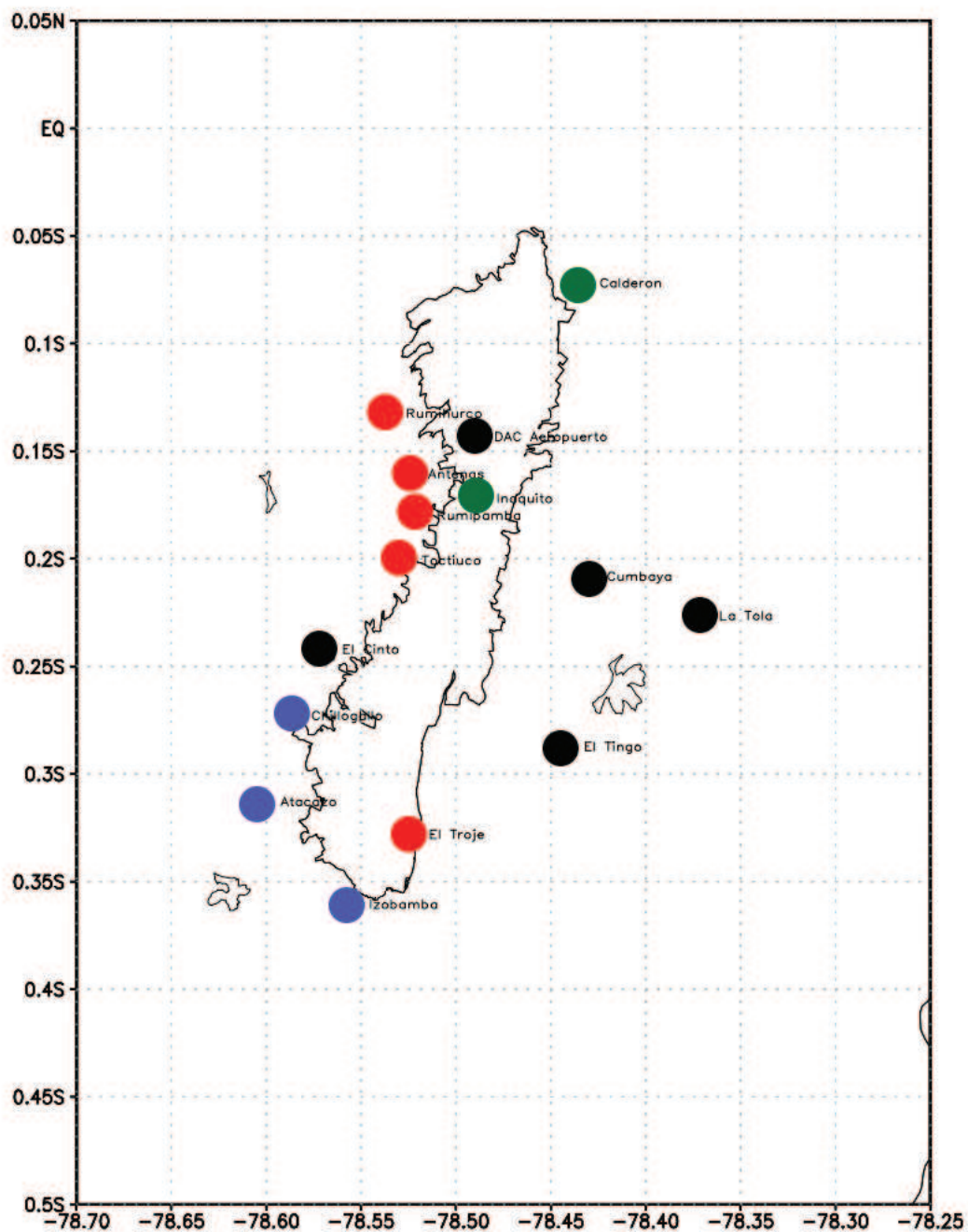
A partir de esta matriz se procede a realizar un análisis HCPC para determinar el agrupamiento entre las estaciones. Se utiliza un agrupamiento óptimo de clusters determinado por el algoritmo HCPC [R Development Core Team, 2007], se verifica la optimalidad del número de clusters realizando pruebas con diferentes valores. A continuación se muestra el dendograma para el total de las estaciones.





**Figura 3.9:** Dendrograma utilizando HCPC para las estaciones seleccionadas.  
Elaboración: Los autores.

El cluster rojo contiene las estaciones ubicadas en las laderas del Pichincha que tienen un comportamiento similar en cuanto a eventos extremos debido a su cercanía, la estación El Troje está anexa a este cluster porque presenta un comportamiento similar y está situada a una altura parecida a la del resto de elementos del grupo. El cluster negro está formado por las estaciones que se encuentran en los valles de la ciudad de Quito, se encuentran también las estaciones El Cinto y DAC-Aeropuerto que presentan un comportamiento parecido en cuanto a los eventos contabilizados. El cluster azul agrupa las estaciones del sur de la ciudad que comparten cercanía geográfica así como un comportamiento parecido en eventos extremos. Por último, el cluster verde formado por las estaciones Iñaquito y Calderón presentan una altura similar y un comportamiento parecido en cuanto a los eventos extremos registrados. Se puede observar en la Figura 3.10 la ubicación espacial de las estaciones y el cluster al que pertenecen en color.



**Figura 3.10:** Ubicación espacial de los clusters.  
Elaboración: Los autores.

*“The essential element in the black art of obscurantism is not that it wants to darken individual understanding but that it wants to blacken our picture of the world, and darken our idea of existence”*

Friedrich Nietzsche, Human, All Too Human

# 4

## INTERPOLACIÓN ESPACIAL DE SERIES CLIMATOLÓGICAS EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

El poseer una base de datos climatológica completa y consistente ha sido una dificultad para el tratamiento de series climatológicas desde que se comenzaron a recolectar datos relacionados con la atmósfera. Esto debido a muchos inconvenientes propios del tiempo atmosférico, el tener que recolectar datos en condiciones climáticas adversas como lluvias torrenciales, sequías, fuertes vientos y temperaturas extremas es siempre un problema para la precisión y la fiabilidad de los sensores meteorológicos. La falta de una correcta depuración tanto *in situ* como posterior a la recolección de los datos crea complicaciones que son difíciles de resolver tiempo después. Tanto las lagunas en la información como los datos erróneos generan contratiempos en posteriores análisis de patrones climáticos.

Se ha evidenciado en este trabajo el mal tratamiento del parámetro precipitación en varios registros climatológicos. Se debe tener en cuenta que dicho parámetro tiene un carácter de “eventos” o estados, es decir, se puede o no tener precipitación en el sitio de la medición, pero la falta de datos no debe ser equivalente a la ausencia de un suceso. Se debe diferenciar claramente la falta de datos (por ejemplo debido a una falla del sistema de recolección automático de información) de la ausencia de un evento.

Un problema presente en la base de datos utilizada fue que la diferenciación entre “ausencia de precipitación” y “falta de datos”, no se encontraba completamente clara. Por esta razón se decidió omitir las posibles lagunas de información rellenando todos los datos faltantes de la serie con el valor *cero*, esto provoca la probable exclusión de posibles eventos extremos, los cuales tampoco hubiesen podido ser analizados en forma correcta al contar con las lagunas determinadas en la serie. Por esta razón el rellenar la serie de precipitación con el valor *cero* no provoca inconvenientes en el presente trabajo (ver más en el Anexo B.2).

En general no es una buena idea el rellenar los valores de una serie de precipitación, esto debido a que la serie no sigue ningún patrón de comportamiento. Se puede intentar realizar un relleno basándose en datos de estaciones contiguas, siempre y cuando se cuente con una buena densidad de estaciones y se estudie minuciosamente el aporte de cada una al valor a rellenarse. Debido a la baja densidad de estaciones en el DMQ y a la heterogeneidad de los eventos que se presentan a lo largo de la ciudad el correcto relleno de valores faltantes en las series es una tarea muy complicada.

#### 4.1 INTERPOLACIÓN ESPACIAL - ANÁLISIS OBJETIVO

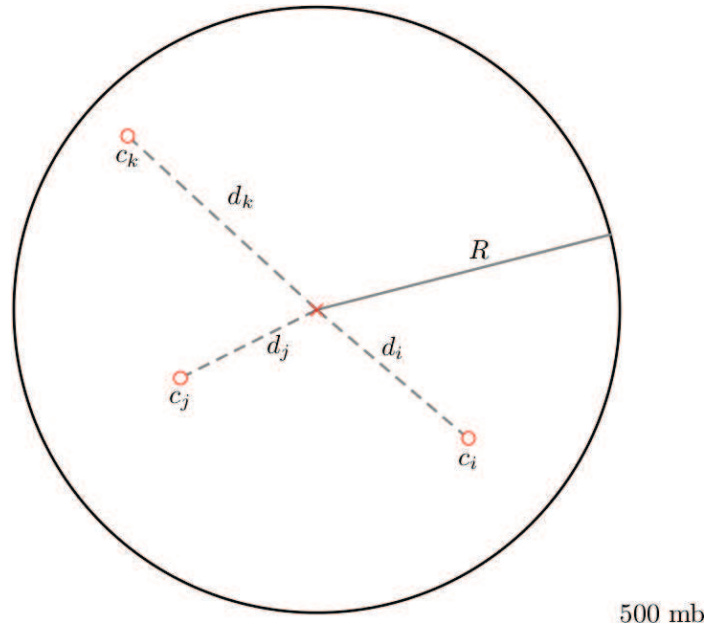
La estimación de parámetros meteorológicos en una malla regular se tornó en una necesidad cuando se volvieron realidad los pronósticos numéricos del tiempo realizados por computador. Debido a que los modelos numéricos de predicción almacenan información de la atmósfera en una malla regular, estos no pueden calcular un pronóstico hasta que las condiciones iniciales sean provistas en una malla regular. Todos los métodos involucran un *Análisis objetivo* de las observaciones, hasta los métodos más avanzados de asimilación de datos cuatro-dimensional [UCAR, 2012].

#### 4.2 MÉTODO DE CRESSMAN

Es un método empírico de interpolación lineal fácil de entender y que no demanda de un gran poder de cómputo. Una de sus principales ventajas es que se encuentra integrado en el programa GrADS, lo cual facilita enormemente el uso y la implementación en los análisis realizados en este trabajo. Este método es ampliamente utilizado en el campo de la meteorología así como de la climatología, es por esto que se encuentra ya programado como único método de interpolación en GrADS.

El esquema del método de Cressman inicia con una variable de fondo (“background field”) en este caso de un modelo numérico de pronóstico del tiempo  $F(i, j)$ . El valor de fondo en cada punto de malla es sucesivamente ajustado en base a las observaciones cercanas en una serie de escaneos (usualmente de cuatro a seis) de los datos. El radio de influencia  $R$  (el tamaño del círculo que contiene las observaciones que influyen sobre la corrección) se reduce en cada escaneo para concentrar la

información de observaciones más relevante para el punto de malla analizado [UCAR, 2012].



**Figura 4.1:** Representación de la vecindad del análisis Cressman.  $R$  es el radio de influencia. Se visualizan 3 estaciones en el vecindario del punto de la malla (centro) [UCAR, 2012].

Se calcula la diferencia entre el valor medio observado  $O_s$  y el valor de la primera aproximación  $F(i, j)$ ,

$$Q_s = F(i, j) - O_s.$$

La corrección total al valor de fondo en un escaneo en el punto  $(i, j)$  es una combinación lineal de los residuos y está dada por:

$$C(i, j) = \frac{\sum_{s=1}^n W_s Q_s}{\sum_{s=1}^n W_s},$$

donde

$$W_s = \frac{R^2 - d_s^2}{R^2 + d_s^2} \quad \text{si} \quad d_s^2 \leq R^2,$$

y

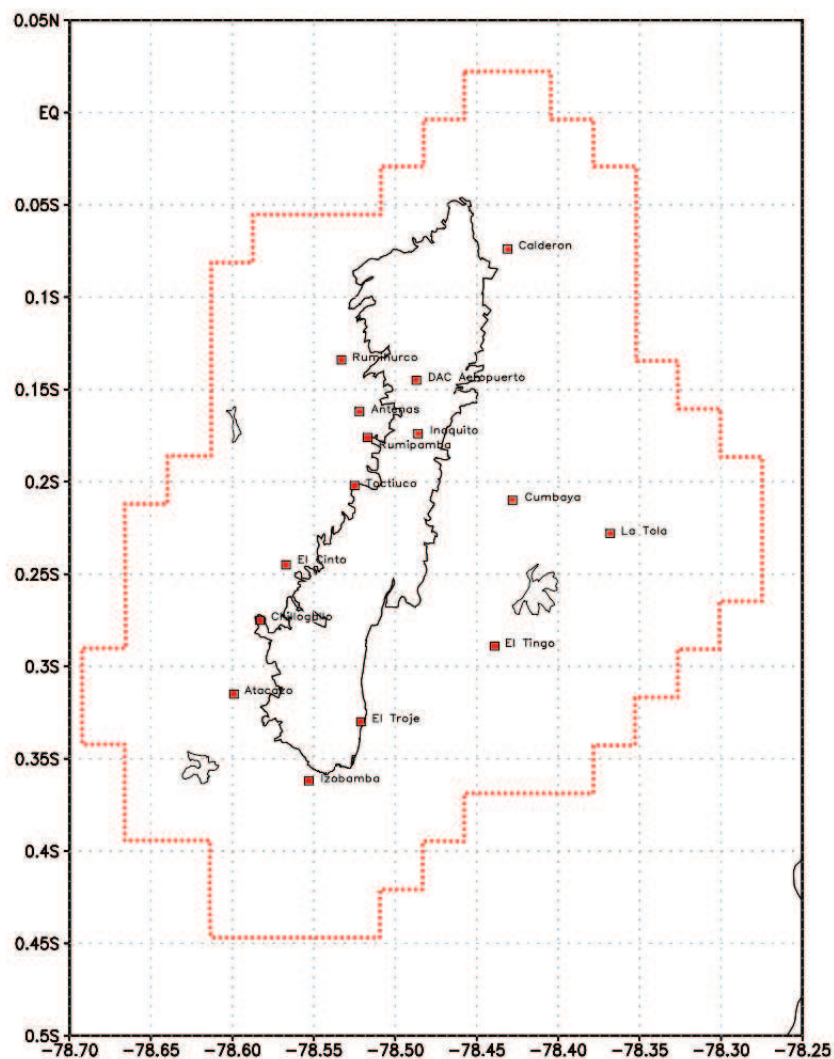
$$W_s = 0 \quad \text{si} \quad d_s^2 > R^2.$$

Con  $d_s$  la distancia entre la observación y el punto de malla. Entonces el valor en cada punto de malla analizado será:

$$G(i, j) = F(i, j) + C(i, j).$$

Para cada episodio determinado como evento extremo se procede a obtener sumas de precipitación en intervalos de tres horas, esto para tener concordancia con las salidas del modelo numérico

WRF. Se utilizan datos tanto de un día previo como de uno posterior al evento, esto para ampliar el rango de cobertura temporal y permitir al modelo relajar las condiciones en la simulación. Cada evento se compone de veinte episodios que cubren los tres días de simulación.

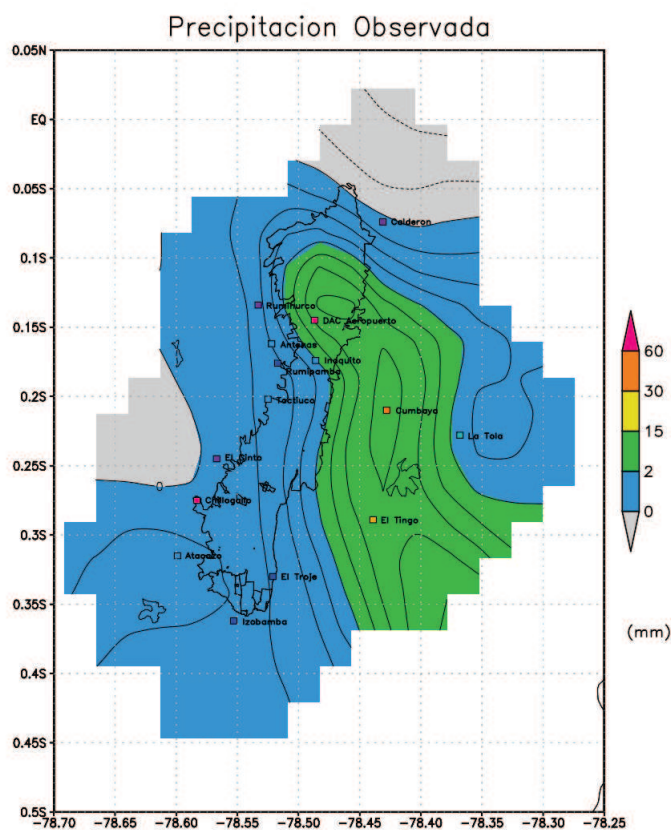


**Figura 4.2:** Cobertura espacial máxima para el relleno mediante el esquema de Cressman. Elaboración: Los autores.

Se extrae entonces de la base de datos las sumas cada tres horas del total de estaciones utilizadas y se las almacena en un archivo de texto individual por episodio y período. Estos archivos deben ser transformados en formato binario mediante un programa en Fortran para generar luego los archivos descriptores que permiten al programa GrADS asimilar la información de estaciones. Con esta información ingresada el programa GrADS realiza la interpolación de la información mediante el esquema de Cressman.

Dentro del programa GrADS y utilizando diferentes radios de acción se obtiene la cobertura máxima que se puede lograr con las estaciones seleccionadas, como se puede ver en la Figura 4.2. Hay que tomar en cuenta que debido a la incertidumbre en la validez de los datos nulos hay episodios en los que el relleno de la información contiene valores que no son válidos, este problema no se puede solventar sin realizar un estudio más profundo encontrando los valores faltantes en las series que se deben contrastar con la información original proporcionada por los sensores.

Se colocan puntos con las ubicaciones de las estaciones interpoladas y mapas en formato *shp* que permiten una mejor interpretación del mapa de relleno. Con este resultado en formato espacial se puede comparar directamente el reanálisis producido por el modelo WRF con el relleno, para esto se resta los dos campos con el programa GrADS y se observa los sectores en los que se produce una subestimación o una sobrestimación de la precipitación por parte del modelo WRF en el episodio analizado.



**Figura 4.3:** Relleno espacial mediante el esquema de Cressman.  
Elaboración: Los autores.



*“One must do not violence to nature, nor model it in conformity to any blindly formed chimaera.”*

Janos Bolyai

# 5

## SIMULACIÓN NUMÉRICA DE EVENTOS EXTREMOS MEDIANTE EL MODELO DE MESOESCALA WRF

Dentro de este capítulo se detalla el uso del modelo numérico de mesoescala WRF (Weather Research and Forecasting Model) para realizar simulaciones de los eventos extremos encontrados en este trabajo. Los resultados de las simulaciones se muestran en el siguiente capítulo.

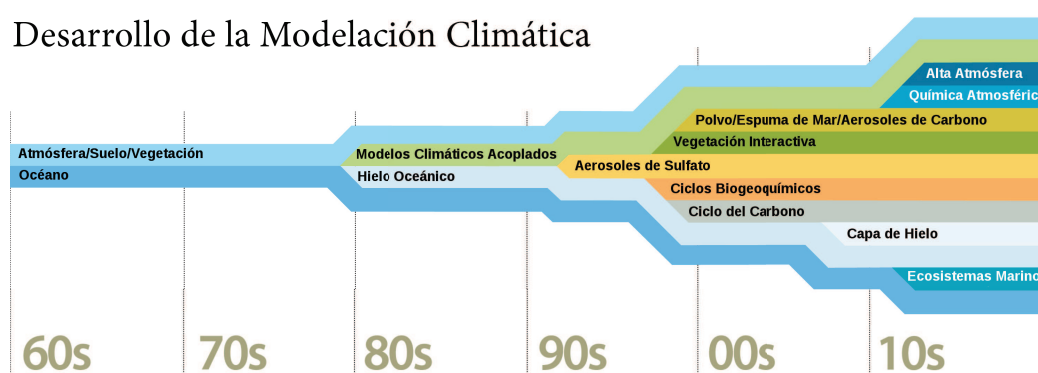
### 5.1 MODELOS NUMÉRICOS DE SIMULACIÓN ATMOSFÉRICA

La predicción numérica del tiempo se lleva a cabo a partir de un modelo matemático formulado por ecuaciones en derivadas parciales, las cuales traducen las leyes generales de la física que rigen la atmósfera terrestre [Lezaun Iturralde, 2003]. Existen modelos climáticos de corto, mediano y largo plazo según su escala temporal. Para pronósticos operativos se utilizan modelos de corto plazo, con tiempos de predicción de 24 hasta 168 horas. Los modelos de largo plazo (aplicados en su mayoría al análisis de cambio climático) se utilizan para analizar cambios en el clima atribuidos a fenómenos de larga duración y de mayor escala.

Los modelos atmosféricos han evolucionado para incorporar cada vez más variables y procesos físicos a la resolución de sus ecuaciones según su resolución espacial y temporal, como se puede



ver en la Figura 5.1. En el Ecuador se puede notar claramente la necesidad de utilizar un modelo de predicción numérica del tiempo a una alta resolución, esto debido a que el país cuenta con una alta complejidad del terreno. Los microclimas son propios de la mayoría de sectores dentro del callejón interandino. El aspecto que peor pronostican todos los modelos de predicción numérica del tiempo es la precipitación [COMET, 2012], es por esto que representa un reto para la comunidad científica el avanzar en el desarrollo de los modelos numéricos para lograr una mejor comprensión de los procesos atmosféricos locales.

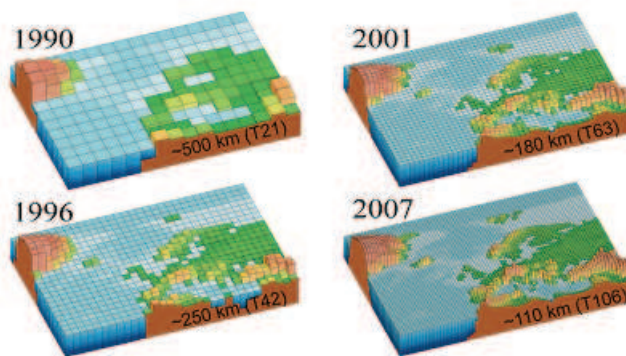


**Figura 5.1:** Incorporación de variables y procesos físicos [UCAR, 2012].

La cantidad de fenómenos que se pueden representar dependerá de la resolución del modelo numérico de la atmósfera utilizado. En regiones accidentadas, donde los procesos atmosféricos son dominados por características de mesoescala, un modelo atmosférico global ofrecerá muy pocas ventajas frente a uno de mayor resolución en la calidad de la simulación [COMET, 2012]. Al representar de una manera más exacta la topografía del terreno se pueden simular las características propias de la atmósfera en áreas geográficamente complejas como el DMQ. Como se requiere de varios puntos de malla para representar una característica atmosférica, es importante utilizar la máxima resolución si no se quiere perder dichas características.

Los modelos atmosféricos de mesoescala se inicializan utilizando condiciones de borde proporcionadas por un modelo con una resolución menor, habitualmente un modelo global. Se debe dejar en el modelo a simularse un área de “amortiguación”, esto para evitar los problemas que surgen en los bordes del dominio que se va a simular. Es también conveniente iniciar la simulación con antelación al evento, esto para permitir al modelo estabilizarse en los movimientos de masas y lograr un mejor acople entre los datos de inicialización y la simulación.

La resolución vertical debe mantener coherencia con la resolución horizontal en los modelos atmosféricos. Existen varios tipos de coordenadas verticales como altura o presión, sin embargo las que mejores resultados ofrecen son las coordenadas sigma ( $\sigma$ ). En un sistema de coordenadas sig-



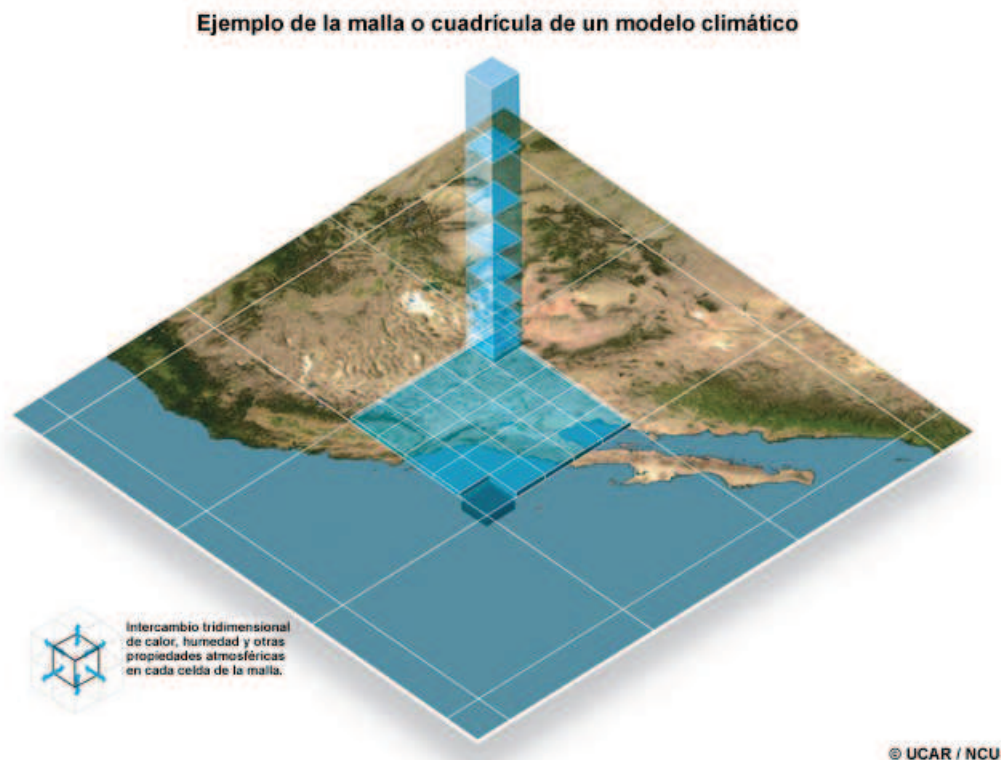
**Figura 5.2:** Evolución de la resolución espacial en los modelos atmosféricos [UCAR, 2012].

ma, los niveles superior e inferior se definen como los niveles en los cuales los movimientos verticales son insignificantes. El nivel inferior está cerca de la superficie terrestre ( $\sigma = 1.0$ ) y el nivel superior se establece en un valor de presión muy bajo, para el cual se supone que el movimiento vertical sea insignificante ( $\sigma = 0.0$ ). Por lo tanto, cerca de la superficie los niveles sigma siguen el terreno muy de cerca, mientras que en altura los niveles con valores sigma bajos tienden a “nivelarse”, volviéndose casi horizontales [COMET, 2012]. Las coordenadas sigma evitan las complicaciones que surgen en terrenos accidentados donde un nivel de presión “atravesaría” una montaña complicando el análisis.

La mayoría de los modelos de mesoescala son hidrostáticos, puesto que presuponen la existencia de un equilibrio hidrostático, es decir, que el peso de la atmósfera, que ejerce presión hacia abajo, está en equilibrio con la fuerza del gradiente de presión, que empuja hacia arriba. El modelo WRF utilizado en este estudio es un modelo no hidrostático, esto presenta algunas ventajas sobre otros modelos debido entre otras cosas a que los procesos no hidrostáticos y sus efectos adquieren importancia cuando la longitud de una característica es aproximadamente igual a su altura [COMET, 2012].

## 5.2 MODELO DE SIMULACIÓN ATMOSFÉRICA WRF

El Modelo WRF (Weather Research and Forecasting Model), es un sistema de predicción numérica mesoescalar del clima diseñado para servir tanto a la predicción operativa como a las necesidades de la investigación atmosférica. Es un modelo de nueva generación que cuenta con múltiples núcleos dinámicos, un sistema de asimilación de datos variacional 3-dimensional (3DVAR) y una arquitectura de software que permite el trabajo en paralelo y la ampliación del sistema. WRF es adecuado para un amplio espectro de aplicaciones a través de escalas que van desde algunos metros hasta miles de kilómetros [Developmental Testbed Center, 2012]. En el Anexo A se describe el proceso de instalación, procesamiento de datos y manejo de la información climática utilizando el modelo WRF.



**Figura 5.3:** Resolución vertical y horizontal de un modelo atmosférico [COMET, 2012].

El esfuerzo para desarrollar WRF ha sido colaborativo, principalmente por el National Center for Atmospheric Research (NCAR), el National Oceanic and Atmospheric Administration (el National Centers for Environmental Prediction (NCEP) y el Forecast Systems Laboratory (FSL), la Air Force Weather Agency (AFWA), el Naval Research Laboratory, la Universidad de Oklahoma, y la Federal Aviation Administration (FAA). WRF permite a los investigadores tener la capacidad de realizar simulaciones que reflejan tanto los datos reales como las configuraciones ideales de la atmósfera. WRF ofrece la predicción operativa de un modelo que es flexible y eficiente computacionalmente, ofreciendo al mismo tiempo los avances en física, métodos numéricos, y la asimilación de los datos aportados por la comunidad científica [Developmental Testbed Center, 2012].

WRF tiene una creciente comunidad de usuarios, y los talleres y tutorías se llevan a cabo cada año en el NCAR. WRF se encuentra actualmente en uso operacional en el NCEP, AFWA y otros centros. Estos sitios ofrecen información sobre el esfuerzo en el modelo WRF y su organización, las referencias a los proyectos y la previsión que involucran al WRF, así como enlaces a la página de usuarios de WRF, aplicaciones en tiempo real, y todos los eventos relacionados con el modelo WRF [Developmental Testbed Center, 2012].

Para calcular un pronóstico del tiempo, el modelo de simulación atmosférica WRF realiza un *downscaling dinámico* del estado atmosférico calculado por el modelo de simulación de escala global GFS (Global Forecasting System) desarrollado por la NOAA. El *downscaling* es un método me-

diante el cual se obtiene información climática en alta resolución espacial desde un dominio con una resolución espacial menor utilizando métodos dinámicos para generar los nuevos datos. El modelo WRF realiza dicho *downscaling dinámico* del modelo GFS que tiene una resolución espacial de 0.5 grados a escalas de hasta aproximadamente 1 minuto. El modelo WRF utiliza como condiciones de frontera los resultados de la simulación del modelo global así como las características locales del dominio para realizar la simulación numérica del tiempo.



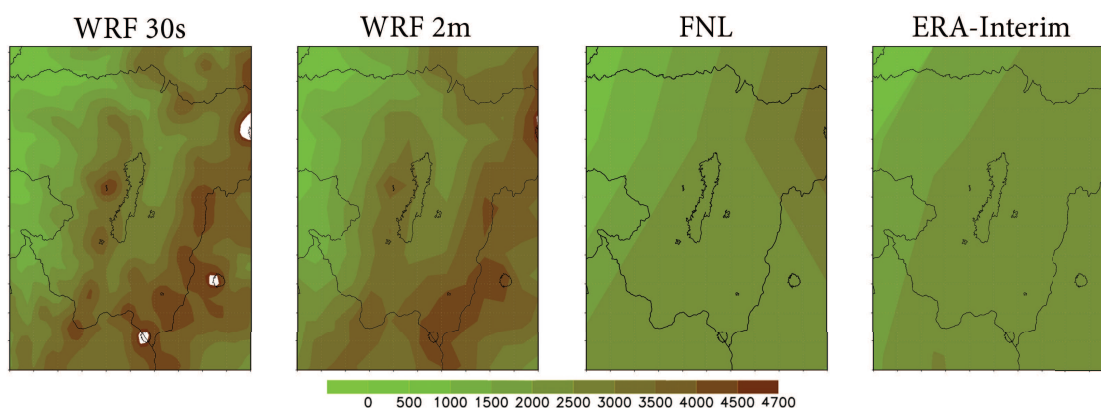
**Figura 5.4:** Parametrizaciones físicas en un modelo de simulación atmosférica [COMET, 2012].

Las principales características del modelo WRF se describen en [Skamarock WC et al, 2008], se puede destacar entre estas la coordenada vertical (coordenada  $\sigma$ ) que sigue el relieve del terreno, una grilla horizontal escalonada del tipo Arakawa C así como el esquema de Runge-Kutta de 2do o 3er orden con capacidad de utilizar un paso temporal variable. En la parte física, el modelo cuenta con varias opciones en microfísica así como en capacidades para modelar la interacción entre la superficie terrestre y la atmósfera; estos esquemas incluyen vegetación, cobertura de nieve, hielo, lagos entre otros. Se incluye también el esquema de la capa límite planetaria, varias parametrizaciones para flujos a nivel mesoescalar y la física de la radiación en la atmósfera.

En la Figura 5.4 se observan a modo de ejemplo algunas de las opciones físicas que se consideran en un modelo atmosférico de mesoescala. Se debe considerar también que se analizan las interacciones entre estas, lo cual produce una cantidad elevada de cálculos que deben realizarse en cada nodo para completar la simulación.

### 5.3 DATOS PARA EL REANÁLISIS ATMOSFÉRICO

Actualmente los modelos numéricos de predicción del tiempo han llevado al desarrollo de un creciente número de climatologías [Soares, 2012]. Para realizar un reanálisis del estado de la atmósfera se necesita de las condiciones de frontera apropiadas para inicializar el modelo WRF, las cuales vienen de modelos de reanálisis a escala global. Se eligieron dos modelos globales en el presente estudio, el modelo norteamericano FNL y el modelo europeo ERA-Interim. El modelo FNL es un modelo de carácter operacional, mientras que el modelo ERA-Interim es una climatología global.



**Figura 5.5:** Comparación de la resolución espacial sobre el DMQ de las climatologías utilizadas así como la del modelo WRF en dos resoluciones distintas. Se puede notar el alto detalle geográfico que utiliza el modelo WRF en comparación a los modelos globales.

Elaboración: Los autores.

Luego de descargar los datos correspondientes a las fechas en las que se desea realizar el reanálisis de un determinado evento, se procede a ejecutar un archivo shell (script Linux) dedicado a controlar los procesos necesarios para la ejecución del modelo WRF. Se enlazan tanto los archivos de datos como las tablas de decodificación espacial de los mismos. Se eligen también los parámetros físicos más adecuados para el evento y la ventana de tiempo que se quiere simular. La salida resultante de este proceso nos permite tanto visualizar gráficamente el evento como realizar análisis de interpolación y de errores.

Se utiliza en el reanálisis dos cualidades de los datos a procesarse para mejorar las salidas del modelo con respecto a las de carácter operacional. Primero se utiliza un menor valor de presión como tope atmosférico, permitiendo así al modelo representar mejor los fenómenos atmosféricos en altura. Se realizan también paradas manuales del modelo haciendo un reinicio en la ejecución al llegar a la fecha del evento, con esto se puede cambiar el registro temporal (la frecuencia con la cual el modelo escribe el estado atmosférico en el archivo de salida) lo que permite simular de una mejor manera el evento sin aumentar de manera considerable el tamaño en disco de las salidas del modelo WRF.



### 5.3.1 FNL

Los datos FNL (Final Operational Global Analysis) generados por el NCEP se preparan de manera operacional en una malla de  $1.0 \times 1.0$  grados cada 6 horas. Estos se generan con el mismo modelo utilizado por el “Global Forecasting System” (GFS) retrasado temporalmente para poder asimilar la mayor cantidad de datos demorados [CISL, 2012].

### 5.3.2 ERA-INTERIM

ERA-Interim fue planeado originalmente como un reanálisis parcial en preparación para el reanálisis extendido de nueva generación que reemplazaría al ERA-40. Utiliza la versión IFS Cy31r2 del Modelo de Pronóstico Integrado del ECMWF. Cubría originalmente desde el 1 de enero de 1989, pero se añadió una década adicional desde el 1 de enero de 1979. Se continúa produciendo el reanálisis a tiempo real. La resolución espectral es T255 (aproximadamente 80 km) con 60 niveles verticales, la altura máxima de la simulación está en 0.1 hPa (aproximadamente 64 km). La asimilación de datos está basada en un análisis variacional de cuatro dimensiones cada 12 horas (4D-Var) con estimación adaptiva de tendencias en la información de radiación medida por satélite (VarBC). Con algunas excepciones ERA-Interim utiliza las observaciones preparadas para el ERA-40 hasta el año 2002, y datos operacionales del ECMWF en años posteriores [Reanalyses.org, 2012].

*“When you can measure what you are talking about and express it in numbers, you know something about it.”*

Lord William Thomson Kelvin

# 6

## RESULTADOS

En el presente capítulo se analiza tres eventos extremos que por sus características representan los tres tipos de precipitación presentadas en este estudio, como son: sistemas convectivos, sistemas nubosos de escala sinóptica y una combinación de sistemas convectivos y sinópticos. También se analizan dos eventos extremos que superaron ampliamente el comportamiento de todo el conjunto de eventos. Los tres primeros eventos pertenecen a la estación modelo Toctiuco P12 y los dos restantes a la estación DAC-Aeropuerto P10.

Los resultados de este análisis se muestran en el siguiente formato:

- *Breve descripción del evento*
- *Hietograma:* Gráfico que muestra la cantidad de precipitación en escala temporal (cada 5 minutos).
- *Figura superior izquierda:* Gráfico espacial de la precipitación para el período indicado, generado por el modelo WRF y el conjunto de datos de reanálisis que se especifique (FNL o ERA).
- *Figura superior derecha:* Relleno espacial de la precipitación mediante el método de Cressman, con datos de la red de estaciones pluviométricas.
- *Figura inferior izquierda:* Comparación entre el análisis del modelo WRF (FNL o ERA) y el relleno espacial.

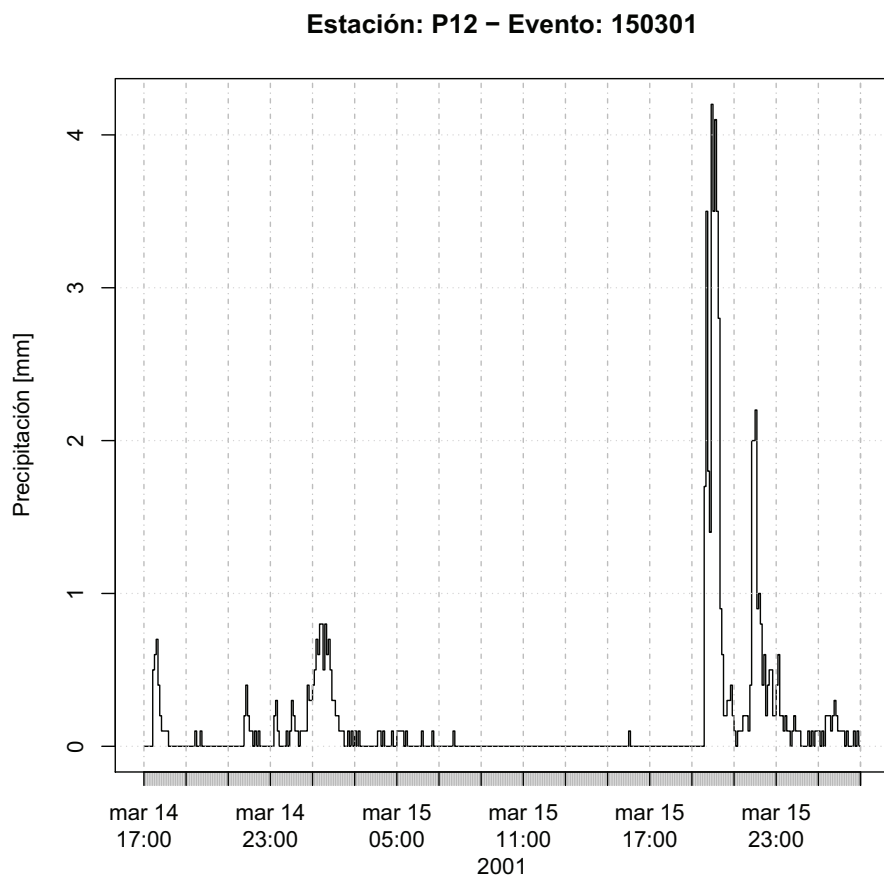
- *Figura inferior derecha:* Comparación de la ubicación y cantidad de precipitación en una escala ampliada entre el análisis del modelo WRF (FNL o ERA) y el relleno espacial.
- *Análisis del evento*

Se analiza un período significativo del evento (con una duración de tres horas) dentro de la cobertura temporal de la simulación y del relleno espacial. Los gráficos cuentan con una barra al lado izquierdo que muestra la equivalencia de la escala de colores representada. En la figura *inferior derecha* la barra de colores ampliada se encuentra en la parte inferior. Las unidades en todas las imágenes son milímetros.



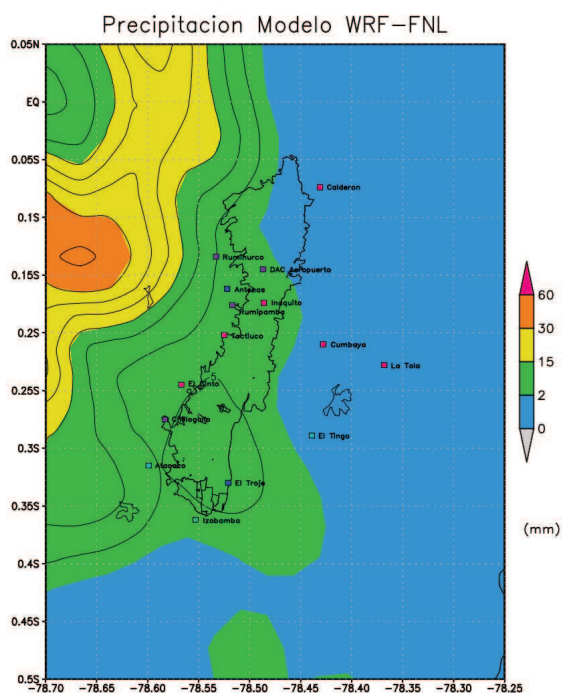
**EVENTO: 15 DE MARZO DE 2001 (ESTACIÓN TOCTIUCO P12)**

El 15 de marzo de 2001 se presentó un evento catalogado como una combinación de sistemas convectivos y sinópticos, clasificado como extremo en la estación Toctiuco.

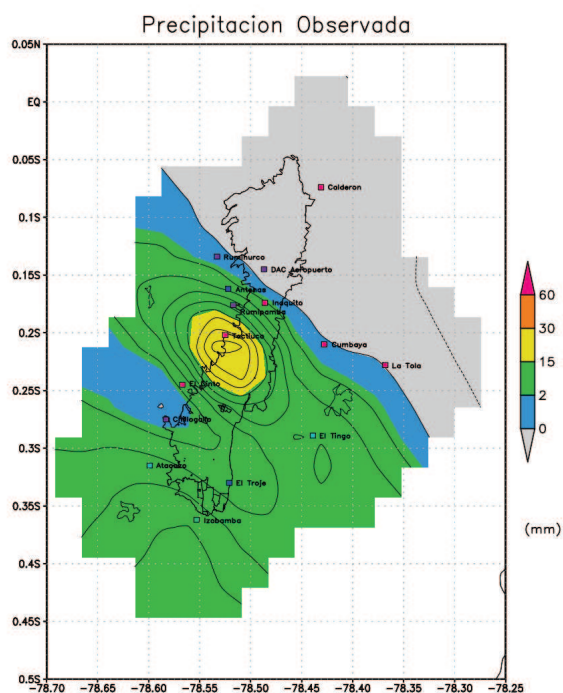


**Figura 6.1:** Hietograma del evento del 15 de marzo de 2001.

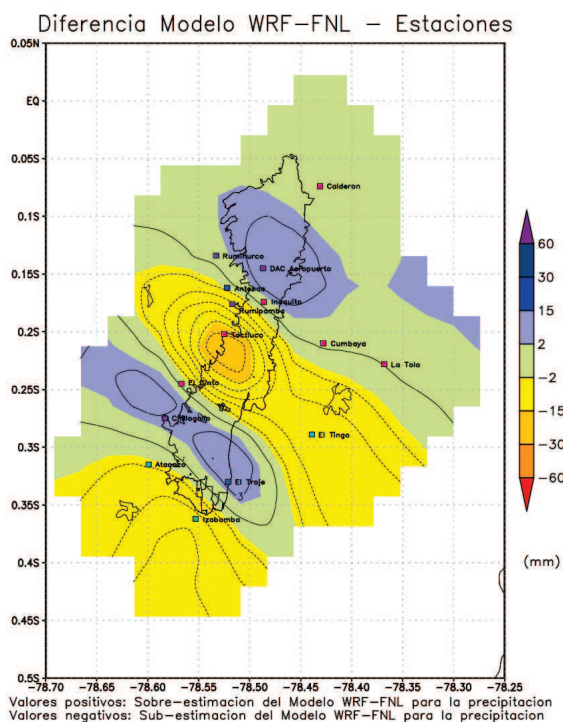
Elaboración: Los autores.



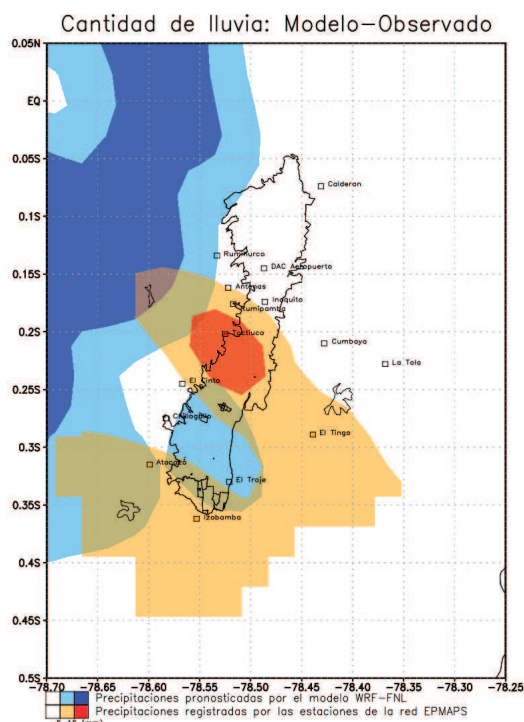
**Figura 6.2:** Modelo WRF-FNL  
19:00-22:00 del 15 de marzo de 2001.  
Elaboración: Los autores.



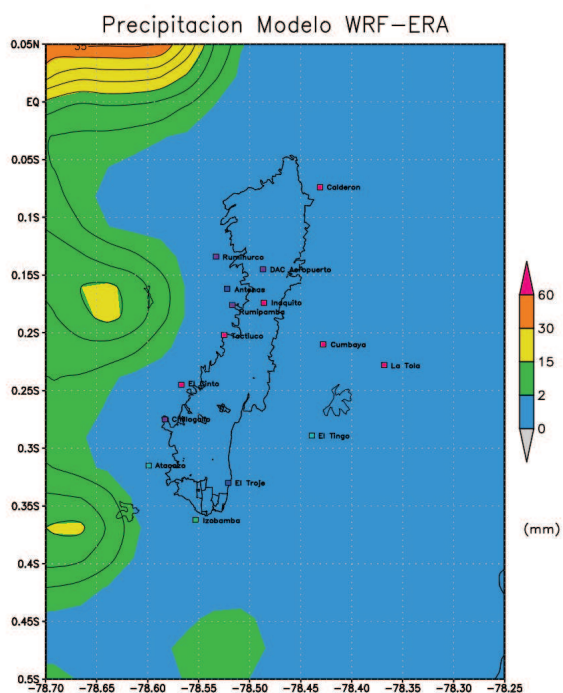
**Figura 6.3:** Relleno WRF-FNL  
19:00-22:00 del 15 de marzo de 2001.  
Elaboración: Los autores.



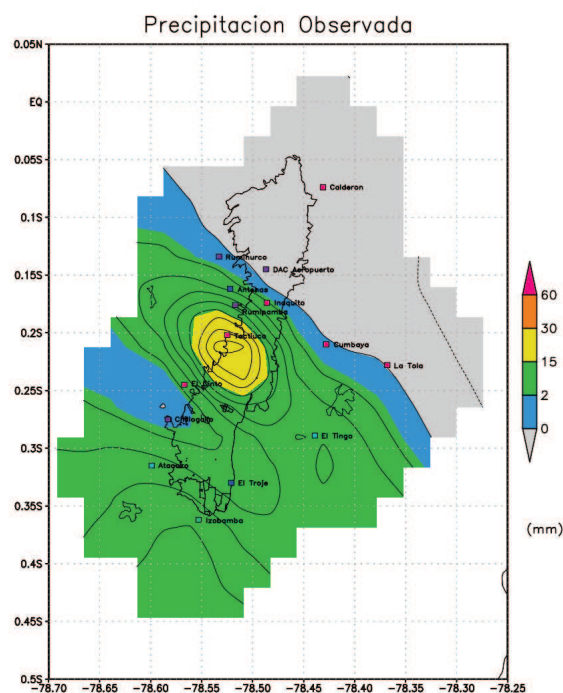
**Figura 6.4:** Diferencia WRF-FNL  
19:00-22:00 del 15 de marzo de 2001.  
Elaboración: Los autores.



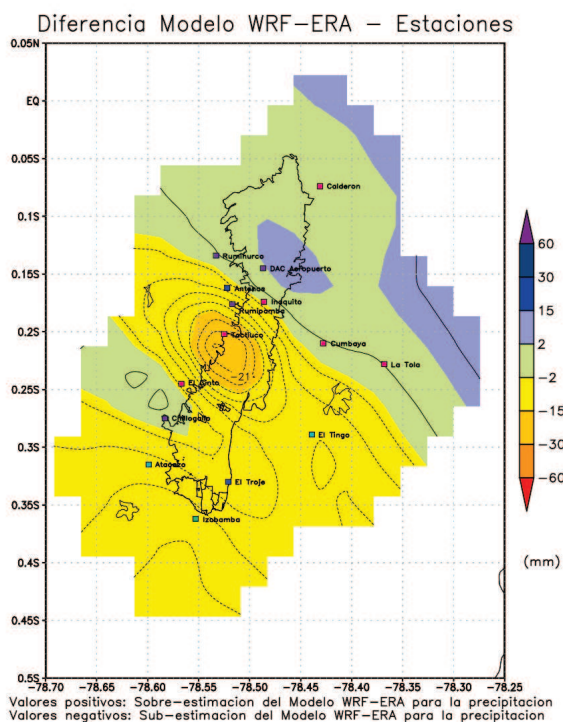
**Figura 6.5:** Cantidad WRF-FNL  
19:00-22:00 del 15 de marzo de 2001.  
Elaboración: Los autores.



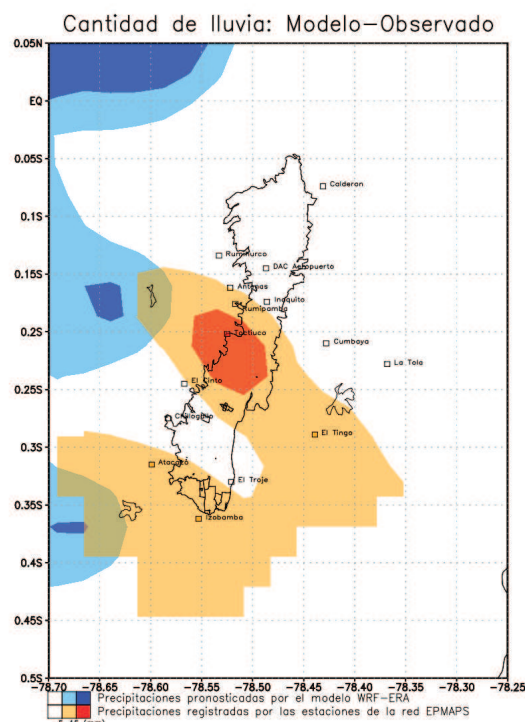
**Figura 6.6:** Modelo WRF-ERA  
19:00-22:00 del 15 de marzo de 2001.  
Elaboración: Los autores.



**Figura 6.7:** Relleno WRF-ERA  
19:00-22:00 del 15 de marzo de 2001.  
Elaboración: Los autores.



**Figura 6.8:** Diferencia WRF-ERA  
19:00-22:00 del 15 de marzo de 2001.  
Elaboración: Los autores.



**Figura 6.9:** Cantidad WRF-ERA  
19:00-22:00 15 del de marzo de 2001.  
Elaboración: Los autores.

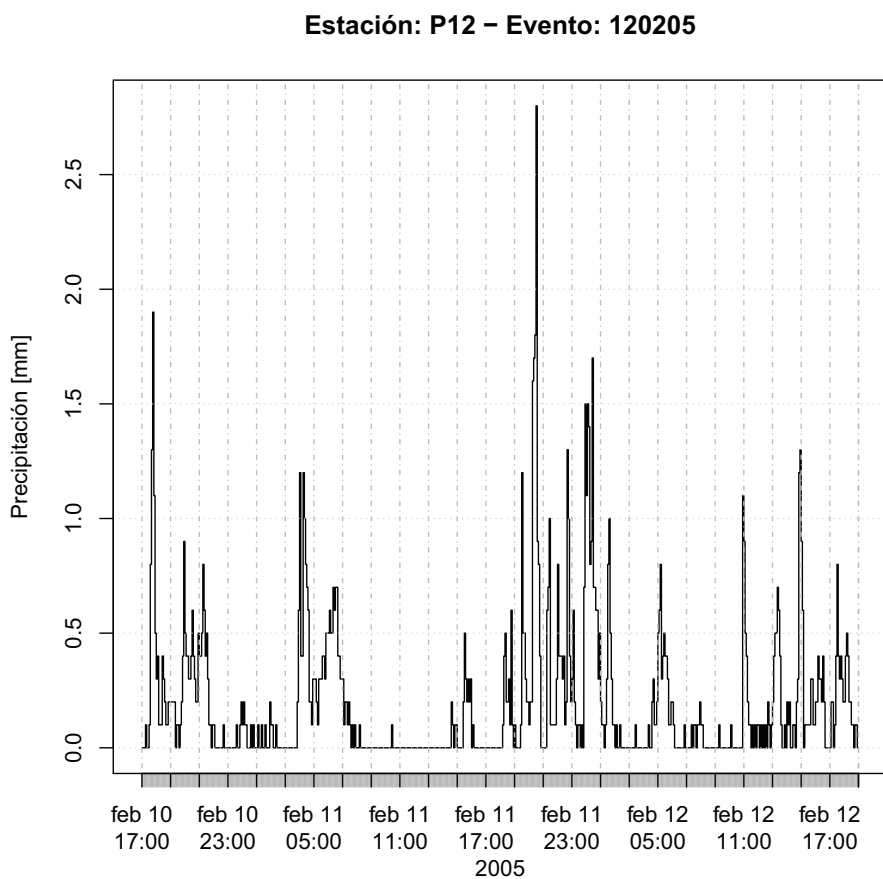
El evento inició el 14 de marzo con lloviznas intermitentes y se intensificó para las primeras horas de la noche del 15 de marzo. Este evento fue una combinación de sistemas convectivos y sinópticos, con un pico máximo de precipitación de 4.2 mm. Superó el período de retorno de 5 años para todos los valores superiores a 240 minutos, esto debido a su proceso de intensificación en el segundo día.

Los modelos reportan precipitación generalizada en toda el área de cobertura con mayor intensidad al oeste, el modelo WRF-FNL presenta una mayor intensidad en el centro y sur de la ciudad así como en las laderas del Pichincha. El relleno espacial muestra precipitación en el centro y sur de la ciudad con una célula de mayor intensidad en el centro sur de Quito.

Ambos modelos subestimaron la precipitación en el centro de la ciudad y el modelo WRF-FNL la sobrestimó en el norte. En la comparación de la ubicación el modelo WRF-ERA no mostró presencia de precipitaciones significativas en la ciudad, únicamente de menor intensidad. El modelo WRF-FNL ubicó una célula de mayor intensidad en el sur de la ciudad.

**EVENTO: 12 DE FEBRERO DE 2005 (ESTACIÓN TOCTIUCO P12)**

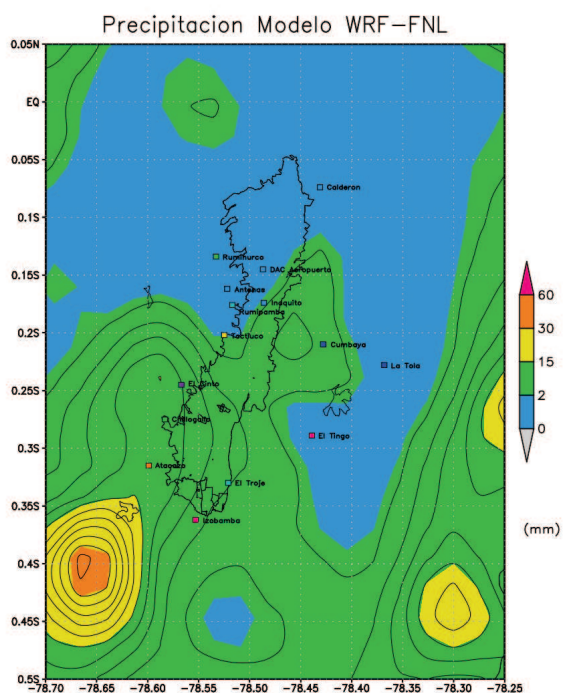
El 12 de febrero de 2005 se presentó un evento de carácter sinóptico clasificado como extremo en la estación Toctiuco.



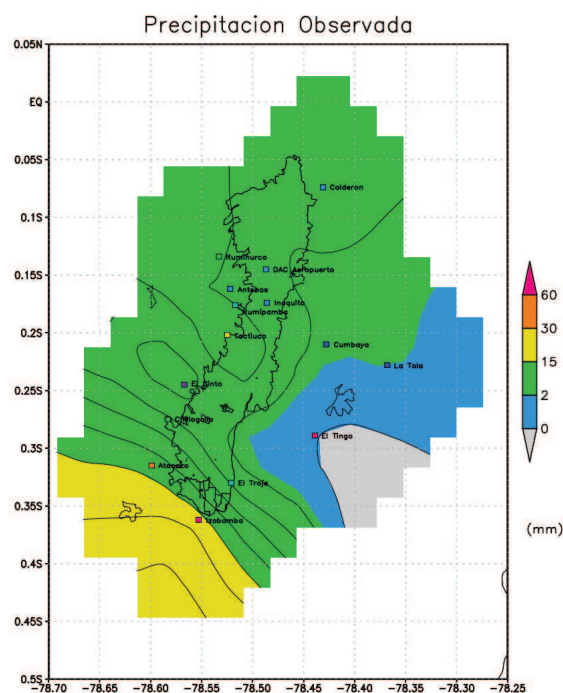
**Figura 6.10:** Hietograma del evento del 12 de febrero de 2005.

Elaboración: Los autores.

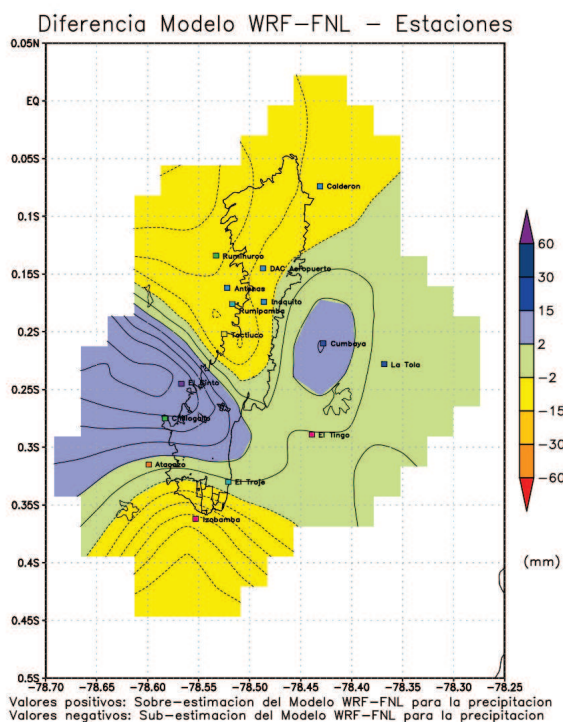




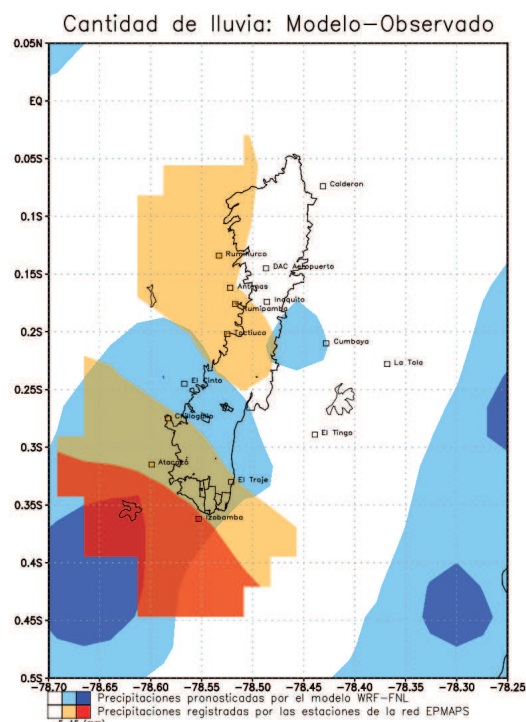
**Figura 6.11:** Modelo WRF-FNL  
13:00-16:00 del 12 de febrero de 2005.  
Elaboración: Los autores.



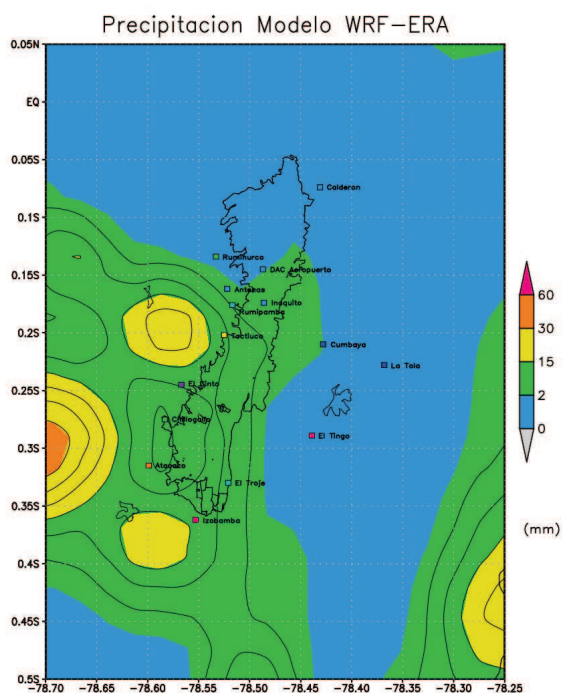
**Figura 6.12:** Relleno WRF-FNL  
13:00-16:00 del 12 de febrero de 2005.  
Elaboración: Los autores.



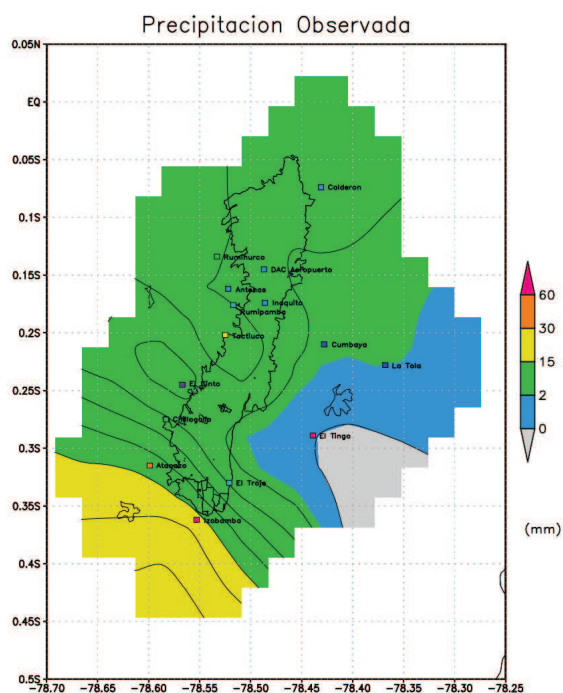
**Figura 6.13:** Diferencia WRF-FNL  
13:00-16:00 del 12 de febrero de 2005.  
Elaboración: Los autores.



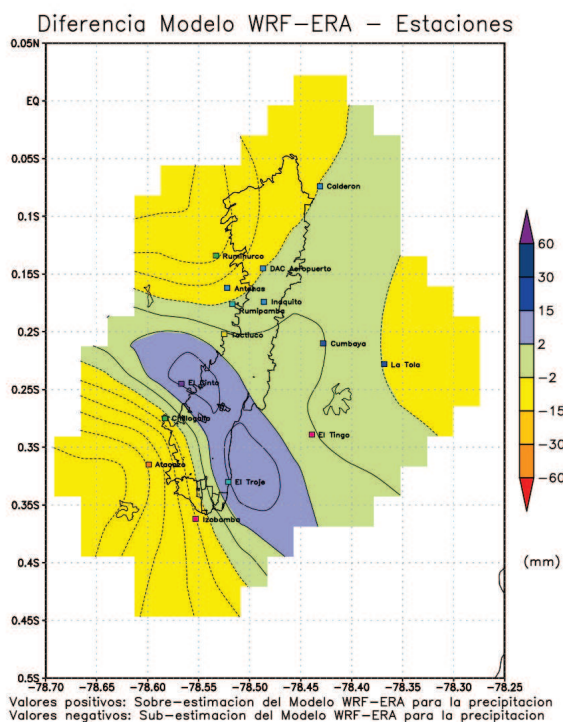
**Figura 6.14:** Cantidad WRF-FNL  
13:00-16:00 del 12 de febrero de 2005.  
Elaboración: Los autores.



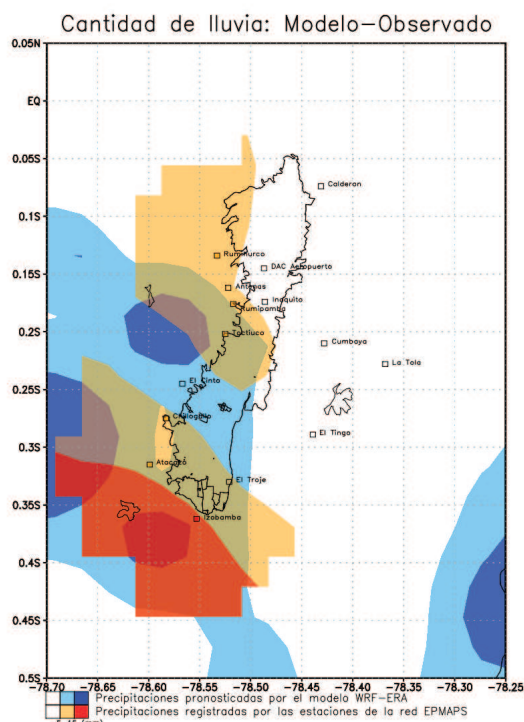
**Figura 6.15:** Modelo WRF-ERA  
13:00-16:00 del 12 de febrero de 2005.  
Elaboración: Los autores.



**Figura 6.16:** Relleno WRF-ERA  
13:00-16:00 del 12 de febrero de 2005.  
Elaboración: Los autores.



**Figura 6.17:** Diferencia WRF-ERA  
13:00-16:00 del 12 de febrero de 2005.  
Elaboración: Los autores.



**Figura 6.18:** Cantidad WRF-ERA  
13:00-16:00 del 12 de febrero de 2005.  
Elaboración: Los autores.

El evento inició el día 10 de febrero de 2005 y se mantuvo con lloviznas intermitentes por más de dos días. Este evento fue de tipo sinóptico, con un solo pico, cuyo máximo fue 2.8 mm en la noche del 11 de febrero. Superó el período de retorno de 5 años para las duraciones superiores a los 540 minutos.

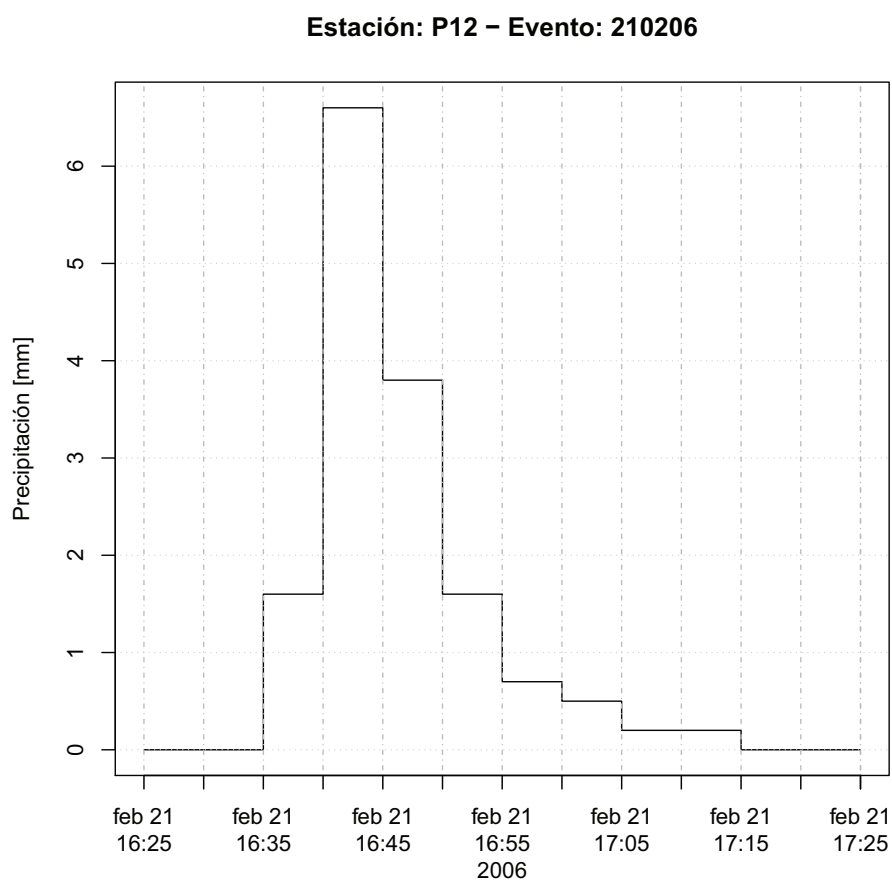
Ambos modelos presentaron precipitaciones en toda la ciudad con mayor intensidad en el centro y sur. El relleno espacial muestra un evento generalizado sobre la ciudad, con mayor intensidad en el sur de Quito.

Ambos modelos sobrestimaron la precipitación en el sur de la ciudad, y la subestimaron en el norte de Quito. En la comparación de la ubicación se observa que ambos modelos produjeron precipitaciones en el sur y centro de la ciudad, cerca de lo que se encontró con el relleno espacial que muestra precipitaciones tanto en el sur de la ciudad como en el centro y las laderas del Pichincha.



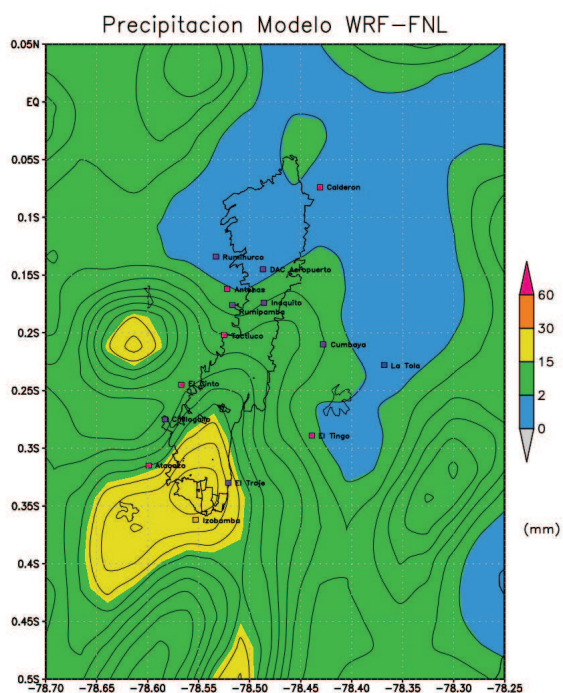
EVENTO: 21 DE FEBRERO DE 2006 (ESTACIÓN TOCTIUCO P12)

El 21 de febrero de 2006 se presentó un evento de caracter convectivo clasificado como extremo en la estación Toctiucó.

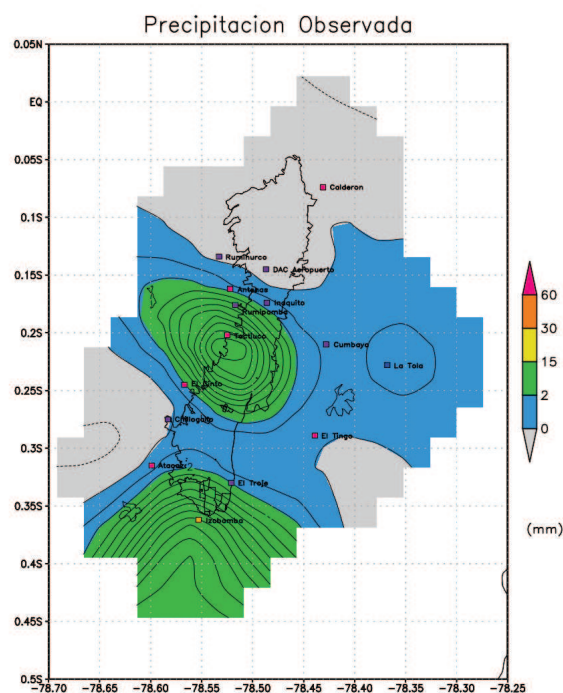


**Figura 6.19:** Hietograma del evento del 21 de febrero de 2006.

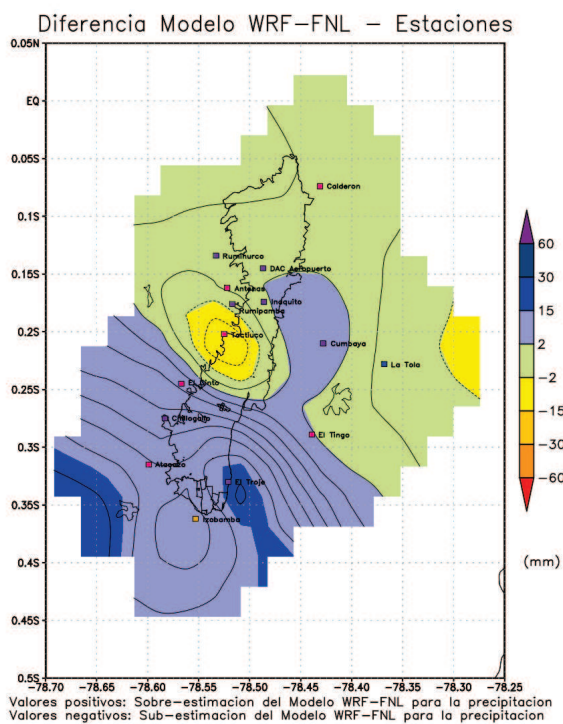
Elaboración: Los autores.



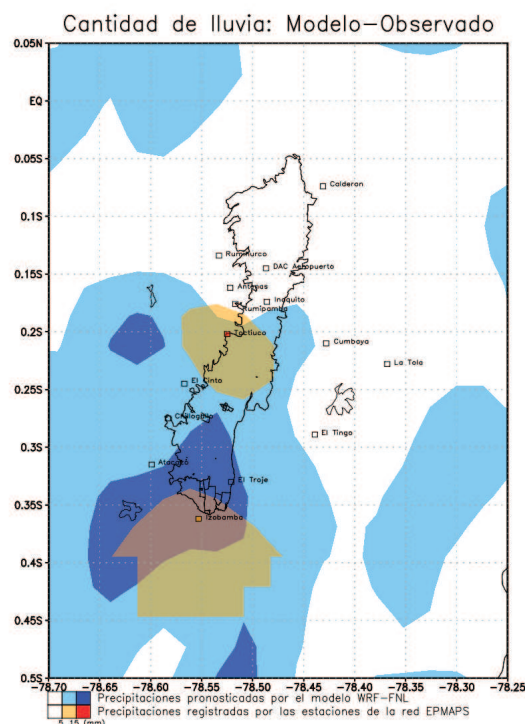
**Figura 6.20:** Modelo WRF-FNL  
16:00-19:00 del 21 de febrero de 2006.  
Elaboración: Los autores.



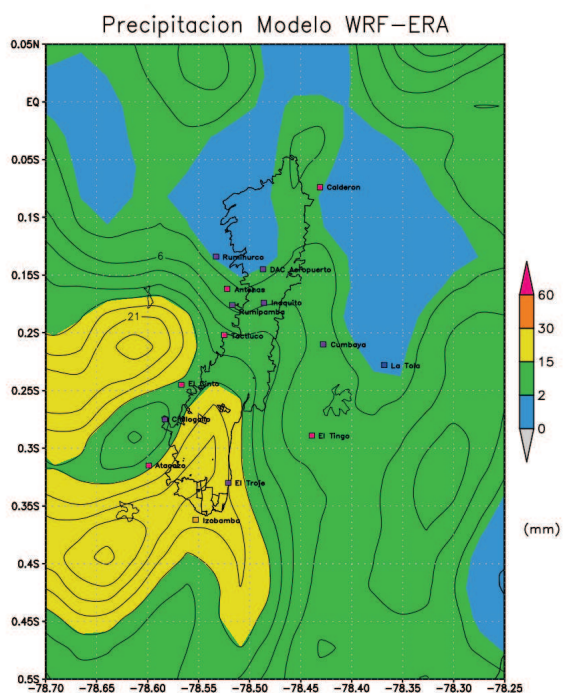
**Figura 6.21:** Relleno WRF-FNL  
16:00-19:00 del 21 de febrero de 2006.  
Elaboración: Los autores.



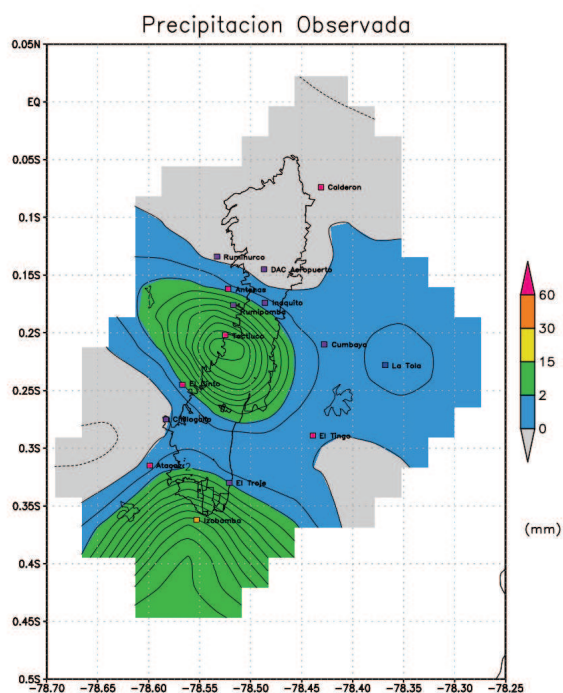
**Figura 6.22:** Diferencia WRF-FNL  
16:00-19:00 del 21 de febrero de 2006.  
Elaboración: Los autores.



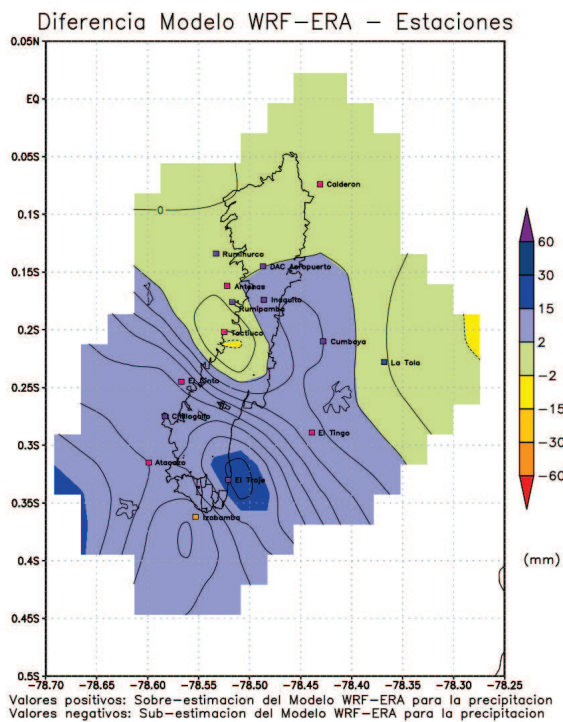
**Figura 6.23:** Cantidad WRF-FNL  
16:00-19:00 del 21 de febrero de 2006.  
Elaboración: Los autores.



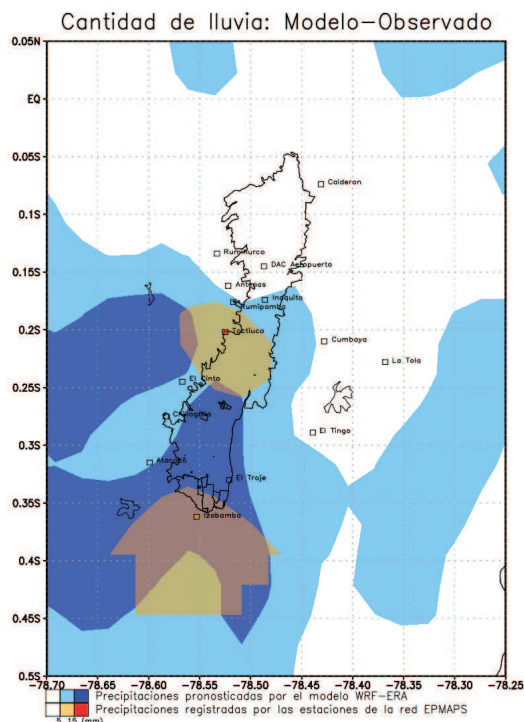
**Figura 6.24:** Modelo WRF-ERA  
16:00-19:00 del 21 de febrero de 2006.  
Elaboración: Los autores.



**Figura 6.25:** Relleno WRF-ERA  
16:00-19:00 del 21 de febrero de 2006.  
Elaboración: Los autores.



**Figura 6.26:** Diferencia WRF-ERA  
16:00-19:00 del 21 de febrero de 2006.  
Elaboración: Los autores.



**Figura 6.27:** Cantidad WRF-ERA  
16:00-19:00 del 21 de febrero de 2006.  
Elaboración: Los autores.

### **Análisis del evento**

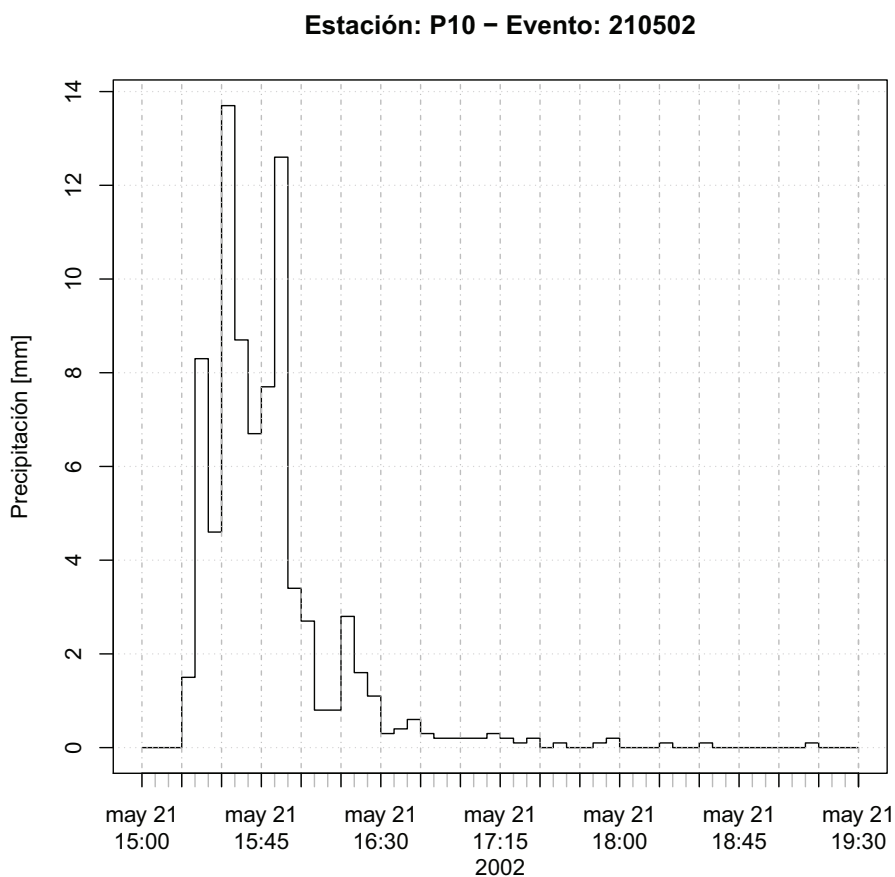
El evento inició a las 16:35 y terminó a las 17:15, con una duración de 40 minutos aproximadamente. Este evento fue de tipo convectivo, con un solo pico, cuyo máximo fue 6.6 mm a las 16:40. Superó el período de retorno de 5 años tan sólo en la duración de 5 minutos.

El modelo WRF-ERA presentó una mayor cantidad de precipitación con respecto al WRF-FNL en el sector sur de la ciudad, aunque no existieron diferencias significativas entre ambos modelos. El relleno espacial reveló que la precipitación fue de mayor intensidad en la zona centro y sur de la ciudad, en menor medida se presentó en los valles.

Ambos modelos sobrestimaron la precipitación en el sur de la ciudad, mientras que el modelo WRF-FNL subestimó la cantidad en la zona centro de Quito. En la comparación de la ubicación se observa claramente que ambos modelos produjeron precipitaciones en el sur y centro de la ciudad, mientras que según el relleno estas se presentaron aisladas entre el centro y el extremo sur.

## EVENTO: 21 DE MAYO DE 2002 (ESTACIÓN DAC-AEROPUERTO P10)

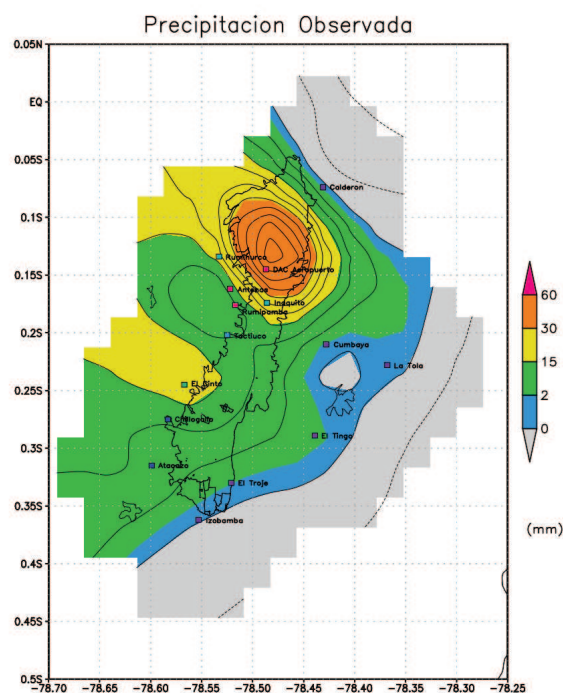
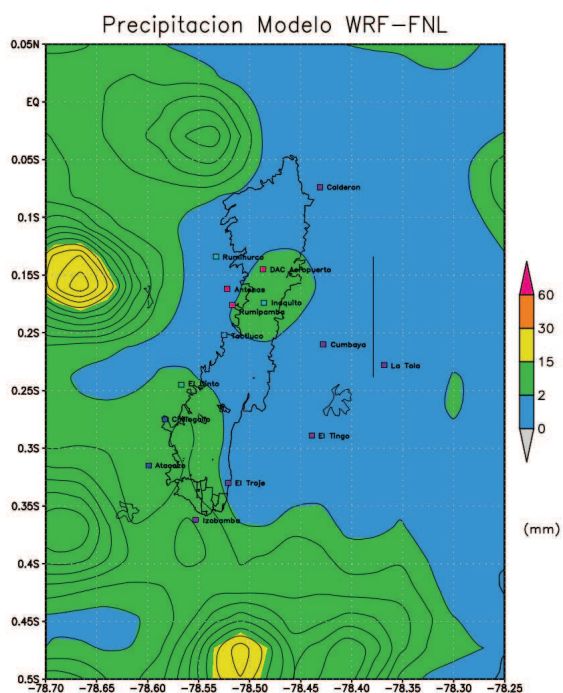
El 21 de mayo de 2002 se presentó un evento de carácter convectivo clasificado como extremo en la estación DAC-Aeropuerto, este evento también se caracterizó por ser uno de los más intensos en el grupo de estaciones analizadas para la mayoría de períodos de tiempo.



**Figura 6.28:** Hietograma del evento del 21 de mayo de 2002.

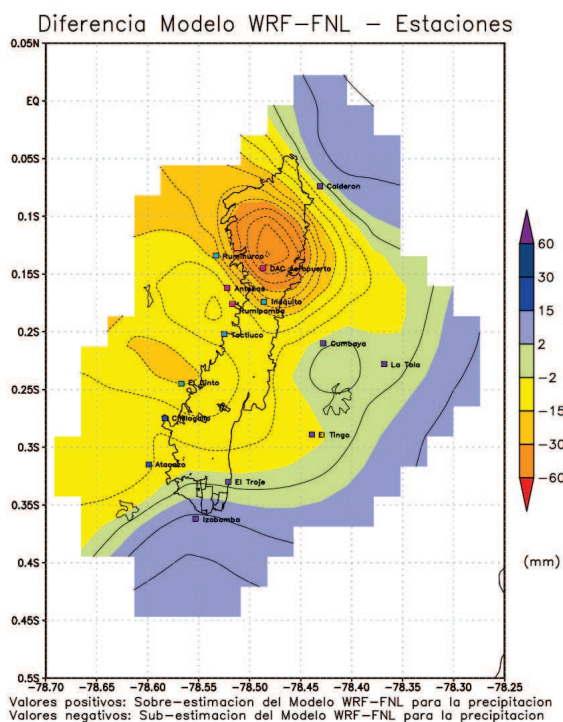
Elaboración: Los autores.



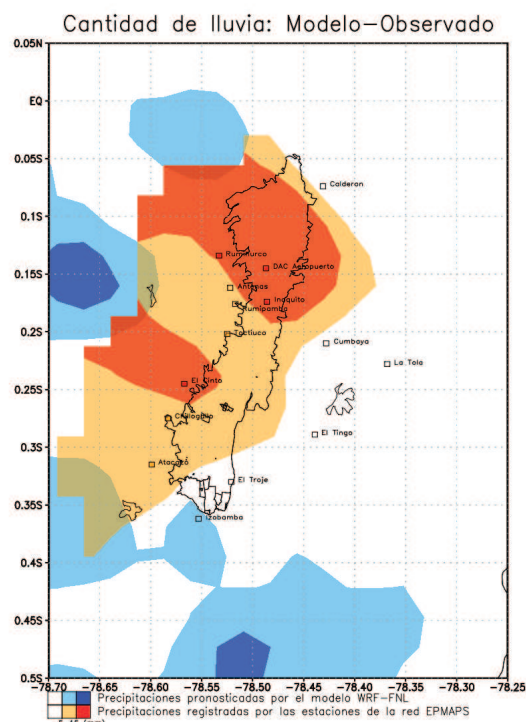


**Figura 6.29:** Modelo WRF-FNL  
13:00-16:00 del 21 de mayo de 2002.  
Elaboración: Los autores.

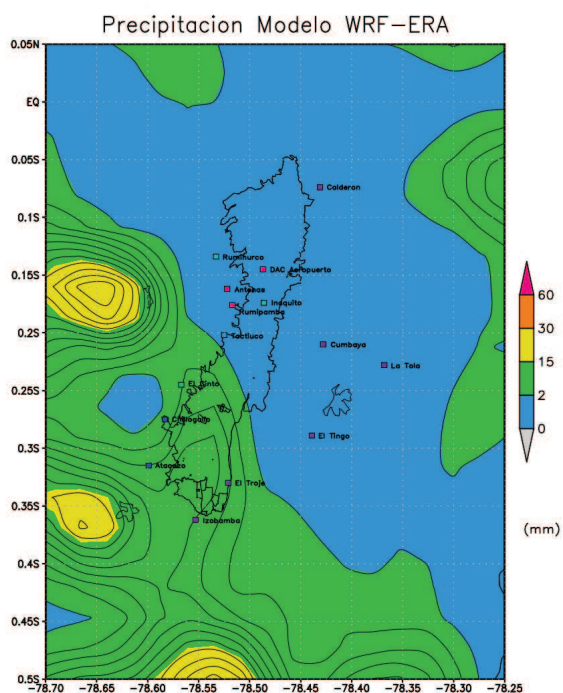
**Figura 6.30:** Relleno WRF-FNL  
13:00-16:00 del 21 de mayo de 2002.  
Elaboración: Los autores.



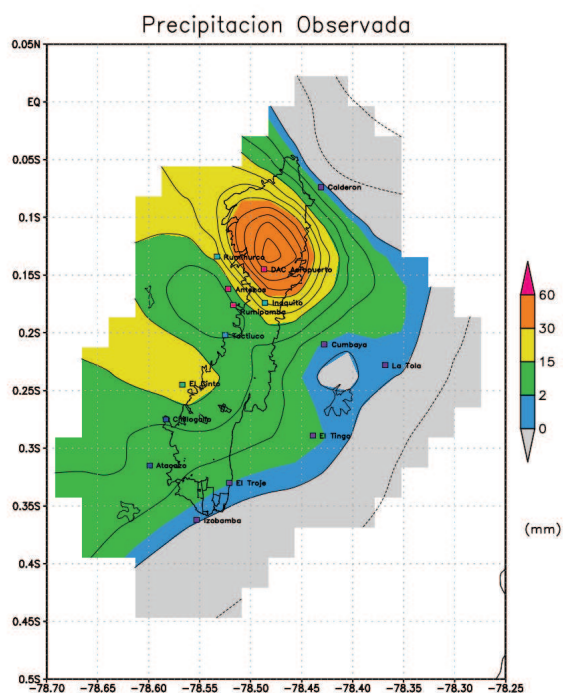
**Figura 6.31:** Diferencia WRF-FNL  
13:00-16:00 del 21 de mayo de 2002.  
Elaboración: Los autores.



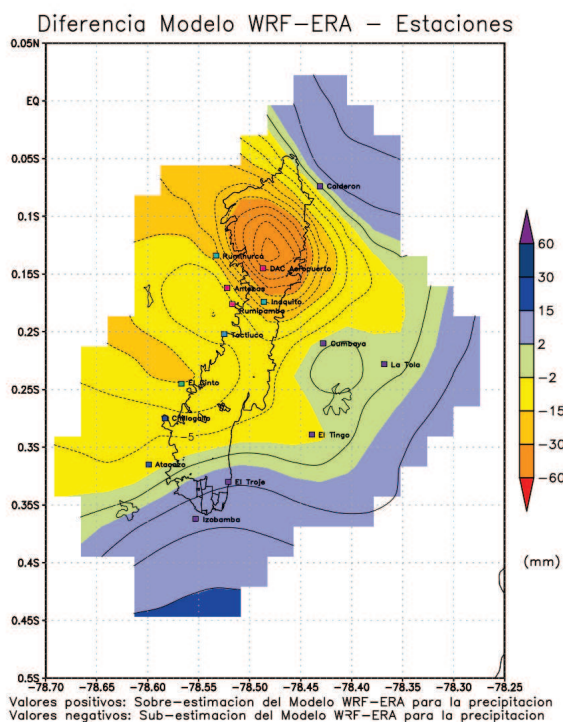
**Figura 6.32:** Cantidad WRF-FNL  
13:00-16:00 del 21 de mayo de 2002.  
Elaboración: Los autores.



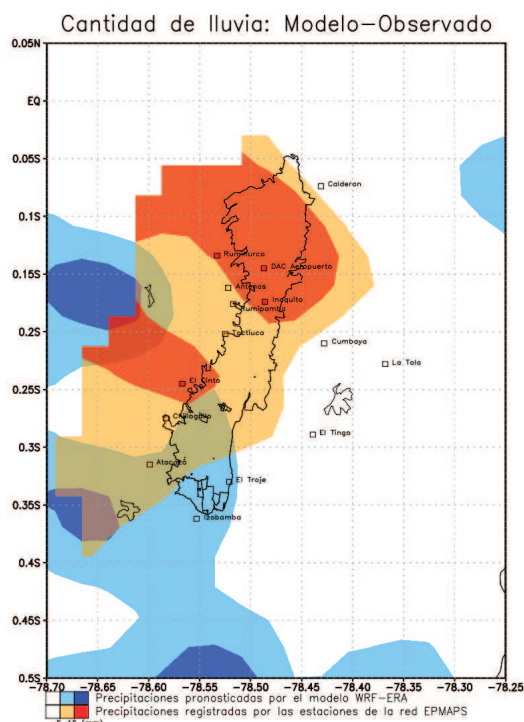
**Figura 6.33:** Modelo WRF-ERA  
13:00-16:00 del 21 de mayo de 2002.  
Elaboración: Los autores.



**Figura 6.34:** Relleno WRF-ERA  
13:00-16:00 del 21 de mayo de 2002.  
Elaboración: Los autores.



**Figura 6.35:** Diferencia WRF-ERA  
13:00-16:00 del 21 de mayo de 2002.  
Elaboración: Los autores.



**Figura 6.36:** Cantidad WRF-ERA  
13:00-16:00 del 21 de mayo de 2002.  
Elaboración: Los autores.



El evento inició a las 15:15 y terminó a las 16:50, con una duración de una hora y 35 minutos aproximadamente. Este evento fue de tipo convectivo, con tres picos fuertes de precipitación dentro de su desarrollo principal. Superó el período de retorno de 5 años para todas las duraciones consideradas.

La cantidad de precipitación presentada por ambos modelos es bastante similar, excepto porque el modelo WRF-FNL presenta una mayor precipitación en la zona centro norte. En el relleno espacial se puede observar que el evento fue generalizado en la ciudad y con mayor intensidad sobre la zona norte de la ciudad.

Ambos modelos subestimaron la precipitación en toda la ciudad y en mayor manera en el norte. En la comparación de la ubicación se observa como ambos modelos produjeron precipitaciones en el oeste de la ciudad, los cuales están desplazados del lugar determinado por la red de estaciones. Para mayor información sobre el evento, se puede observar la captura de pantalla del diario electrónico *El Universo*.

The screenshot shows the website 'EL UNIVERSO' with a navigation bar including 'Noticias', 'Opinión', 'Guayaquil', 'Deportes', 'Entretenimiento', and 'Vida'. The main article is titled 'Fuerte lluvia provoca caos en Quito' and is dated 'Martes 21 de mayo del 2002 | 19:15'. The article text includes:

**AFP | QUITO**  
Una torrencial lluvia que cayó hoy sobre Quito desencadenó un caos debido a inundaciones de las calles que afectaron principalmente a la zona norte, incluyendo al único aeropuerto local, informó el Cuerpo de Bomberos.

Señaló que los pasos vehiculares a desnivel, que desahogan el tráfico, quedaron anegados, debido a lo cual se presentaron grandes embotellamientos.

Los accesos hacia el aeródromo se dificultaron por el congestionamiento de automotores en las principales arterias.

Un fuerte invierno golpea a doce de las 22 provincias de Ecuador desde febrero pasado, dejando 33 muertos, nueve heridos y un desaparecido hasta inicios de mayo, según informó la dirección nacional de la Defensa Civil (DC).

El balance de víctimas debido a los efectos del invierno incluía a 3.033 damnificados, 57.718 afectados y 5.293 familias (de cinco miembros) evacuadas temporalmente de sus viviendas debido al riesgo de corrientadas e inundaciones.

Además, causaron daños parciales en 10.884 casas y la destrucción de otras 435.

El gobierno del presidente Gustavo Noboa, que el 22 de marzo pasado declaró en estado de emergencia a las regiones afectadas por los aguaceros, no ha cuantificado aún las pérdidas económicas.

Sin embargo, se estima que son millonarias debido a que fueron afectadas muchas viviendas, miles de hectáreas de cultivos, cerca de un millar de kilómetros de carreteras, puentes, muros de contención y otras infraestructuras.

At the bottom of the page, there are social media sharing options (Imprimir, Enviar, Compartir) and a 'El País' logo.

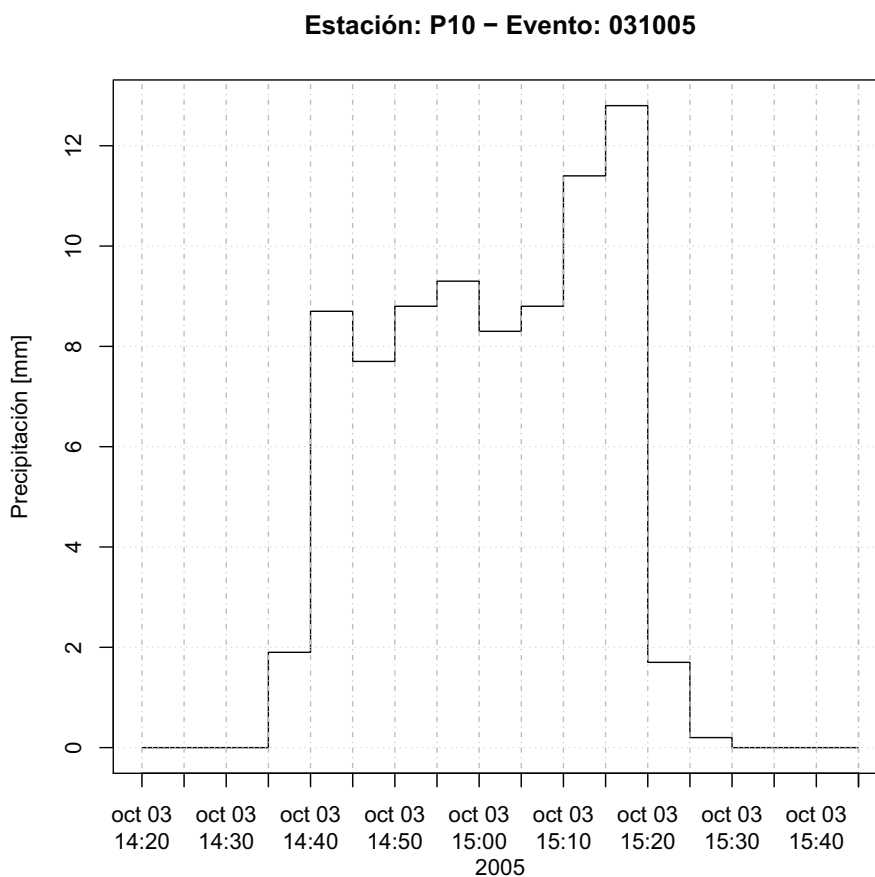
Figura 6.37: Noticia del evento del 21 de mayo de 2002.

Fuente: *El Universo* [2002].



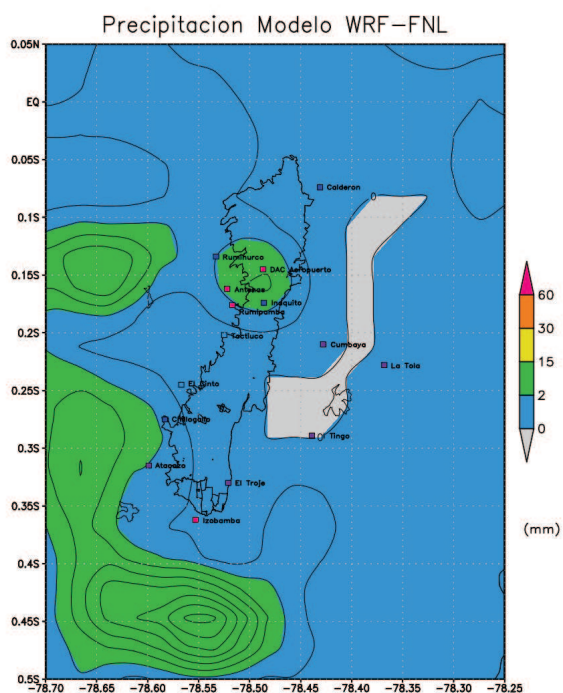
## EVENTO: 3 DE OCTUBRE DE 2005 (ESTACIÓN DAC-AEROPUERTO P10)

El 3 de octubre de 2005 se presentó un evento de carácter convectivo clasificado como extremo en la estación DAC-Aeropuerto, este evento también se caracterizó por ser uno de los más intensos en el grupo de estaciones analizadas para la mayoría de períodos de tiempo.

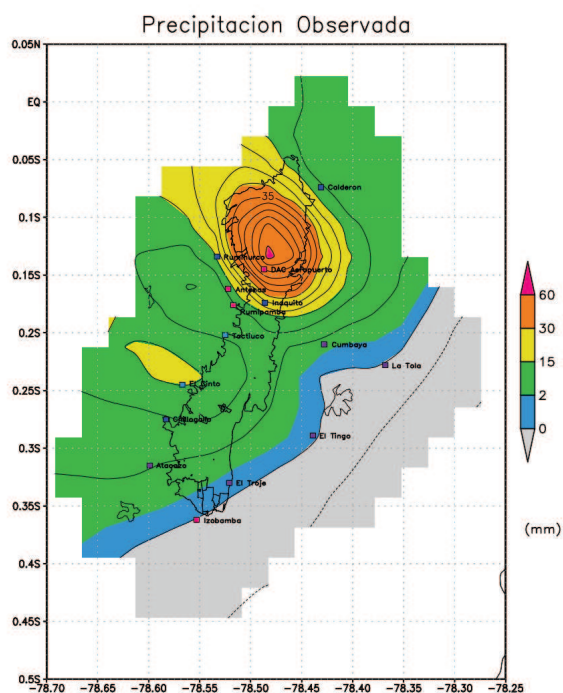


**Figura 6.38:** Hietograma del evento del 3 de octubre de 2005.

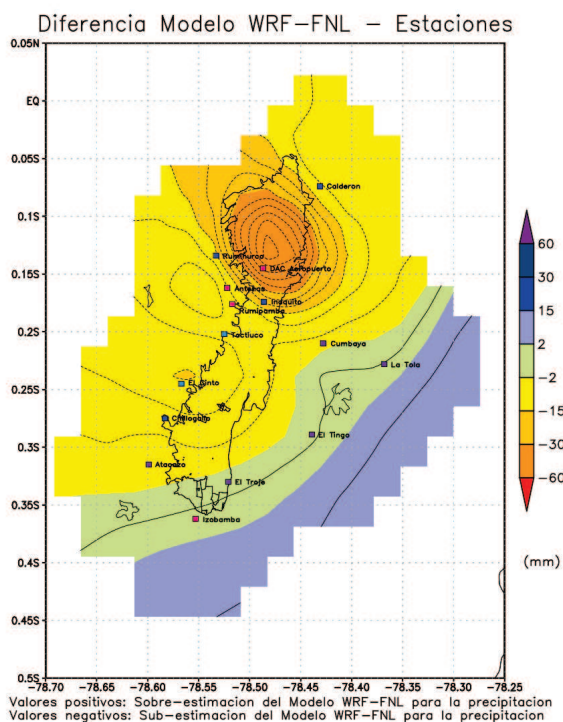
Elaboración: Los autores.



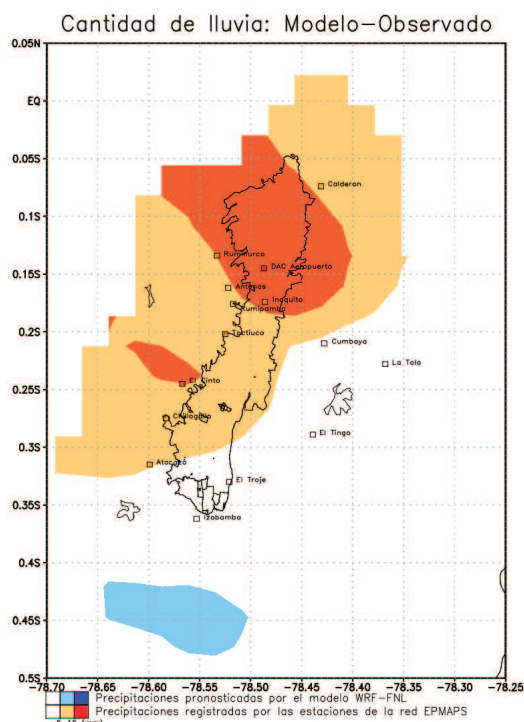
**Figura 6.39:** Modelo WRF-FNL  
13:00-16:00 del 3 de octubre de 2005.  
Elaboración: Los autores.



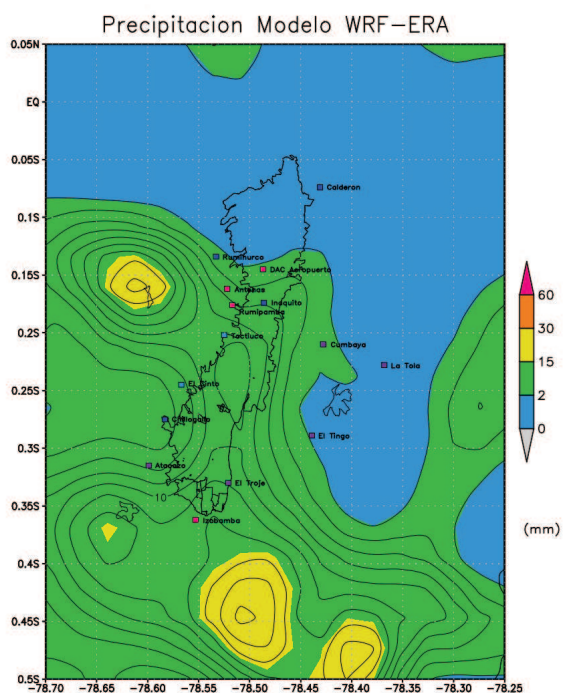
**Figura 6.40:** Relleno WRF-FNL  
13:00-16:00 del 3 de octubre de 2005.  
Elaboración: Los autores.



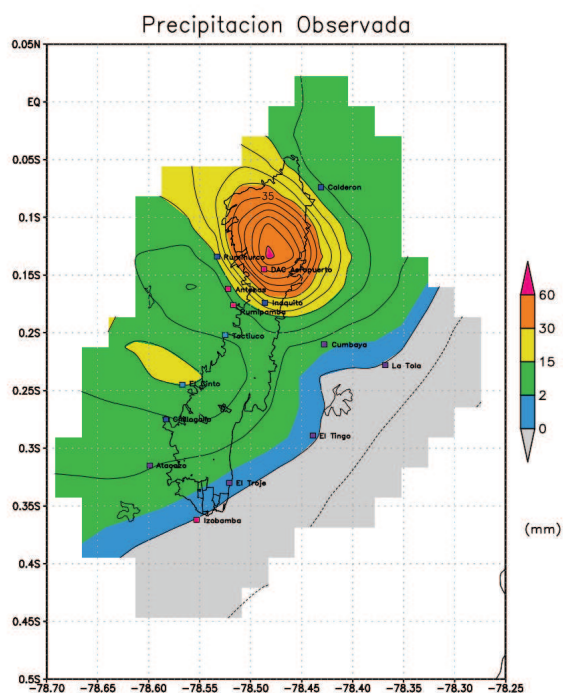
**Figura 6.41:** Diferencia WRF-FNL  
13:00-16:00 del 3 de octubre de 2005.  
Elaboración: Los autores.



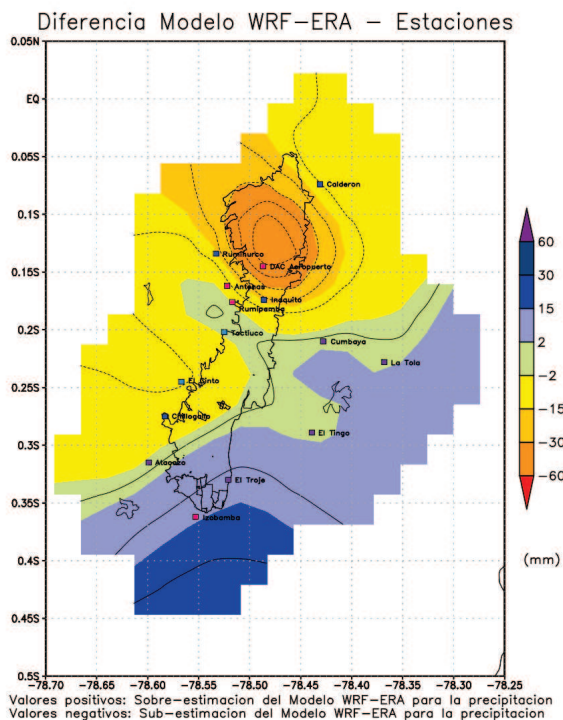
**Figura 6.42:** Cantidad WRF-FNL  
13:00-16:00 del 3 de octubre de 2005.  
Elaboración: Los autores.



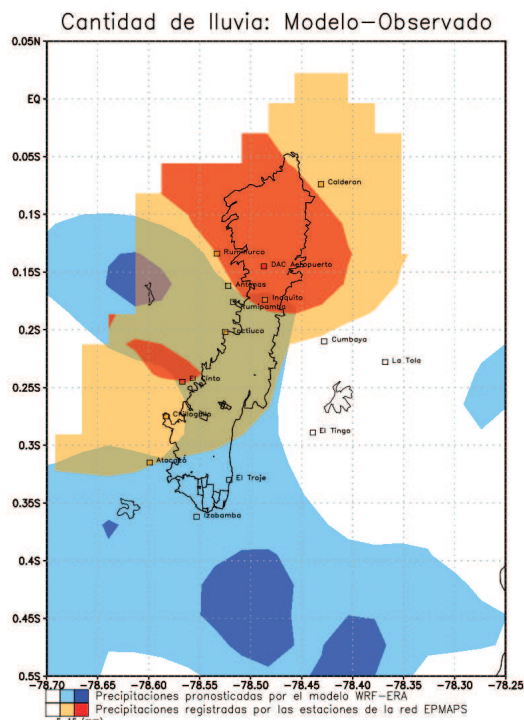
**Figura 6.43:** Modelo WRF-ERA  
13:00-16:00 del 3 de octubre de 2005.  
Elaboración: Los autores.



**Figura 6.44:** Relleno WRF-ERA  
13:00-16:00 del 3 de octubre de 2005.  
Elaboración: Los autores.



**Figura 6.45:** Diferencia WRF-ERA  
13:00-16:00 del 3 de octubre de 2005.  
Elaboración: Los autores.



**Figura 6.46:** Cantidad WRF-ERA  
13:00-16:00 del 3 de octubre de 2005.  
Elaboración: Los autores.



El evento inició a las 14:35 y terminó a las 15:30, con una duración de 55 minutos aproximadamente. Este evento fue de tipo convectivo, con un solo pico, cuyo máximo fue 12.8 mm a las 15:15. Superó el período de retorno de 5 años para todas las duraciones consideradas debido a la gran cantidad de precipitación acumulada en menos de una hora.

El modelo WRF-ERA presentó una mayor cantidad de precipitación con respecto al WRF-FNL en toda la ciudad, mientras que el modelo WRF-FNL presentó un pequeño núcleo de mayor precipitación en el norte de la ciudad. El relleno espacial reveló un evento generalizado en la ciudad con mayor presencia en el norte. Ambos modelos subestimaron la precipitación en toda la ciudad, especialmente en el norte de Quito. En la comparación de la ubicación el modelo WRF-ERA presenta una mejor aproximación en la ciudad, fallando en el norte; mientras que el modelo WRF-FNL no detecta la presencia de precipitaciones fuertes. Para mayor información sobre el evento, se puede observar la captura de pantalla del diario electrónico *El Universo*.

The screenshot shows the website 'EL UNIVERSO' with a navigation bar including 'Noticias', 'Opinión', 'Guayaquil', 'Deportes', 'Entretenimiento', and 'Vida'. The main article is dated 'Martes 04 de octubre del 2005' and is titled 'Torrenciales lluvias en Quito dejan un menor desaparecido'. The text describes the impact of heavy rain on the city, mentioning a child who was swept away. A photo shows a flooded street with cars. A sidebar on the right contains an advertisement for 'Viajes a Orlando 2013' from 'royalvacationresorts.com'. The article footer includes social media sharing options and the 'El País' logo.

Figura 6.47: Noticia del evento del 3 de octubre de 2005.

Fuente: *El Universo* [2005].

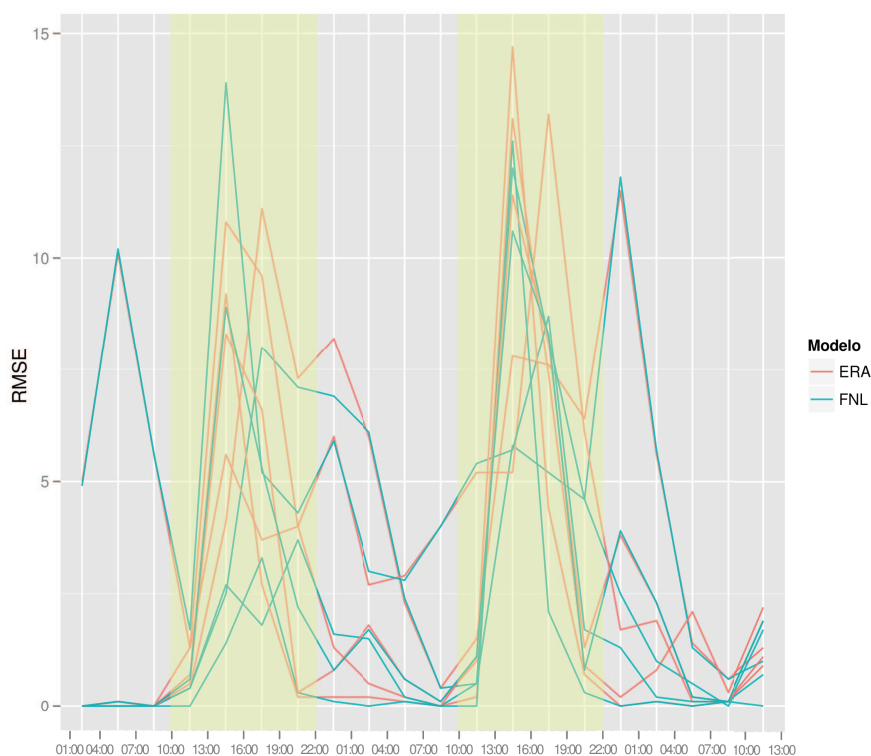
## RMSE DE LOS EVENTOS ESTUDIADOS

El cálculo del RMSE se realiza tomando la diferencia entre el modelo WRF (FNL o ERA) y el relleno espacial como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m (a(x, y) - b(x, y))^2}{n + m}},$$

con  $x$  la latitud,  $y$  la longitud,  $n$  y  $m$  el número de puntos en cada dimensión del dominio, respectivamente,  $a(x, y)$  el valor calculado por el modelo y  $b(x, y)$  el valor relleno espacialmente.

Se calculó el RMSE para los eventos simulados por los modelos WRF-FNL y WRF-ERA. Se puede observar que la mayoría de errores se encontraron entre las 10:00 y las 22:00 tanto del primero como del segundo día de simulación, esto debido a que en dichos períodos se suelen presentar los episodios más fuertes de carácter convectivo.



**Figura 6.48:** RMSE (Root Mean Square Error) del total de eventos simulados mediante WRF-FNL y WRF-ERA.

Elaboración: Los autores.

# 7

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 CONCLUSIONES

- En el presente proyecto se estudió información histórica de aproximadamente 10 años de 15 estaciones pluviométricas, elegidas por tener la mayor cantidad y calidad de información dentro de la red de la EPMAPS. Se realizó una minuciosa depuración de la información pluviométrica que presentaba errores de los sensores así como de ingreso en la base de datos. Los resultados de los eventos extremos seleccionados, así como las ecuaciones IDF encontradas ofrecieron muy buenos resultados, lo que evidencia que la función de distribución Gamma ajusta bien la ocurrencia de la precipitación en el Distrito Metropolitano de Quito.
- Se encontró que el DMQ puede ser dividido en cuatro regiones o zonas homogéneas, las cuales fueron determinadas tomando en cuenta tanto la ubicación geográfica de las estaciones como los porcentajes de aparición de los tres tipos de precipitación caracterizados en este estudio (convectiva, sinóptica y convectiva-sinóptica) para eventos extremos.
- La utilización de dendogramas para la clasificación del tipo de eventos mediante los métodos de Ward, UPGMA y el análisis HCPC, mostraron excelentes resultados además de no mostrar incongruencias.
- En las simulaciones de los eventos extremos utilizando el modelo WRF, se encontró que el mismo identificó satisfactoriamente la ocurrencia de precipitación, errando en la cantidad y ligeramente en la ubicación de áreas de precipitación.

- El análisis de los eventos extremos mostró que en el DMQ, en general no se tienen precipitaciones que superen las 24 horas de duración.
- Tanto la climatología de eventos extremos como un mayor conocimiento en las parametrizaciones físicas del modelo WRF permitirán una mejor predicción de eventos de este tipo en el DMQ.
- El trabajar con las series de precipitación a intervalos de cinco minutos para la generación de curvas IDF permite identificar de mejor forma los eventos extremos en el DMQ.

## 7.2 RECOMENDACIONES

- Se debe tener especial cuidado al tratar con series temporales de parámetros tan aleatorios como la precipitación. Además de mantener una constante verificación de los valores registrados por los sensores automáticos pues son muy susceptibles a daños y averías.
- Se puede observar que mientras más años de información se dispone, mejores son los ajustes que se obtienen en las ecuaciones Intensidad-Duración-Frecuencia.
- Se recomienda avanzar con el uso de la asimilación 4-dimensional en el modelo WRF para mejorar tanto pronósticos, como rellenos espaciales de información climatológica.
- Para una mejor simulación se debería incluir otros parámetros físicos como temperatura, humedad relativa así como la velocidad y dirección del viento; con esto se mejoraría significativamente el análisis presentado en este estudio, actualmente la base de datos de dichos parámetros es insuficiente pues se dispone de información de pocos años.
- Se debería volver a realizar este trabajo dentro de algunos años, pues se contará entonces con una base de datos más extensa, lo cual permitirá mejorar el análisis mediante las curvas IDF.

## REFERENCIAS

- Ayabaca E. (1996). Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia de principales estaciones pluviográficas de Quito.
- Camp Dresser and McKee (1977). Informe Final de los Planes Maestros y Estudios de Factibilidad de los Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado.
- Casas Castillo, M. C. (2005). *Análisis espacial y temporal de las lluvias extremas en Catalunya. Modelización y clasificación objetiva*. Ph.D. Tesis, Universidad de Barcelona. Departament d'Astronomia i Meteorologia.
- Centro de Modelado Científico (2012). Observatorio Latinoamericano de Eventos Extraordinarios (OLE2). <http://www.cmc.org.ve/mediawiki>.
- CISL (2012). CISL Research Data Archive ds083.2 description. <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2>.
- COLA (2012). Grid Analysis and Display System (GrADS). <http://www.iges.org/grads/>.
- COMET (2012). MetEd. <http://www.meted.ucar.edu>.
- da Silva Arlindo y Fiorino Mike (2012). Open Grid Analysis and Display System. [sourceforge.net/projects/opengrads](https://sourceforge.net/projects/opengrads).
- Developmental Testbed Center (2012). WRF Weather Research and Forecasting. <http://www.wrf-model.org/index.php>.
- El Universo (2002). Fuerte lluvia provoca caos en Quito. <http://www.eluniverso.com/2002/05/21/0001/12/9A7393409B47460A92CCB21D12C90701.html>.
- El Universo (2005). Torrenciales lluvias en Quito dejan un menor desaparecido. <http://www.eluniverso.com/2005/10/04/0001/12/B0595B238771414DBA58C0C69A0A5626.html>.
- Garreaud, R. D. (2009). The Andes climate and weather. *Advances in Geosciences*, pages 1–9.
- GZT (1991). Estudio de Pre-factibilidad Saneamiento del Río Machángara, Estudio Hidrológico.
- Lezaun Iturralde, M. (2003). PREDICCIONES DEL TIEMPO Y MATEMÁTICAS. SIGMA N°23.
- Maya Néstor y Zambrano Miguel (2010). *Manual de usuario PGA y Cataclysm*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- NOAA (2012). WRF Portal. <http://wrfportal.org/DomainWizard.html>.
- Nouvelot J.F (1982). Normas Pluviométricas Propuestas para Ecuador, PRONAREG-ORSTOM.



- Pizarro R. (2003). Módulo 2: Curvas Intensidad Duración Frecuencia. Sociedad Estándares de Ingeniería para Aguas y suelos LTDA.
- R Development Core Team (2007). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0.
- Reanalyses.org (2012). Reanalysis Intercomparison and Observations. <http://reanalyses.org/atmosphere/overview-current-reanalyses>.
- Rodríguez L. (1980). Estudio de Intensidades.
- Sherman C. (1931). Frequency and intensity of excessive rainfall at Boston, Massachusetts, Transactions, American Society of Civil Engineers.
- Skamarock WC et al (2008). A description of the advanced research WRF version 3. NCAR tech. note TN-475\_STR.
- Soares, P. (2012). WRF high resolution dynamical downscaling of ERA-Interim for Portugal.
- Témez, J. (1978). Cálculo Hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. Dirección General de Carreteras. Madrid-España.
- UCAR (2012). The 1992 ASP Summer Colloquium. <http://www.asp.ucar.edu/colloquium/1992/notes>.
- UCAR (2012). UCAR Digital Image Library. <http://www.fin.ucar.edu/res/sites/imagelibrary/index.html>.
- World Health Organization and World Meteorological Organization (2012). *ATLAS OF HEALTH AND CLIMATE*.
- Youngman, B. D. (2012). Spatial Interpolation of Extreme Values. arXiv:1203.2343v1.



# IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO WRF

## A.1 INSTALACIÓN

Para la verificación de los resultados obtenidos en la climatología obtenida para eventos extremos, se instaló el modelo numérico WRF y se descargaron los datos iniciales para realizar las respectivas corridas retrospectivas del modelo en los años elegidos. Se describe a continuación el proceso tanto de instalación como de uso del modelo WRF para la obtención de los productos generados en el presente estudio.

### A.1.1 SISTEMA OPERATIVO Y LIBRERÍAS

Para la instalación del modelo WRF se requiere un computador con un sistema operativo UNIX. En particular la elección más sencilla es un sistema Linux, la elección de la distribución a utilizarse dependerá de la afinidad del usuario con dicha distribución. Dentro de este trabajo se han utilizado distintas distribuciones: Debian 5.0, Fedora 10, Ubuntu 10.04/11.10/12.04 y Scientific Linux 6.0. Los binarios para la compilación del modelo WRF<sup>1</sup> se pueden descargar de manera gratuita previa suscripción en su página oficial. El modelo WRF es de dominio público.

Se requiere de varias librerías previas a la compilación del modelo WRF, éstas dependen de la distribución Linux utilizada, así como de si el sistema operativo es de 32 ó 64 bits. Es de gran importancia la elección de un compilador de Fortran y C debido a que de estos dependerá tanto el

---

<sup>1</sup><http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/downloads.html>

desempeño computacional del modelo como la facilidad de la instalación. Se pueden utilizar distintas opciones como los compiladores libres del Proyecto GNU (incluidos en los paquetes de desarrollo de las distribuciones Linux), los compiladores de Intel (se pueden descargar de manera gratuita previa suscripción para fines investigativos) o los compiladores PGI (Portland Group, de pago).

Después de instalar las librerías necesarias se procede a compilar el modelo, se pueden seguir las instrucciones en [Skamarock WC et al, 2008] o en [Centro de Modelado Científico, 2012] para completar la compilación. Luego de completar con éxito la instalación del modelo WRF, se procede a compilar el programa ARWpost<sup>2</sup> y el visualizador GrADS (ver el Anexo B) o su versión alternativa OpenGrADS<sup>3</sup> (con licencia GPL), los cuales se instalan de manera sencilla siguiendo las instrucciones que incluyen.

## A.2 USO DEL MODELO WRF

### A.2.1 DATOS DE INICIALIZACIÓN

El modelo WRF precisa de un conjunto de datos iniciales como condiciones de frontera para realizar tanto un pronóstico del tiempo como un análisis retrospectivo del clima. Para la inicialización del modelo en modo operativo, se utilizan los datos generados por el modelo GFS, los cuales se pueden descargar libremente de la página: <ftp://ftpprd.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gfs/prod/>. Se dispone de datos generados a las 00Z, 06Z, 12Z y 18Z. La descarga se realiza de manera automatizada utilizando un script escrito en Bash (que cuenta con direcciones de descargas redundantes de dos servidores distintos) y el demonio cron (utilidad de los sistemas operativos Linux destinada a ejecutar de forma desatendida tareas programadas por el usuario). Para realizar corridas retrospectivas se utilizan los datos mencionados en el capítulo 5.

### A.2.2 DOMINIOS

La elección del dominio para el presente trabajo se realizó tomando en cuenta los sitios a analizarse, se trabajó con dos dominios a distinta resolución espacial (2 minutos para el Ecuador y 30 segundos para el DMQ). La creación de los puntos de los dominios se la realiza con la ayuda del programa Domain Wizard [NOAA, 2012], el mismo que automatiza la elección de ciertos parámetros utilizados por el modelo para definir el dominio, los cuales dependen de varios factores, por ejemplo, la resolución espacial, el tipo de proyección y de ser el caso los subdominios a utilizarse. El programa tiene licencia libre y se debe tener instalado Java y el módulo WPS del modelo WRF (o en su defecto tener acceso en red a una máquina Unix con dicho módulo instalado) para poder ejecutarlo.

---

<sup>2</sup><http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/downloads.html>

<sup>3</sup><http://sourceforge.net/projects/opengrads/files/>

### A.2.3 PARAMETRIZACIONES FÍSICAS

El modelo WRF cuenta con un conjunto de opciones físicas para simular los procesos que se desarrollan en la atmósfera. Estas opciones deben ser elegidas por el usuario de acuerdo a parámetros climáticos, tanto regionales como locales, propios de los dominios de estudio así como de la época del año en la cual sean estos generados. Las parametrizaciones incluyen a la mayoría de los procesos físicos involucrados en el desarrollo del estado atmosférico. Se parametriza por ejemplo la cobertura del suelo, el esquema de radiación tanto de onda corta como larga, la capa límite planetaria, el tipo de nubes, entre otros.

### A.2.4 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

El modelo tiene dos módulos principales: WPS y WRF. Dentro de WPS se ejecutan tres rutinas distintas que tienen las siguientes funciones: [Maya Néstor y Zambrano Miguel, 2010]

- **geogrid:** Crea la información del terreno a partir de los archivos estáticos de geog.
- **ungrib:** Desempaca la información meteorológica contenida en los archivos GRIB y la guarda en un formato intermedio.
- **metgrid:** Interpola horizontalmente los datos meteorológicos dentro del dominio.

Dentro del proceso WRF, se realizan los subprocesos:

- **real:** Interpola verticalmente los datos en las coordenadas del modelo.
- **wrf:** Genera el pronóstico.

### A.2.5 POSTPROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Después de obtener los archivos binarios, que contienen el análisis de la atmósfera generado por el modelo WRF, se procede a transformarlos en un formato legible para ser utilizado en el programa GrADS, esto se realiza con el software ARWpost (el cual se incluye como un módulo extra dentro de la página de descargas del modelo WRF). Con estos archivos se pueden obtener tanto gráficas en dos dimensiones como datos interpolados en texto claro de las variables con las que se va a trabajar. ARWpost permite interpolar los archivos en distintas formas para los niveles verticales en la atmósfera (z levels, pressure levels, nice height levels).

### A.2.6 EJECUCIÓN DEL MODELO WRF EN MODO CLIMA

Para ejecutar el modelo WRF en modo clima se deben obtener primero las condiciones iniciales de corridas de reanálisis a escala global. En este estudio se han elegido los modelos ERA Interim del ECMWF y FNL del NCEP/NCAR. Se deben realizar pequeñas adecuaciones en el modelo WRF

para leer los archivos de entrada generados por dichos modelos, estos datos provienen con distintas codificaciones de variables que deben ser especificadas en las tablas de preprocesamiento.

# B

## LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN Y ALGORITMOS

### B.1 GRADS (GRID ANALYSIS AND DISPLAY SYSTEM)

El Grid Analysis and Display System (GrADS) [COLA, 2012] es un software de visualización de datos científicos mantenido por el Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies (COLA); está disponible para distintos tipos de plataformas. Se utilizó principalmente el software OpenGrADS el cual es una versión modificada de GrADS que desarrolla interfaces avanzadas y extensiones basado en el motor de procesamiento de GrADS [da Silva Arlindo y Fiorino Mike, 2012].

Este programa ofrece la facilidad de manejar de manera sencilla las dimensiones del dominio que se quiere graficar. Se pueden extraer datos en formato de texto para ser utilizados con otro software, en este caso R. Permite también exportar la información en formato *kml* compatible con el conocido programa GoogleEarth. Se trabajó con GrADS para hacer el relleno espacial de las variables meteorológicas de la manera más sencilla posible. El programa incluye la función `oacres` que realiza el relleno mediante la metodología de análisis objetivo de Cressman.

### B.1.1 FUNCIÓN OACRES

La función `oacres` dentro de GrADS realiza un análisis objetivo de los datos de estaciones para que sean representados en una grilla.<sup>1</sup> Necesita de datos válidos en formato de estación, una variable en formato de la grilla a la que se quiere interpolar (el valor de la variable es ignorado) y de manera opcional se puede incluir un radio de acción.

## B.2 R

Se utiliza el software R [R Development Core Team, 2007] con licencia GNU, para realizar el procesamiento estadístico de datos atmosféricos. Este software presenta algunas ventajas para realizar el análisis de las series temporales, gracias a que tiene implementadas herramientas específicas para el tratamiento de series.

Debido a las dificultades en la adquisición de datos meteorológicos es imposible contar con una serie de datos que refleje de una manera fiel los eventos ocurridos, por esta razón se deben depurar los valores anómalos en los registros. Para depurar las series climatológicas se creó un programa aprovechando las características de vectorización del lenguaje R. Se eliminaron los datos duplicados y se rellenó con valores nulos la falta de información, esto debido a la dificultad de rellenar estos valores de una forma correcta y puesto que los valores nulos no afectan de ninguna manera el análisis de eventos extremos para la precipitación. Después de contar con una base de datos libre de lecturas duplicadas y de lagunas de información, se procedió a ubicar los eventos de precipitación según su duración y el tiempo transcurrido entre los mismos.

Para calcular las curvas IDF es necesario obtener la cantidad de precipitación para cada evento individual, siguiendo la metodología expuesta en el Capítulo 2 se desarrolló un programa en R que identifica cada evento y calcula la suma máxima para el período específico. El mismo se detalla a continuación:

```
library(chron)
library(xts)

chuva <- read.csv("new_pluies.txt",header=FALSE)
chuva <- data.frame(chuva$V2, chuva$V3, chuva$V5, chuva$V6)
colnames(chuva) <- c("estacion","captor","fecha","precip")

est.chuva <- c("P03","P08","P09","P10","P11","P12",
"P13","P15","P16","P17","P19","P20","P21","P23","P25")
```

---

<sup>1</sup>[www.iges.org/grads/gadoc/gradfuncoacres.html](http://www.iges.org/grads/gadoc/gradfuncoacres.html)

```

est.chuva <- unique(chuva$estacion)

blocks <- function(x) {
  z <- rle(x==0)
  breaks <- which(z$lengths >= 1 & z$values == TRUE)
  breaks <- breaks[!breaks %in% c(1, length(z$lengths))]
  break.idx <- cumsum(z$lengths) # $
  cbind(c(1, break.idx[breaks] + 1), c(break.idx[breaks-1],
length(x)))
}

longitud <- c(1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,
24,48,72,108,144,168,192,216,240,264,288,360)
#Longitud de la serie en registros cada 5 minutos

suma_series <- function(z) {
  z <- paste(z)
  print(z)
  z_ceros <- paste("./Instantaneos/Ceros/", z, sep="")
  z_comp <- paste("./Sumas/acu",z,sep="")
  ReadData <- read.zoo(z_ceros, index = list(1, 2),
format = "%Y-%m-%d %k:%M:%S", tz="", header=FALSE)
  SerieCeros <- as.xts(ReadData, order.by =index(ReadData))

principal <- function(x) {
  largo <- x*5
  print(largo)
  nomb_arch <- paste(z_comp, largo, sep="_")
  acu_serie <- rollapply(SerieCeros, FUN = "sum",
by = 1, width = x, align = "right")
  core.acu <- coredata(acu_serie)[,1]
  maxubic <- apply(blocks(core.acu), 1, function(i)
{which.max(core.acu[i[1]:i[2]]) + i[1] - 1})
  s.max <- acu_serie[maxubic]
  #s.max[s.max==0.1] = NA #Eliminar 0.1
  #s.max[s.max==0.2] = NA
  s.max <- s.max[!is.na(coredata(s.max))]
  write.zoo(s.max, file = nomb_arch, col.names = FALSE)
}

lapply(longitud, principal)

```



```
}
```

```
lapply(est.chuva, suma_series)
```

### B.3 BASH

El lenguaje de programación Bash se utiliza para el control general de los procesos dentro de un sistema Linux, este proporciona facilidad en la ejecución de los subprocesos del modelo WRF así como la posibilidad de generar un registro de errores, la organización de los archivos en carpetas de acuerdo a la fecha y propiedades de los archivos generados. Permite también manipular fechas de manera muy sencilla mediante el reloj del sistema.

Mediante el uso de Bash se automatizaron todos los procesos del modelo WRF utilizando el demonio cron. La ejecución del modelo operacional en modo *batch* (procesamiento por lotes) permite un uso del recurso computacional de una manera más eficiente, libre de la interacción de un operador en la generación del análisis. Por ejemplo, en el proyecto PGA [Maya Néstor y Zambrano Miguel, 2010] el servidor dedicado al pronóstico realiza la generación de reportes climatológicos diarios. El proceso inicia con la descarga de la información, y termina con el envío del reporte en formato *pdf* al correo electrónico de los usuarios de manera desatendida. Este tipo de procesamiento implica que un experto no analiza la información proporcionada por el modelo lo cual puede producir que un usuario final malinterprete los resultados del análisis atmosférico.

### B.4 LISTA DE CÓDIGOS

A continuación se detallan los códigos desarrollados en este trabajo y una breve descripción de su uso. No se detallan los scripts en GrADS, puesto que estos se encuentran incrustados dentro de los ejecutables en Bash.

#### **Bash**

- `arwpost.sh`: Control de postprocesamiento de las salidas del modelo WRF.
- `changer.sh`: Edición de la ubicación de las estaciones en el archivo `csv` generado en R.
- `descarga-ERA.sh`: Automatización de la descarga de los datos de entrada provenientes del modelo ERA Interim. No se adjunta este script debido a que contiene contraseñas en texto plano.
- `descarga-FNL.sh`: Automatización de la descarga de los datos de entrada provenientes del modelo FNL. No se adjunta este script debido a que contiene contraseñas en texto plano.

- `validacion.sh`: Control y generación de la validación de eventos meteorológicos extremos extremos. Realiza el relleno espacial, adecúa las salidas del modelo, genera las comparaciones y la ubicación de los episodios para los períodos simulados. Calcula el RMSE.
- `wrf-ERA-Interim.sh`: Control de corrida del modelo WRF con los datos de reanálisis ERA-Interim.
- `wrf-FNL.sh`: Control de corrida del modelo WRF con los datos de reanálisis FNL.

## R

- `dendograma.R`: Generación de dendogramas mediante los métodos UPGMA y Ward. Creación de correlogramas y de matrices de correlación para las intensidades máximas.
- `fechas.R`: Generación de archivos con los eventos extremos clasificados por estación y por duración.
- `HCPC.R`: Generación del análisis HCPC y creación de imágenes de resultados.
- `hieto.R`: Creación de hietogramas para la estación y evento seleccionado.
- `imagenes.R`: Generación de gráficos para las series temporales de precipitación acumuladas por estación y para los distintos períodos.
- `img.clas.R`: Creación de imágenes de precipitación acumulada junto a su cluster por cada estación.
- `localizacion.R`: Script de ayuda para determinar la ubicación temporal de un evento.
- `pre-tratamiento.R`: Lectura de la base de datos original, depuración de datos y creación de series por estación rellenas.
- `sumas.R`: Identificación de eventos y generación de sumas parciales para cada duración especificada.
- `validacion.R`: Creación de archivos csv de precipitación acumulada cada tres horas del grupo de estaciones, chequeo de valores anómalos.
- `xytot.R`: Generación de una imagen de precipitación acumulada y clasificación, para el total de eventos analizados en este estudio.



## CURVAS IDF

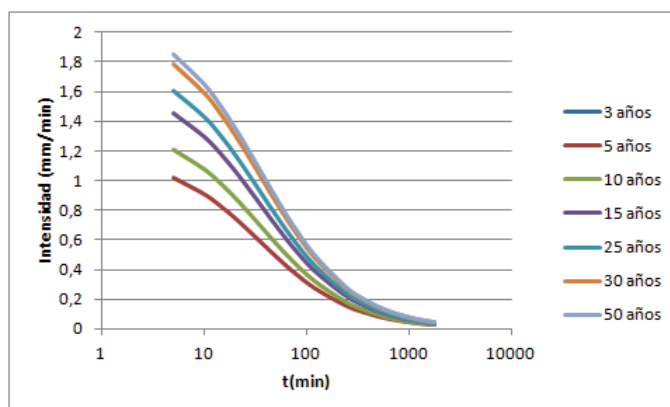
Con las series temporales depuradas de los registros pluviométricos cada 5 minutos, en todas las estaciones de la EPMAPS estudiadas, se calculó las series de precipitación máxima para las duraciones de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70 y 75 minutos y 2, 4, 6, 9, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24 y 30 horas como se puede ver en el Anexo B.2, a continuación se utilizó la función de distribución Gamma y luego de hacer varios ensayos se utilizó la fórmula descrita por Sherman con una modificación, como se explica en 2, obteniendo de esta manera una relación muy aceptable para las curvas de Intensidad Duración y Frecuencia.

A continuación, se presentan para cada una de las estaciones las siguientes láminas:

- El nombre de la estación Pluviométrica y el código de la EPMAPS.
- La ecuación IDF calculada, con  $I$  (mm/min),  $t$  (minutos) y  $T$  (años).
- La Figura de la intensidad de precipitación  $I$ , para cada período de retorno  $T$ , con la duración  $t$  en escala logarítmica.
- Un Cuadro donde se presenta, la cantidad de precipitación máxima en (mm) para cada duración en los respectivos períodos de retorno.

**INTENSIDAD DURACIÓN FRECUENCIA**  
**ESTACIÓN: RUMIHURCO-MACHANGARA P03**

$$I(t, T) = \frac{11.7843 \log T + 20.6591}{(33.9898 + t)^{0.9529}}$$



**Figura C.1:** Intensidad máxima de precipitación (mm/min), escala logarítmica.

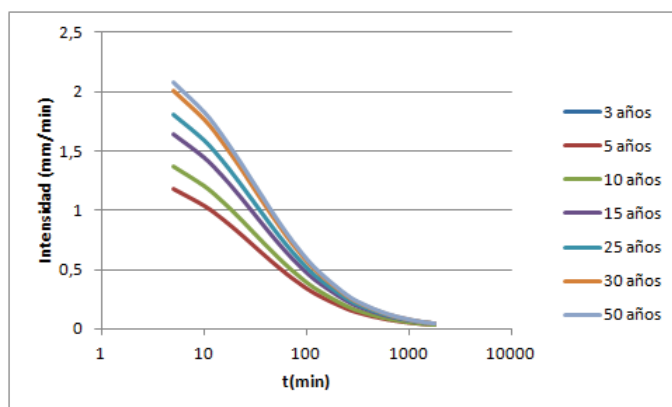
t(min)	Período de retorno T(años)						
	3	5	10	15	25	30	50
5	5.1	6.0	7.3	8.0	8.9	9.3	10.2
10	9.1	10.8	13.0	14.3	15.9	16.5	18.1
15	12.4	14.6	17.6	19.3	21.5	22.3	24.5
20	15.0	17.7	21.4	23.5	26.2	27.1	29.8
25	17.3	20.3	24.5	27.0	30.1	31.2	34.3
30	19.2	22.6	27.2	30.0	33.4	34.6	38.1
35	20.8	24.5	29.6	32.5	36.3	37.6	41.3
40	22.2	26.2	31.6	34.8	38.8	40.2	44.2
45	23.5	27.7	33.4	36.8	41.0	42.5	46.7
50	24.6	29.1	35.0	38.5	43.0	44.5	48.9
55	25.6	30.2	36.5	40.1	44.7	46.4	51.0
60	26.6	31.3	37.8	41.5	46.3	48.0	52.8
120	33.2	39.1	47.2	51.9	57.9	60.0	65.9
240	38.3	45.2	54.5	60.0	66.8	69.3	76.1
360	40.7	48.0	57.8	63.6	70.9	73.5	80.8
540	42.6	50.3	60.6	66.7	74.3	77.0	84.7
720	43.8	51.7	62.3	68.5	76.4	79.2	87.0
960	44.9	52.9	63.8	70.2	78.3	81.1	89.2
1200	45.7	53.8	64.9	71.4	79.6	82.5	90.7
1440	46.3	54.5	65.8	72.4	80.7	83.6	91.9
1800	47.0	55.4	66.8	73.5	81.9	84.9	93.3

**Cuadro C.1:** Cantidad de precipitación máxima (mm)

Elaboración: Los autores.

**INTENSIDAD DURACIÓN FRECUENCIA**  
**ESTACIÓN: RUMIPAMBA BODEGAS P08**

$$I(t, T) = \frac{10.4503 \log T + 19.9919}{(28.9484 + t)^{0.9327}}$$



**Figura C.2:** Intensidad máxima de precipitación (mm/min), escala logarítmica.

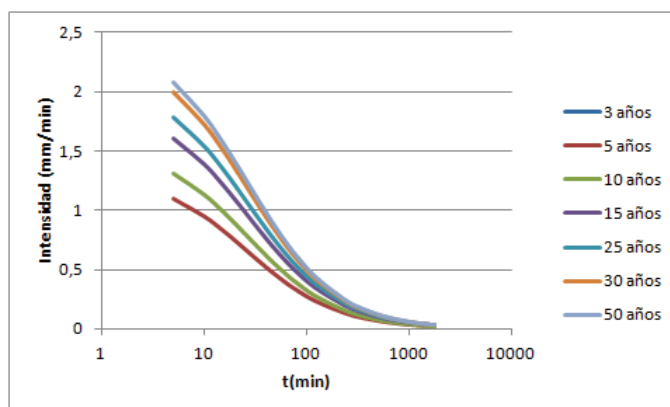
t(min)	Período de retorno T(años)						
	3	5	10	15	25	30	50
5	5.9	6.9	8.2	9.0	10.0	10.4	11.4
10	10.3	12.1	14.5	15.9	17.6	18.2	20.0
15	13.9	16.2	19.4	21.3	23.6	24.4	26.8
20	16.7	19.5	23.4	25.6	28.5	29.5	32.3
25	19.1	22.3	26.7	29.3	32.5	33.7	36.9
30	21.1	24.6	29.5	32.3	35.9	37.2	40.8
35	22.8	26.7	31.9	35.0	38.8	40.2	44.1
40	24.3	28.4	34.0	37.2	41.4	42.8	47.0
45	25.6	29.9	35.8	39.3	43.6	45.1	49.5
50	26.7	31.3	37.4	41.0	45.6	47.2	51.7
55	27.8	32.5	38.9	42.6	47.3	49.0	53.7
60	28.7	33.6	40.2	44.1	48.9	50.7	55.5
120	35.5	41.5	49.7	54.5	60.5	62.7	68.7
240	40.9	47.9	57.3	62.8	69.7	72.2	79.2
360	43.5	50.9	60.9	66.8	74.1	76.8	84.2
540	45.8	53.5	64.1	70.2	78.0	80.8	88.5
720	47.2	55.2	66.1	72.5	80.5	83.3	91.4
960	48.6	56.8	68.0	74.6	82.8	85.7	94.0
1200	49.6	58.0	69.4	76.1	84.5	87.5	95.9
1440	50.4	58.9	70.5	77.3	85.9	88.9	97.5
1800	51.3	60.1	71.9	78.8	87.5	90.6	99.3

**Cuadro C.2:** Cantidad de precipitación máxima (mm)

Elaboración: Los autores.

**INTENSIDAD DURACIÓN FRECUENCIA**  
**ESTACIÓN: IÑAQUITO-INAMHI P09**

$$I(t, T) = \frac{13.5806 \log T + 20.0822}{(26.7556 + t)^{0.9996}}$$



**Figura C.3:** Intensidad máxima de precipitación (mm/min), escala logarítmica.

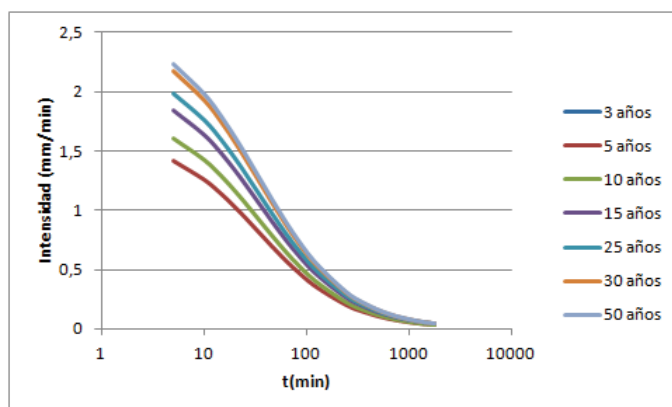
t(min)	Período de retorno T(años)						
	3	5	10	15	25	30	50
5	5.5	6.6	8.0	8.9	10.0	10.4	11.5
10	9.5	11.4	13.9	15.4	17.3	17.9	19.8
15	12.5	15.0	18.4	20.3	22.8	23.7	26.2
20	14.9	17.8	21.8	24.2	27.1	28.2	31.1
25	16.8	20.1	24.7	27.3	30.6	31.8	35.2
30	18.4	22.0	27.0	29.9	33.5	34.8	38.5
35	19.7	23.6	28.9	32.0	35.9	37.3	41.3
40	20.8	25.0	30.6	33.9	38.0	39.5	43.6
45	21.8	26.1	32.0	35.4	39.8	41.3	45.6
50	22.7	27.2	33.2	36.8	41.3	42.9	47.4
55	23.4	28.0	34.3	38.0	42.7	44.3	48.9
60	24.1	28.8	35.3	39.1	43.8	45.5	50.3
120	28.4	34.1	41.7	46.2	51.8	53.8	59.4
240	31.2	37.4	45.8	50.8	56.9	59.2	65.3
360	32.3	38.7	47.4	52.5	58.9	61.2	67.6
540	33.1	39.6	48.5	53.7	60.2	62.6	69.1
720	33.4	40.1	49.1	54.3	60.9	63.3	69.9
960	33.7	40.4	49.5	54.8	61.5	63.8	70.5
1200	33.9	40.6	49.7	55.1	61.8	64.2	70.9
1440	34.0	40.8	49.9	55.2	62.0	64.4	71.1
1800	34.1	40.9	50.1	55.4	62.2	64.6	71.4

**Cuadro C.3:** Cantidad de precipitación máxima (mm)

Elaboración: Los autores.

**INTENSIDAD DURACIÓN FRECUENCIA**  
**ESTACIÓN: DAC-AEROPUERTO P10**

$$I(t, T) = \frac{13.9378 \log T + 40.7176}{(35.5037 + t)^{0.9997}}$$



**Figura C.4:** Intensidad máxima de precipitación (mm/min), escala logarítmica.

t(min)	Período de retorno T(años)						
	3	5	10	15	25	30	50
5	7.1	8.0	9.2	9.9	10.8	11.2	12.1
10	12.6	14.2	16.4	17.7	19.3	19.8	21.4
15	17.0	19.2	22.1	23.8	26.0	26.7	28.9
20	20.6	23.2	26.7	28.8	31.4	32.4	35.0
25	23.6	26.6	30.6	33.0	36.0	37.1	40.1
30	26.1	29.4	33.9	36.5	39.9	41.0	44.4
35	28.3	31.8	36.7	39.6	43.2	44.4	48.0
40	30.1	33.9	39.1	42.2	46.0	47.4	51.2
45	31.8	35.8	41.3	44.5	48.5	49.9	54.0
50	33.2	37.4	43.1	46.5	50.7	52.2	56.4
55	34.5	38.9	44.8	48.3	52.7	54.2	58.6
60	35.6	40.1	46.3	49.9	54.4	56.0	60.6
120	43.6	49.1	56.6	61.0	66.6	68.5	74.1
240	49.1	55.3	63.8	68.7	74.9	77.2	83.4
360	51.2	57.7	66.6	71.7	78.2	80.6	87.1
540	52.8	59.5	68.6	73.9	80.6	83.0	89.7
720	53.6	60.4	69.6	75.0	81.8	84.3	91.1
960	54.2	61.1	70.4	75.9	82.8	85.2	92.1
1200	54.6	61.5	70.9	76.4	83.4	85.8	92.8
1440	54.8	61.8	71.3	76.8	83.8	86.2	93.2
1800	55.1	62.1	71.6	77.2	84.2	86.7	93.7

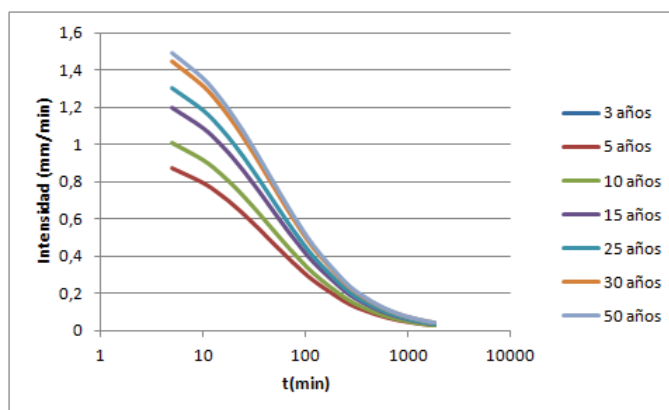
**Cuadro C.4:** Cantidad de precipitación máxima (mm).

Elaboración: Los autores.



**INTENSIDAD DURACIÓN FRECUENCIA**  
**ESTACIÓN: ANTENAS P11**

$$I(t, T) = \frac{13.1725 \log T + 27.8643}{(44.6890 + t)^{0.9948}}$$



**Figura C.5:** Intensidad máxima de precipitación (mm/min), escala logarítmica.

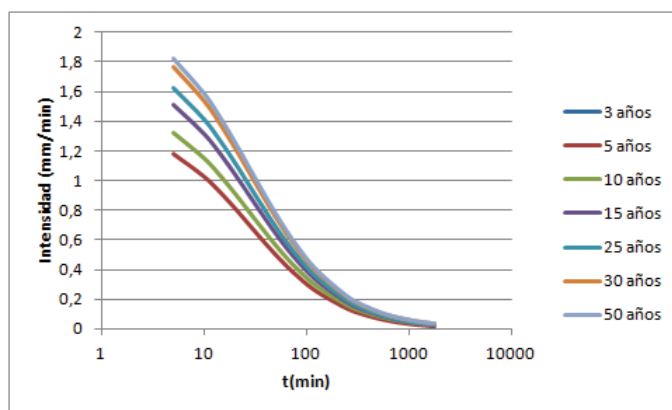
t(min)	Período de retorno T(años)						
	3	5	10	15	25	30	50
5	4.3	5.0	6.0	6.5	7.2	7.5	8.2
10	7.9	9.2	10.9	11.9	13.1	13.6	14.8
15	10.9	12.6	14.9	16.3	18.0	18.6	20.4
20	13.4	15.5	18.4	20.1	22.2	23.0	25.1
25	15.5	18.0	21.3	23.3	25.8	26.6	29.1
30	17.4	20.1	23.9	26.1	28.9	29.8	32.6
35	19.0	22.0	26.1	28.5	31.6	32.6	35.7
40	20.5	23.7	28.1	30.7	33.9	35.1	38.4
45	21.7	25.2	29.9	32.6	36.1	37.3	40.8
50	22.9	26.5	31.5	34.3	38.0	39.3	42.9
55	23.9	27.7	32.9	35.9	39.7	41.0	44.8
60	24.8	28.8	34.2	37.3	41.2	42.6	46.6
120	31.7	36.7	43.5	47.5	52.6	54.3	59.4
240	36.7	42.6	50.5	55.1	61.0	63.1	68.9
360	38.8	45.0	53.4	58.3	64.5	66.7	72.8
540	40.4	46.8	55.5	60.6	67.0	69.3	75.8
720	41.2	47.8	56.7	61.9	68.4	70.8	77.3
960	41.9	48.6	57.6	62.9	69.6	71.9	78.6
1200	42.3	49.1	58.2	63.5	70.3	72.7	79.4
1440	42.6	49.4	58.6	64.0	70.7	73.2	79.9
1800	42.9	49.8	59.0	64.4	71.2	73.7	80.5

**Cuadro C.5:** Cantidad de precipitación máxima (mm).

Elaboración: Los autores.

**INTENSIDAD DURACIÓN FRECUENCIA**  
**ESTACIÓN: TOCTIUCO P12**

$$I(t, T) = \frac{9.3185 \log T + 29.0457}{(28.4065 + t)^{0.9993}}$$



**Figura C.6:** Intensidad máxima de precipitación (mm/min), escala logarítmica.

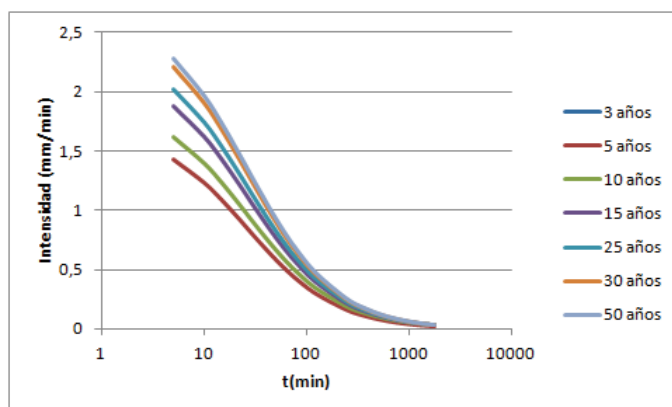
t(min)	Período de retorno T(años)						
	3	5	10	15	25	30	50
5	5.9	6.6	7.6	8.1	8.9	9.1	9.8
10	10.3	11.5	13.2	14.2	15.4	15.8	17.1
15	13.6	15.3	17.5	18.8	20.4	21.0	22.7
20	16.3	18.2	20.9	22.5	24.5	25.2	27.1
25	18.4	20.7	23.7	25.5	27.7	28.5	30.7
30	20.2	22.7	26.0	27.9	30.4	31.3	33.7
35	21.7	24.4	27.9	30.0	32.7	33.6	36.2
40	23.0	25.8	29.6	31.8	34.6	35.6	38.4
45	24.1	27.1	31.0	33.4	36.3	37.3	40.3
50	25.1	28.2	32.3	34.7	37.7	38.8	41.9
55	26.0	29.1	33.4	35.9	39.0	40.2	43.3
60	26.7	30.0	34.4	36.9	40.2	41.3	44.6
120	31.9	35.7	41.0	44.0	47.9	49.3	53.1
240	35.2	39.5	45.3	48.7	53.0	54.5	58.8
360	36.5	41.0	47.0	50.5	54.9	56.5	60.9
540	37.5	42.0	48.2	51.8	56.3	57.9	62.5
720	37.9	42.5	48.8	52.4	57.0	58.7	63.3
960	38.3	43.0	49.3	52.9	57.6	59.2	63.9
1200	38.5	43.2	49.5	53.3	57.9	59.6	64.3
1440	38.7	43.4	49.7	53.5	58.2	59.8	64.5
1800	38.8	43.6	49.9	53.7	58.4	60.1	64.8

**Cuadro C.6:** Cantidad de precipitación máxima (mm).

Elaboración: Los autores.

**INTENSIDAD DURACIÓN FRECUENCIA**  
**ESTACIÓN: CUMBAYÁ P13**

$$I(t, T) = \frac{11.6546 \log T + 31.9457}{(26.4166 + t)^{0.9999}}$$



**Figura C.7:** Intensidad máxima de precipitación (mm/min), escala logarítmica.

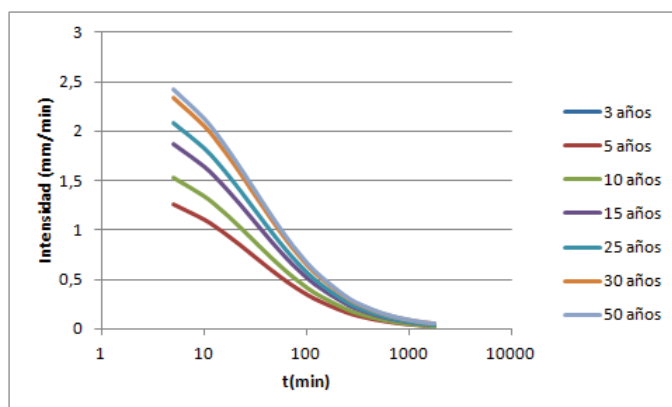
t(min)	Período de retorno T(años)						
	3	5	10	15	25	30	50
5	7.1	8.1	9.4	10.1	11.1	11.4	12.3
10	12.3	13.9	16.1	17.4	19.1	19.7	21.3
15	16.2	18.4	21.3	23.0	25.2	25.9	28.1
20	19.3	21.9	25.3	27.4	29.9	30.9	33.4
25	21.8	24.7	28.6	30.9	33.8	34.8	37.7
30	23.8	27.0	31.3	33.8	37.0	38.1	41.2
35	25.5	28.9	33.5	36.2	39.6	40.8	44.2
40	27.0	30.5	35.4	38.3	41.9	43.1	46.7
45	28.2	32.0	37.1	40.0	43.8	45.1	48.9
50	29.3	33.2	38.5	41.6	45.5	46.9	50.8
55	30.2	34.3	39.7	42.9	46.9	48.4	52.4
60	31.1	35.2	40.8	44.1	48.2	49.7	53.9
120	36.7	41.6	48.2	52.1	57.0	58.7	63.6
240	40.3	45.7	53.0	57.2	62.6	64.5	69.9
360	41.7	47.3	54.8	59.2	64.8	66.7	72.3
540	42.7	48.4	56.1	60.6	66.3	68.3	74.0
720	43.2	48.9	56.7	61.3	67.0	69.1	74.8
960	43.6	49.4	57.2	61.8	67.6	69.7	75.5
1200	43.8	49.6	57.6	62.2	68.0	70.1	75.9
1440	44.0	49.8	57.8	62.4	68.3	70.3	76.2
1800	44.1	50.0	58.0	62.6	68.5	70.6	76.5

**Cuadro C.7:** Cantidad de precipitación máxima (mm).

Elaboración: Los autores.

**INTENSIDAD DURACIÓN FRECUENCIA**  
**ESTACIÓN: EL CINTO P15**

$$I(t, T) = \frac{15.4566 \log T + 21.8338}{(29.5855 + t)^{0.9659}}$$



**Figura C.8:** Intensidad máxima de precipitación (mm/min), escala logarítmica.

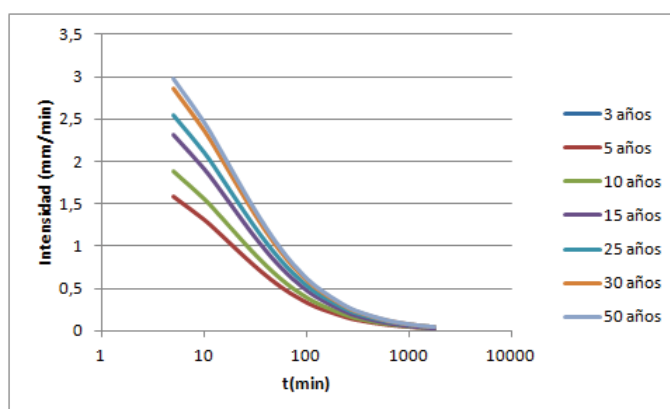
t(min)	Período de retorno T(años)						
	3	5	10	15	25	30	50
5	6.3	7.6	9.4	10.4	11.7	12.1	13.4
10	11.1	13.4	16.4	18.2	20.5	21.3	23.6
15	14.9	17.9	22.0	24.4	27.4	28.5	31.5
20	17.9	21.5	26.5	29.3	33.0	34.3	37.9
25	20.4	24.5	30.1	33.4	37.6	39.0	43.2
30	22.5	27.0	33.2	36.9	41.4	43.0	47.6
35	24.2	29.2	35.9	39.8	44.7	46.5	51.4
40	25.8	31.0	38.1	42.3	47.5	49.4	54.7
45	27.1	32.6	40.1	44.5	50.0	52.0	57.5
50	28.3	34.1	41.9	46.4	52.2	54.2	60.0
55	29.4	35.3	43.4	48.2	54.1	56.3	62.2
60	30.3	36.5	44.8	49.7	55.9	58.1	64.2
120	36.9	44.4	54.6	60.6	68.1	70.8	78.3
240	41.8	50.3	61.8	68.6	77.1	80.1	88.6
360	43.9	52.9	65.0	72.1	81.0	84.2	93.2
540	45.7	55.0	67.6	74.9	84.2	87.5	96.8
720	46.7	56.2	69.1	76.6	86.1	89.5	99.0
960	47.6	57.3	70.4	78.1	87.8	91.3	101.0
1200	48.3	58.1	71.4	79.2	89.0	92.5	102.3
1440	48.7	58.7	72.1	80.0	89.9	93.4	103.3
1800	49.3	59.3	72.9	80.9	90.9	94.5	104.5

**Cuadro C.8:** Cantidad de precipitación máxima (mm).

Elaboración: Los autores.

**INTENSIDAD DURACIÓN FRECUENCIA**  
**ESTACIÓN: IZOBAMBA P16**

$$I(t, T) = \frac{10.9896 \log T + 10.6041}{(17.1663 + t)^{0.9359}}$$



**Figura C.9:** Intensidad máxima de precipitación (mm/min), escala logarítmica.

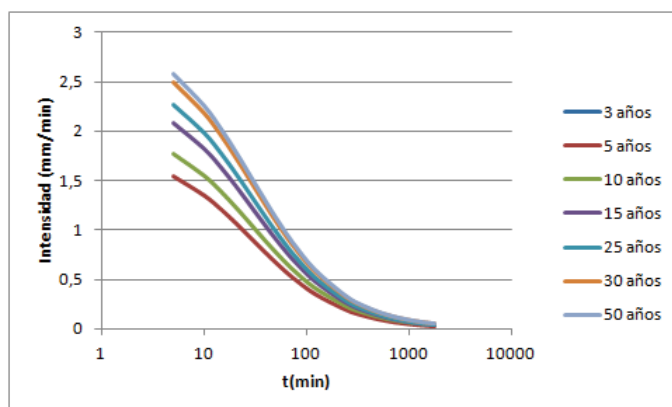
t(min)	Período de retorno T(años)						
	3	5	10	15	25	30	50
5	7.9	9.4	11.5	12.8	14.3	14.8	16.4
10	13.0	15.6	19.1	21.1	23.6	24.6	27.1
15	16.7	20.0	24.4	27.0	30.3	31.4	34.7
20	19.5	23.3	28.4	31.5	35.3	36.6	40.4
25	21.6	25.8	31.6	34.9	39.2	40.7	44.9
30	23.3	27.9	34.1	37.7	42.3	43.9	48.5
35	24.8	29.6	36.2	40.1	44.9	46.7	51.5
40	26.0	31.1	38.0	42.0	47.1	48.9	54.0
45	27.0	32.3	39.5	43.7	49.0	50.9	56.2
50	28.0	33.4	40.8	45.2	50.7	52.6	58.1
55	28.7	34.4	42.0	46.5	52.1	54.1	59.7
60	29.5	35.2	43.0	47.6	53.4	55.4	61.2
120	34.4	41.1	50.3	55.6	62.3	64.7	71.5
240	38.2	45.7	55.8	61.7	69.2	71.9	79.4
360	40.0	47.9	58.5	64.7	72.6	75.3	83.2
540	41.7	49.8	60.9	67.4	75.5	78.4	86.6
720	42.8	51.1	62.5	69.1	77.5	80.5	88.9
960	43.8	52.4	64.0	70.8	79.4	82.4	91.0
1200	44.6	53.3	65.1	72.1	80.8	83.9	92.6
1440	45.2	54.0	66.0	73.1	81.9	85.1	93.9
1800	45.9	54.9	67.1	74.3	83.3	86.5	95.5

**Cuadro C.9:** Cantidad de precipitación máxima (mm).

Elaboración: Los autores.

**INTENSIDAD DURACIÓN FRECUENCIA**  
**ESTACIÓN: EL TINGO P17**

$$I(t, T) = \frac{15.6465 \log T + 36.7706}{(29.8972 + t)^{0.9998}}$$



**Figura C.10:** Intensidad máxima de precipitación (mm/min), escala logarítmica.

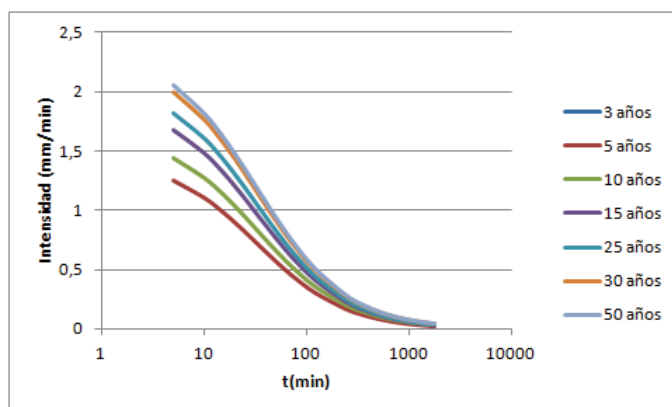
t(min)	Período de retorno T(años)						
	3	5	10	15	25	30	50
5	7.7	8.9	10.4	11.3	12.5	12.9	14.0
10	13.5	15.5	18.3	19.9	21.9	22.6	24.6
15	18.0	20.7	24.3	26.5	29.1	30.1	32.8
20	21.6	24.9	29.2	31.7	35.0	36.1	39.3
25	24.6	28.2	33.2	36.1	39.7	41.0	44.7
30	27.0	31.1	36.5	39.7	43.7	45.1	49.1
35	29.1	33.4	39.3	42.7	47.0	48.6	52.9
40	30.9	35.5	41.7	45.3	49.9	51.5	56.1
45	32.4	37.3	43.8	47.6	52.4	54.1	58.9
50	33.8	38.8	45.6	49.6	54.6	56.4	61.4
55	35.0	40.2	47.2	51.3	56.5	58.3	63.5
60	36.0	41.4	48.6	52.9	58.2	60.1	65.5
120	43.2	49.6	58.3	63.4	69.8	72.1	78.5
240	48.0	55.1	64.8	70.5	77.6	80.1	87.2
360	49.9	57.3	67.3	73.2	80.5	83.2	90.6
540	51.2	58.8	69.1	75.1	82.7	85.4	93.0
720	51.9	59.6	70.0	76.1	83.8	86.5	94.2
960	52.4	60.2	70.7	76.9	84.6	87.4	95.1
1200	52.7	60.5	71.1	77.3	85.1	87.9	95.7
1440	52.9	60.8	71.4	77.6	85.5	88.3	96.1
1800	53.2	61.0	71.7	78.0	85.8	88.6	96.5

**Cuadro C.10:** Cantidad de precipitación máxima (mm).

Elaboración: Los autores.

**INTENSIDAD DURACIÓN FRECUENCIA**  
**ESTACIÓN: LA TOLA P19**

$$I(t, T) = \frac{3.2763 \log T + 33.2727}{(33.1217 + t)^{0.9998}}$$



**Figura C.11:** Intensidad máxima de precipitación (mm/min), escala logarítmica.

t(min)	Período de retorno T(años)						
	3	5	10	15	25	30	50
5	6.3	7.2	8.4	9.1	10.0	10.3	11.2
10	11.1	12.7	14.8	16.1	17.6	18.2	19.8
15	14.9	17.0	19.9	21.6	23.7	24.5	26.6
20	18.0	20.6	24.1	26.1	28.6	29.5	32.1
25	20.6	23.5	27.5	29.8	32.7	33.8	36.7
30	22.8	26.0	30.4	32.9	36.2	37.3	40.5
35	24.6	28.1	32.8	35.6	39.1	40.3	43.8
40	26.2	29.9	35.0	37.9	41.6	42.9	46.6
45	27.6	31.5	36.8	39.9	43.8	45.2	49.1
50	28.8	32.9	38.4	41.7	45.8	47.2	51.3
55	29.9	34.1	39.9	43.2	47.5	49.0	53.2
60	30.9	35.2	41.2	44.6	49.0	50.6	54.9
120	37.5	42.9	50.1	54.3	59.6	61.5	66.8
240	42.1	48.1	56.2	60.9	66.9	69.0	75.0
360	43.9	50.1	58.5	63.5	69.7	71.9	78.1
540	45.1	51.5	60.2	65.3	71.7	74.0	80.4
720	45.8	52.3	61.1	66.3	72.7	75.1	81.6
960	46.3	52.9	61.8	67.0	73.6	75.9	82.5
1200	46.6	53.2	62.2	67.5	74.1	76.4	83.0
1440	46.8	53.5	62.5	67.8	74.4	76.8	83.4
1800	47.1	53.7	62.8	68.1	74.7	77.1	83.8

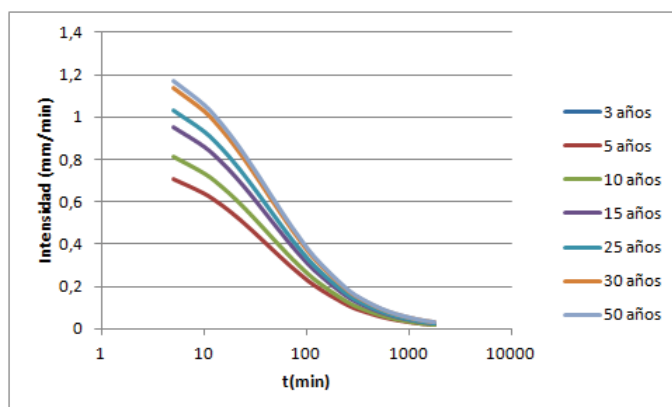
**Cuadro C.11:** Cantidad de precipitación máxima (mm).

Elaboración: Los autores.



**INTENSIDAD DURACIÓN FRECUENCIA**  
**ESTACIÓN: CALDERON P20**

$$I(t, T) = \frac{9.3756 \log T + 22.6219}{(41.6779 + t)^{0.9989}}$$



**Figura C.12:** Intensidad máxima de precipitación (mm/min), escala logarítmica.

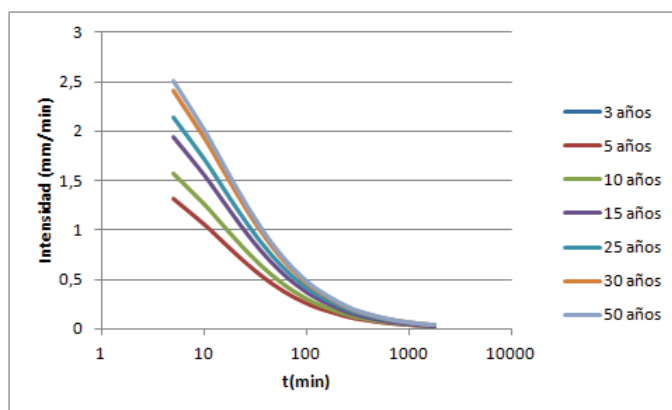
t(min)	Período de retorno T(años)						
	3	5	10	15	25	30	50
5	3.5	4.1	4.8	5.2	5.7	5.9	6.4
10	6.4	7.3	8.6	9.3	10.3	10.6	11.5
15	8.8	10.0	11.8	12.8	14.0	14.5	15.8
20	10.7	12.3	14.4	15.6	17.2	17.8	19.3
25	12.4	14.2	16.7	18.1	19.9	20.5	22.3
30	13.8	15.9	18.6	20.2	22.2	22.9	24.9
35	15.1	17.3	20.3	22.0	24.2	25.0	27.2
40	16.2	18.6	21.8	23.6	26.0	26.8	29.2
45	17.2	19.7	23.1	25.0	27.5	28.4	30.9
50	18.0	20.7	24.2	26.3	28.9	29.9	32.5
55	18.8	21.6	25.3	27.5	30.2	31.2	33.9
60	19.5	22.4	26.2	28.5	31.3	32.3	35.2
120	24.6	28.1	33.0	35.8	39.4	40.7	44.3
240	28.2	32.3	37.9	41.2	45.3	46.7	50.8
360	29.7	34.0	39.9	43.3	47.6	49.2	53.5
540	30.8	35.3	41.3	44.9	49.4	51.0	55.4
720	31.3	35.9	42.1	45.7	50.3	51.9	56.5
960	31.8	36.4	42.7	46.4	51.0	52.6	57.3
1200	32.1	36.7	43.1	46.8	51.4	53.1	57.8
1440	32.3	36.9	43.3	47.0	51.7	53.4	58.1
1800	32.4	37.2	43.6	47.3	52.0	53.7	58.4

**Cuadro C.12:** Cantidad de precipitación máxima (mm).

Elaboración: Los autores.

**INTENSIDAD DURACIÓN FRECUENCIA**  
**ESTACIÓN: CHILLOGALLO P21**

$$I(t, T) = \frac{6.6120 \log T + 9.5343}{(12.7538 + t)^{0.8858}}$$



**Figura C.13:** Intensidad máxima de precipitación (mm/min), escala logarítmica.

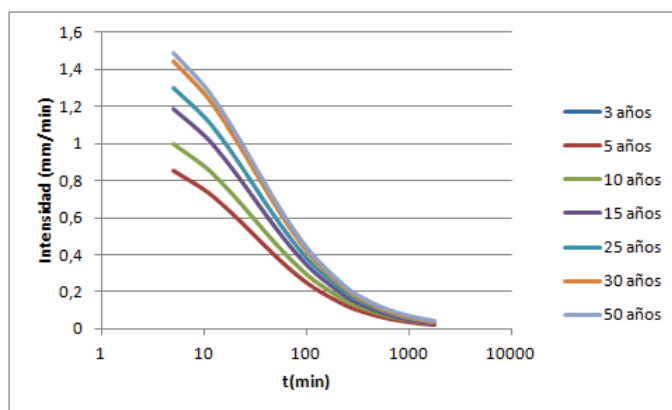
t(min)	Período de retorno T(años)						
	3	5	10	15	25	30	50
5	6.6	7.9	9.7	10.7	12.1	12.5	13.8
10	10.5	12.7	15.5	17.2	19.3	20.1	22.2
15	13.3	15.9	19.6	21.7	24.3	25.3	28.0
20	15.3	18.3	22.5	25.0	28.0	29.1	32.2
25	16.8	20.2	24.8	27.5	30.9	32.1	35.5
30	18.1	21.7	26.7	29.6	33.2	34.5	38.1
35	19.1	23.0	28.2	31.3	35.1	36.5	40.3
40	20.0	24.1	29.5	32.7	36.7	38.2	42.2
45	20.8	25.0	30.6	34.0	38.1	39.6	43.8
50	21.5	25.8	31.6	35.1	39.4	40.9	45.2
55	22.1	26.5	32.5	36.0	40.5	42.1	46.5
60	22.6	27.1	33.3	36.9	41.5	43.1	47.6
120	26.5	31.9	39.1	43.3	48.7	50.6	55.9
240	30.0	36.0	44.2	49.0	55.0	57.2	63.2
360	31.9	38.3	47.0	52.1	58.5	60.8	67.2
540	33.7	40.5	49.7	55.1	61.9	64.3	71.1
720	35.0	42.1	51.7	57.2	64.3	66.8	73.9
960	36.4	43.7	53.6	59.4	66.7	69.3	76.6
1200	37.4	44.9	55.1	61.1	68.6	71.3	78.8
1440	38.2	45.9	56.3	62.4	70.1	72.9	80.6
1800	39.3	47.2	57.9	64.1	72.0	74.9	82.8

**Cuadro C.13:** Cantidad de precipitación máxima (mm).

Elaboración: Los autores.

**INTENSIDAD DURACIÓN FRECUENCIA**  
**ESTACIÓN: ATACAZO P23**

$$I(t, T) = \frac{6.3114 \log T + 12.4481}{(27.7446 + t)^{0.8954}}$$



**Figura C.14:** Intensidad máxima de precipitación (mm/min), escala logarítmica.

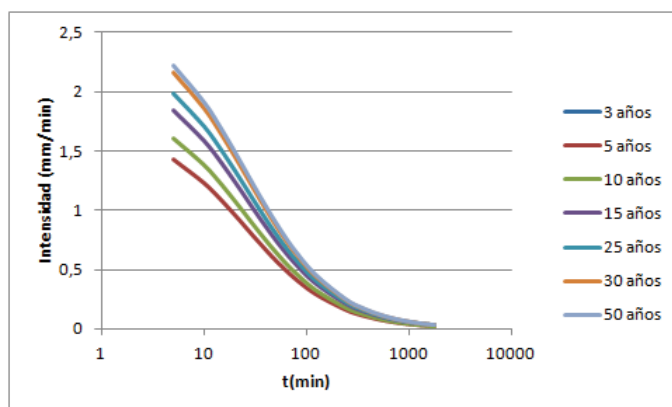
t(min)	Período de retorno T(años)						
	3	5	10	15	25	30	50
5	4.3	5.0	5.9	6.5	7.2	7.5	8.2
10	7.5	8.8	10.4	11.4	12.7	13.1	14.4
15	10.1	11.7	14.0	15.4	17.0	17.6	19.3
20	12.2	14.2	16.9	18.5	20.6	21.3	23.3
25	13.9	16.2	19.4	21.2	23.5	24.3	26.7
30	15.4	17.9	21.4	23.5	26.0	26.9	29.5
35	16.7	19.4	23.2	25.4	28.2	29.2	31.9
40	17.8	20.7	24.8	27.1	30.1	31.1	34.1
45	18.8	21.9	26.1	28.6	31.7	32.8	36.0
50	19.7	22.9	27.4	30.0	33.2	34.4	37.7
55	20.4	23.8	28.5	31.2	34.6	35.8	39.2
60	21.2	24.7	29.5	32.3	35.8	37.0	40.5
120	26.5	31.0	37.0	40.5	44.9	46.4	50.9
240	31.2	36.4	43.4	47.5	52.7	54.5	59.7
360	33.6	39.1	46.7	51.2	56.7	58.7	64.3
540	35.8	41.7	49.8	54.5	60.5	62.6	68.6
720	37.3	43.5	51.9	56.8	63.0	65.2	71.4
960	38.7	45.2	53.9	59.1	65.5	67.8	74.2
1200	39.9	46.5	55.5	60.8	67.4	69.7	76.4
1440	40.8	47.5	56.7	62.1	68.9	71.3	78.1
1800	41.9	48.8	58.3	63.8	70.8	73.3	80.2

**Cuadro C.14:** Cantidad de precipitación máxima (mm).

Elaboración: Los autores.

**INTENSIDAD DURACIÓN FRECUENCIA**  
**ESTACIÓN: EL TROJE P25**

$$I(t, T) = \frac{10.5211 \log T + 32.3910}{(25.7508 + t)^{0.9993}}$$



**Figura C.15:** Intensidad máxima de precipitación (mm/min), escala logarítmica.

t(min)	Período de retorno T(años)						
	3	5	10	15	25	30	50
5	7.2	8.0	9.2	9.9	10.8	11.1	12.0
10	12.3	13.8	15.9	17.1	18.6	19.1	20.6
15	16.2	18.2	20.9	22.5	24.4	25.2	27.1
20	19.3	21.6	24.8	26.7	29.0	29.9	32.2
25	21.7	24.4	28.0	30.1	32.7	33.7	36.3
30	23.7	26.6	30.5	32.8	35.7	36.8	39.7
35	25.4	28.5	32.7	35.2	38.3	39.4	42.5
40	26.8	30.1	34.5	37.1	40.4	41.6	44.9
45	28.0	31.5	36.1	38.8	42.3	43.5	46.9
50	29.1	32.6	37.5	40.3	43.9	45.1	48.7
55	30.0	33.7	38.7	41.6	45.3	46.6	50.2
60	30.8	34.6	39.7	42.7	46.5	47.8	51.6
120	36.3	40.7	46.8	50.3	54.7	56.3	60.7
240	39.8	44.7	51.3	55.2	60.1	61.8	66.7
360	41.2	46.2	53.0	57.0	62.1	63.9	68.9
540	42.1	47.3	54.3	58.3	63.5	65.3	70.5
720	42.6	47.8	54.9	59.0	64.2	66.1	71.3
960	43.0	48.2	55.4	59.6	64.8	66.7	71.9
1200	43.2	48.5	55.7	59.9	65.2	67.0	72.3
1440	43.4	48.7	55.9	60.1	65.4	67.3	72.6
1800	43.5	48.9	56.1	60.3	65.6	67.5	72.9

**Cuadro C.15:** Cantidad de precipitación máxima (mm).

Elaboración: Los autores.