

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA**

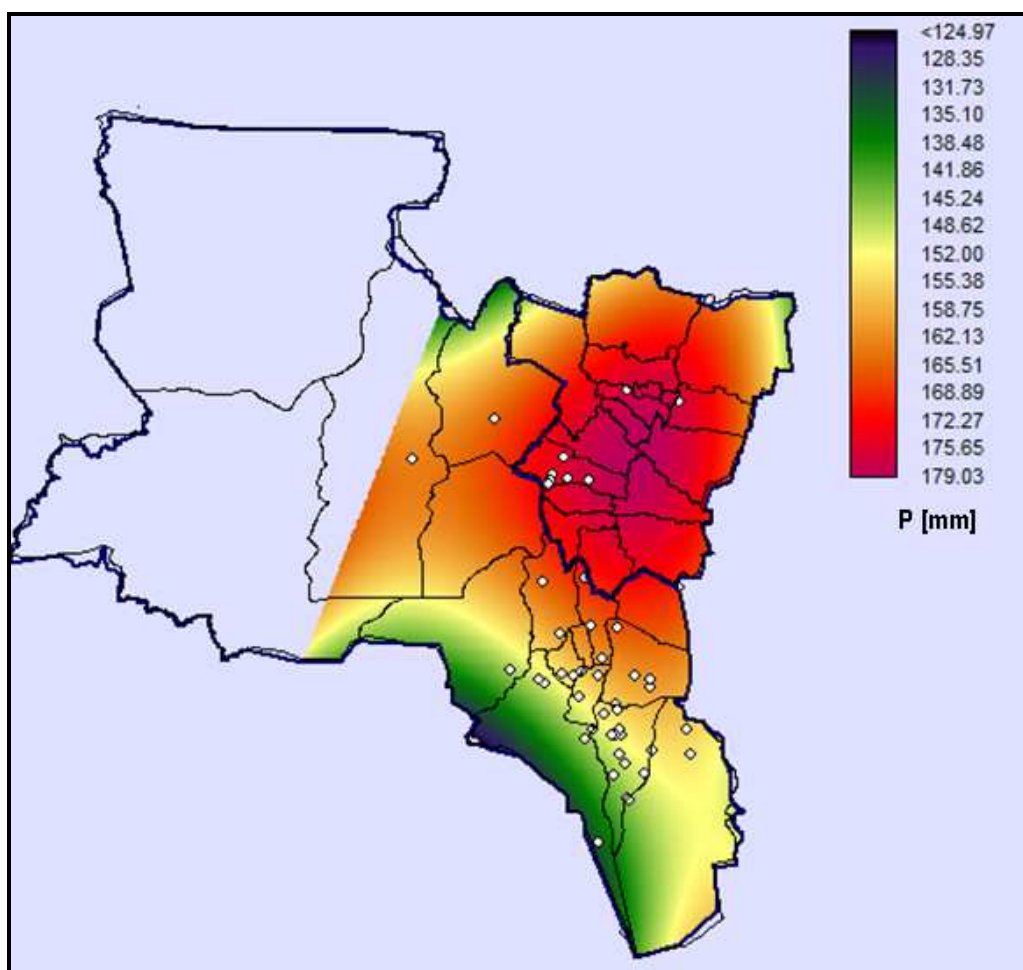
**Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**

**Centro de Estudios y Tecnología del Agua**

## **PRACTICA SUPERVISADA**

*Carrera de Ingeniería Civil*

### **“REGIONALIZACIÓN DE LLUVIAS MÁXIMAS DIARIAS EN LA PROVINCIA DE CATAMARCA”**



**Autor:** CERVIO, Marisa Magalí.

**Tutor Interno:** Dr. Ing. GARCÍA, Carlos Marcelo.

**Supervisor Externo:** Ing. GUILLÉN, Nicolás Federico.



## AGRADECIMIENTOS

- En primer lugar a Dios, que es gracias a él que hoy cumpla esta meta.
- A mi familia. Mis padres, Nora y Carlos, y mis dos hermanos, Evelina y Pablo, que me apoyaron y me aguantaron estos años dándome todo lo que necesitaba tanto a la distancia como en presencia. Llenándome de ánimo, brindándome cariño. Gracias por tener siempre las palabras justas para levantarme y la predisposición. A la carrera la hicimos juntos.
- A mi amiga, compañera y equipo Yael. Con quien compartí clases, tardes de estudio, noches largas haciendo trabajos, salidas, alegrías y tristezas, con quien compartí mi vida estos cinco años.
- A mi familia de Córdoba, Diana y Cande, con quien compartí estos últimos tres años. Quienes me brindaron mucho amor y me hicieron sentir como en mi casa. Gracias también por el aguante de mi carácter y el aliento permanente para seguir adelante.
- A esas personas especiales en mi vida que siempre estuvieron y están, algunas, amigos de toda la vida, y otros que conocí por venir a estudiar a Córdoba. A Daniela quien fue la que me impulso a estudiar esta carrera y definirme, tuvo las palabras justas en el momento justo. Y Eduardo por acompañarme y aconsejarme en este último tramo, por su disponibilidad, su tiempo.
- A Marcelo, por el aguante y empuje que nos dio desde el primer día.
- A Nicolás, supervisor, quien nos acompañó, guió y ayudó durante toda la práctica.
- A la FCEfyN y cada uno de los profesores por la formación y educación recibida.



## **TÍTULO: REGIONALIZACIÓN DE LLUVIAS MÁXIMAS DIARIAS EN LA PROVINCIA DE CATAMARCA.**

**Palabras Claves:** *Precipitación Máxima Diaria Anual, Regionalización, Sistemas de Información Geográfica, Periodo de Retorno.*

### **RESUMEN**

El presente trabajo se desarrolló dentro del grupo de investigación en el Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, con el fin de generar herramientas para estimar el valor de la lámina de lluvia para diseño hidrológico en la provincia de Catamarca. También se extendió el análisis en forma complementaria a registros de la provincia de Tucumán para considerar la influencia por ser una condición de borde. Teniendo en cuenta que para predecir esta lámina de lluvia para distintas duraciones, se necesitan registros continuos que se obtienen con *pluviografía*, y que la misma es escasa espacialmente y deficiente en lo que hace a la extensión de las series históricas, se recurre a la información *pluviométrica* habitualmente disponible. Esta información de lámina de lluvia precipitada diaria es el punto de partida para que luego, con técnicas apropiadas, se estimen lluvias extremas de duración menor, asociadas a un periodo de retorno. Sobre esta base, se realiza un proceso de regionalización del valor de la lámina de lluvia diaria estimada para distintas probabilidades de excedencia, cuyo principal objetivo es aprovechar los datos registrados en distintos lugares, y generar mapas digitales para la zona de estudio.

En primer lugar, se seleccionaron registros de un conjunto de estaciones pluviométricas cuyas series satisfacen requerimientos mínimos para su análisis. A partir de esta información se elaboraron las series históricas de máximos diarios anuales. Luego se verificó que las series elaboradas cumplan las hipótesis estadísticas básicas requeridas para hacer un análisis de estadística inferencial (presencia de datos atípicos, independencia, estacionalidad y homogeneidad). Luego se realizaron 6 ajustes de funciones de distribución de probabilidad para estimar los valores de máxima lámina de lluvia para los siguientes periodos de retorno,  $T= 2, 5, 10, 20, 25, 50$  y  $100$  años, como así también los valores de los intervalos de confianza. Se seleccionó la función de distribución LogNormal como óptima para este estudio y se estimaron los valores de lámina de lluvia máxima diaria para distintas probabilidades de excedencia. Dichos valores de lámina de lluvia diaria se regionalizaron para la provincia de Catamarca y Tucumán mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (Idrisi Selva 17.00), el cual permite generar mapas digitalizados con una resolución espacial de  $25 \text{ km}^2$ .

Finalmente, se evaluaron los efectos de considerar valores de lluvia máxima diaria (para los distintos periodos de retorno) en las provincias limítrofes que cuentan con esa información (Santiago del Estero y Salta); y los datos de ambas provincias fueron utilizados como condiciones de borde durante la elaboración de los mapas.

## INDICE

1. MARCO REFERENCIAL.....	23
1.1. INTRODUCCIÓN .....	23
1.2. DESCRIPCIÓN DE LA PROVINCIA DE CATAMARCA.....	24
1.3. DESCRIPCIÓN DE LA PROVINCIA DE TUCUMÁN.....	27
1.4. OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA.....	29
1.4.1. Objetivo General .....	29
1.4.2. Objetivos Particulares .....	29
1.5. METODOLOGÍA .....	29
2. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE ESTADÍSTICA HIDROLÓGICA.....	33
2.1. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.....	33
2.2. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS BÁSICAS EN LAS SERIES HISTÓRICAS. 34	
2.2.1. Detección de datos atípicos en la serie.....	34
2.2.2. Prueba de Independencia (Wald-Wolfowitz).....	35
2.2.3. Prueba de Estacionalidad (Kendall).....	36
2.2.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual (Wilcoxon).....	38
2.3. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA INFERENCIAL.....	39
2.3.1. Función de distribución de probabilidad empírica.....	39
2.3.2. Ajuste de función de distribución de probabilidad.....	39
2.3.2.1. Ajuste por el Método de Momentos.....	40
2.3.2.2. Ajuste por el Método de Máxima Verosimilitud.....	40
2.3.3. Estimación de los valores máximos para distintos periodos de retorno.....	41
3. INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA ANALIZADA.....	45
3.1. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN METEOROLÓGICA HISTÓRICA.....	45
3.2. SELECCIÓN DE ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS.....	45
3.3. LOCALIZACIÓN ESPACIAL DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS SELECCIONADAS	
.....	47
3.4. DETERMINACIÓN DEL AÑO HIDROLÓGICO PARA LA REGIÓN EN ESTUDIO .....	49
3.5. GENERACIÓN DE LA SERIE HIDROLÓGICA DE LÁMINA DE LLUVIA MÁXIMAS DIARIAS.	
.....	50
4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO COMPLETO DE LOS REGISTROS DE UNA SERIE SELECCIONADA. 53	
4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS REGISTROS A ANALIZAR.....	53
4.2. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.....	59
4.3. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS EN LAS SERIES DE MÁXIMOS	
HIDROLÓGICOS.....	62
4.3.1. Detección de datos atípicos.....	62

4.3.2. Pruebas de independencia .....	64
4.3.3. Prueba de Estacionaridad.....	65
4.3.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual.....	65
4.4. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA INFERENCIAL.....	66
4.4.1. Ajuste de función de distribución de probabilidad.....	66
4.4.2. Contraste entre los valores de lluvia máxima estimadas con distintas funciones de distribución y métodos de ajuste.....	77
4.4.3. Contraste entre los distintos funciones de ajustes por Métodos de Momentos y Método de Máxima Verosimilitud.....	78
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA EL CONJUNTO DE ESTACIONES SELECCIONADAS.....	81
5.1. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS EN LAS SERIES DE LLUVIAS MÁXIMAS.....	81
5.1.1. Detección de presencia de datos Atípicos.....	81
5.1.2. Prueba de Independencia .....	81
5.1.3. Prueba de Estacionaridad .....	82
5.1.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual.....	82
5.1.5. Contraste entre los valores de lluvia máxima estimadas con distintas funciones de distribución y métodos de ajuste para 100 años de periodo de retorno con respecto a la Distribución Log normal .....	83
5.2. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.....	85
5.3. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA INFERENCIAL.....	87
6. REGIONALIZACIÓN.....	91
6.1. INTRODUCCIÓN.....	91
6.2. CREACIÓN DE UNA BASE DE DATOS.....	91
6.3. CREACIÓN DE ARCHIVO VECTORIAL Y DE VALORES .....	92
6.4. GENERACIÓN DE UNA MÁSCARA PARA DELIMITAR LA ZONA DE INTERPOLACIÓN.....	96
6.5. MÉTODO DE INTERPOLACIÓN DE KRIGING .....	98
6.6. MÉTODO DE ANÁLISIS TENDENCIAL.....	101
6.6.1. Creación de Superficies Tendenciales.....	102
6.6.2. Histograma de frecuencias.....	105
6.7. MAPAS TENDENCIALES DE LLUVIAS DIARIAS MÁXIMAS ANUALES PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO.....	112
7. ACOPLAMIENTO DE LÁMINAS DE LLUVIA MÁXIMA DIARIA PARA LOS DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO DE PROVINCIAS VECINAS Y ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS BORDES.....	119
7.1. INTRODUCCIÓN.....	119
7.2. INFORMACIÓN DE PROVINCIAS VECINAS UTILIZADA EN EL ANALISIS.....	120
7.2.1. Información de Salta y Jujuy.....	120



7.2.2. Información de Santiago del Estero.....	120
7.3. CONFECCIÓN DE LOS MAPAS DIGITALES PARA EL ANALISIS DE LA INFLUENCIA DEL BORDE.....	121
7.4. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL BORDE.....	130
7.4.1. Influencia en el borde Norte de Catamarca y Tucumán al incorporar Salta y Jujuy. .....	130
7.4.1.1. Metodología utilizada.....	130
7.4.1.2. Resultados de la comparación entre los mapas digitales de las provincias de Catamarca y Tucumán sin influencia del borde Norte y con la influencia. ....	136
7.4.2. Influencia en el borde Este de Catamarca y Tucumán al incorporar, además de Salta y Jujuy, la provincia de Santiago del Estero.....	138
8. CONCLUSIÓN.....	143
8.1. CONCLUSIONES DEL TRABAJO .....	143
8.2. CONCLUSIONES PERSONALES .....	144
8.3. TRABAJOS FUTUROS .....	144
9. REFERENCIAS.....	147



## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa Político de la Provincia de Catamarca .....	25
Figura 2: Mapa Físico de la Provincia de Catamarca .....	25
Figura 3: Mapa Climático y de isohietas anuales de la Provincia de Catamarca.....	26
Figura 4: Mapa Político de la Provincia de Tucumán.....	28
Figura 5: Mapa Físico de la Provincia de Tucumán .....	28
Figura 6: Mapa Climático y de isohietas anuales de la Provincia de Tucumán .....	28
Figura 7: Longitud de registro de las estaciones pluviométricas de Catamarca .....	46
Figura 8: Longitud de registro de las estaciones pluviométricas de Tucumán.....	46
Figura 9: Disposición espacial de las estaciones pluviométricas encontradas en las provincias de Catamarca y Tucumán .....	47
Figura 10: Parte del vector histórico de datos de lluvia diaria de la estación Belén-Playa Larga (código interno 115) .....	54
Figura 11: Evolución temporal de los valores máximos anuales de lluvia diaria para la estación de San Martín de la provincia de Catamarca .....	56
Figura 12: Salida del programa Hyfran para descripción de la estación .....	59
Figura 13: Determinación, utilizando el programa Hyfran, de probabilidades empíricas de cada dato de lluvia diaria máxima anual utilizando la Ecuación de Weibull para la estación San Martín de la provincia de Catamarca (código interno 383) .....	60
Figura 14: Salida de Estadística Base de la estación San Martín de la provincia de Catamarca .....	60
Figura 15: Salida del programa Hyfran para la prueba de independencia de la serie de máximos anuales de lluvia diaria de la estación San Martín de la provincia de Catamarca (código interno 383) .....	64
Figura 16: Salida del programa Hyfran para la prueba de estacionalidad de la serie de máximos anuales de lluvia diaria de la estación San Martín de la provincia de Catamarca (código interno 383) .....	65
Figura 17: Salida del programa Hyfran para la prueba de homogeneidad a escala anual de la serie de máximos anuales de lluvia diaria de la estación San Martín de la provincia de Catamarca (código interno 383).....	66
Figura 18: Captura de pantalla donde se indica la selección de la función de distribución de probabilidad.....	67
Figura 19: Captura de pantalla donde se indica la selección del método de ajuste de los parámetros de la función de distribución de probabilidad.....	68
Figura 20: Captura de pantalla donde se indica la inclusión del periodo de retorno T=25 años .....	68

Figura 21: P (mm) vs Probabilidad de no-excedencia (incluyendo intervalos de confianza) estimada con la función de distribución de probabilidad GEV sobre la base de la región de estudio de la estación San Martín de la provincia de Catamarca (código interno 383) .....	69
Figura 22: Test de adecuación para la función de distribución de probabilidad GEV sobre la base de la región de estudio de la estación San Martín (código interno 383).....	69
Figura 23: P (mm) vs Probabilidad de no-excedencia (incluyendo intervalos de confianza) estimada con la función de distribución de probabilidad LogNormal sobre la base de la región de estudio de la estación San Martín de la Provincia de Catamarca (código interno 383).....	76
Figura 24: Comparación entre estimaciones realizadas con distintas funciones de distribución de probabilidad y parámetros ajustados con el método de momentos .....	78
Figura 25: Comparación entre estimaciones realizadas con distintas funciones de distribución de probabilidad y parámetros ajustados con el método de verosimilitud. ....	78
Figura 26: Evolución de la máxima diferencia porcentual entre los valores estimados con la distribución LogNormal y alguna función de distribución a medida que aumenta la longitud de la serie para Catamarca.....	83
Figura 27: Evolución de la máxima diferencia porcentual entre los valores estimados con la distribución LogNormal y alguna función de distribución a medida que aumenta la longitud de la serie para Tucumán .....	84
Figura 28: Análisis de dispersión del método LogNormal de Catamarca.....	84
Figura 29: Análisis de dispersión del método LogNormal de Tucumán.....	85
Figura 30: Estaciones finalmente seleccionadas de Catamarca y Tucumán. ....	88
Figura 31: Cuadro de diálogo DatabaseWorkshop. ....	92
Figura 32: Cuadro de diálogo DatabaseWorkshop – Import .....	92
Figura 33: Cuadro de Diálogo Database Workshop - Export.....	93
Figura 34: Mapa con la localización de las estaciones en las provincias de Catamarca y Tucumán.....	94
Figura 35: Cuadro de Diálogo Export Vector File.....	94
Figura 36: Cuadro de Diálogo de Establish a Display Link.....	94
Figura 37: Cuadro de Diálogo Export Vector File.....	95
Figura 38: Mapa con la localización y valores de lluvias máximas diarias para T= 2 años, en las provincias de Catamarca y Tucumán.....	95
Figura 39: Cuadro de dialogo Import Dxf IDRISI.....	96
Figura 40: Cuadro de dialogo DXF / Idrisi conversión module .....	96
Figura 41: Cuadro de dialogo DXF / Idrisi conversión module .....	97
Figura 42: Cuadro de diálogo RASTERVECTOR.....	97
Figura 43: Cuadro de dialogo Raster / Vector Conversión.....	98
Figura 44: Mascara utilizada para las Provincias de Catamarca y Tucumán .....	98

Figura 45: Secuencia para abrir el método de interpolación Kriging and Simulation .....	100
Figura 46: Cuadro de Diálogo Kriging and Simulation .....	100
Figura 47: Raster interpolado por el método Kriging para PMD2 (Precipitación media máxima estimada para un período de retorno de dos años) .....	101
Figura 48: Secuencia para abrir el método de interpolación Trend.....	103
Figura 49: Cuadro de diálogo del método de interpolación Trend .....	103
Figura 50: Superficie tendencial. Regresión Lineal. T = 2 Años.....	103
Figura 51: Secuencia para abrir la función "Overlay".....	104
Figura 52: Cuadro de diálogo de la función Overlay .....	104
Figura 53: Esquema de la operación OVERLAY (multiplicación).....	105
Figura 54: Grilla interpolado por el método Trend. T =2 Años Media de las series históricas de las lluvias máximas diarias anuales .....	105
Figura 55: Esquema donde los valores de lluvias diarias máximas medias quedan dentro del intervalo de confianza.....	106
Figura 56: Esquema donde los valores de lluvias diarias máximas medias quedan fuera del intervalo de confianza. (Se presenta subestimación) .....	106
Figura 57: Esquema donde los valores de lluvias diarias máximas medias quedan fuera del intervalo de confianza. (Se presenta sobrestimación) .....	106
Figura 58: Cuadro de dialogo de la función Overlay .....	107
Figura 59: Diferencia entre "Kriging" (valores mínimos) y "Trend" (regresión lineal) [mm]. T = 2 Años .....	107
Figura 60: Secuencia para abrir la función Histo.....	108
Figura 61: Cuadro de diálogo de la función Histo. ....	108
Figura 62: Histograma numérico de frecuencias. Producción numérica .....	109
Figura 63: Histograma de frecuencias min-trend para un periodo de retorno de 2 años. Producción gráfica.....	109
Figura 64: Histograma de frecuencias max-trend para un periodo de retorno de 2 años. Producción gráfica.....	110
Figura 65: Diferencia porcentual ente valores medios y extremos. ....	111
Figura 66: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para las provincias de Catamarca y Tucumán para un Periodo de retorno T= 2 años [mm].....	112
Figura 67: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para las provincias de Catamarca y Tucumán para un Periodo de retorno T= 5 años [mm] .....	113
Figura 68: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para las provincias de Catamarca y Tucumán para un Periodo de retorno T= 10 años [mm].....	113
Figura 69: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para las provincias de Catamarca y Tucumán para un Periodo de retorno T= 20 años [mm].....	114

Figura 70: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para las provincias de Catamarca y Tucumán para un Periodo de retorno $T= 25$ años [mm].....	114
Figura 71: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para las provincias de Catamarca y Tucumán para un Periodo de retorno $T= 50$ años [mm].....	115
Figura 72: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para las provincias de Catamarca y Tucumán para un Periodo de retorno $T= 100$ años [mm].....	115
Figura 73: Mapa político de la Republica Argentina. ....	119
Figura 74: Disposición de las estaciones en las provincias de Salta y Jujuy.....	120
Figura 75: Disposición de las estaciones en la provincia de Santiago del Estero.....	121
Figura 76: Mapa de lluvias diarias máximas anuales en las provincias de Catamarca, Tucumán, Salta y Jujuy, para un Periodo de retorno $T= 2$ años [en mm].....	122
Figura 77: Mapa de lluvias diarias máximas anuales en las provincias de Catamarca, Tucumán, Salta y Jujuy, para un Periodo de retorno $T= 5$ años [en mm].....	123
Figura 78: Mapa de lluvias diarias máximas anuales en las provincias de Catamarca, Tucumán, Salta y Jujuy, para un Periodo de retorno $T= 10$ años [en mm].....	123
Figura 79: Mapa de lluvias diarias máximas anuales en las provincias de Catamarca, Tucumán, Salta y Jujuy, para un Periodo de retorno $T= 20$ años [en mm].....	124
Figura 80: Mapa de lluvias diarias máximas anuales en las provincias de Catamarca, Tucumán, Salta y Jujuy, para un Periodo de retorno $T= 25$ años [en mm].....	124
Figura 81: Mapa de lluvias diarias máximas anuales en las provincias de Catamarca, Tucumán, Salta y Jujuy, para un Periodo de retorno $T= 50$ años [en mm].....	125
Figura 82: Mapa de lluvias máximas anuales en las provincias de Catamarca, Tucumán, Salta y Jujuy, para un Periodo de retorno $T= 100$ años [en mm].....	125
Figura 83: Mapa de lluvias máximas anuales en las provincias de Catamarca, Tucumán, Salta, Jujuy y Santiago del Estero para un Periodo de retorno $T= 2$ años [en mm].....	126
Figura 84: Mapa de lluvias máximas anuales en las provincias de Catamarca, Tucumán, Salta, Jujuy y Santiago del Estero para un Periodo de retorno $T= 5$ años [en mm].....	127
Figura 85: Mapa de lluvias máximas anuales en las provincias de Catamarca, Tucumán, Salta, Jujuy y Santiago del Estero para un Periodo de retorno $T= 10$ años [en mm].....	127
Figura 86: Mapa de lluvias máximas anuales en las provincias de Catamarca, Tucumán, Salta, Jujuy y Santiago del Estero para un Periodo de retorno $T= 20$ años [en mm].....	128
Figura 87: Mapa de lluvias máximas anuales en las provincias de Catamarca, Tucumán, Salta, Jujuy y Santiago del Estero para un Periodo de retorno $T= 25$ años [en mm].....	128
Figura 88: Mapa de lluvias máximas anuales en las provincias de Catamarca, Tucumán, Salta, Jujuy y Santiago del Estero para un Periodo de retorno $T= 50$ años [en mm].....	129
Figura 89: Mapa de lluvias máximas anuales en las provincias de Catamarca, Tucumán, Salta, Jujuy y Santiago del Estero para un Periodo de retorno $T= 100$ años [en mm].....	129

Figura 90: Secuencia para importar archivo dxf.....	131
Figura 91: Cuadro para convertirlo en vector dentro de Idrisi.....	131
Figura 92: Secuencia para seleccionar la opción de convertir de vector a raster.....	131
Figura 93: Cuadro de dialogo de la función RasterVector.....	132
Figura 94: Cuadro de dialogo de la función RasterVector.....	132
Figura 95: Cuadro de dialogo INITIAL para tener iguales tamaños en las distintas máscaras. .....	132
Figura 96: Secuencia para operar OVERLAY.....	133
Figura 97: Cuadro de dialogo OVERLAY.....	133
Figura 98: Mapa de Catamarca-Tucumán con influencias en el borde superior de las provincias de Salta y Jujuy.....	134
Figura 99: Cuadro de dialogo de RASTERVERTOR.....	134
Figura 100: Cuadro de dialogo de RASTERVERTOR.....	134
Figura 101: Cuadro de pregunta de RASTERVERTOR.....	135
Figura 102: Cuadro de dialogo INITIAL – image initialization.....	135
Figura 103: Mapa que resulta de realizar la operación de cociente de OVERLAY.....	135
Figura 104: Histograma - Producción Numérica.....	136
Figura 105: Gráfico en función de los porcentajes mayores, menores e iguales a uno en función de los períodos de retorno.....	137
Figura 106: Gráfico de los máximos y mínimos cocientes en función de los períodos de retorno.....	138
Figura 107: Mapa que resulta de realizar la operación de cociente de OVERLAY.....	139





## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores Kn para la prueba de datos atípicos.....	35
Tabla 2: Valores de Kcri para el test de Kendall.....	37
Tabla 3: Periodos de retorno en años utilizados para el diseño de estructuras de control de agua (Chow, 1994) .....	42
Tabla 4: Porcentajes de las estaciones pluviométricas de Catamarca en función de su longitud de serie.....	46
Tabla 5: Porcentajes de las estaciones pluviométricas de Tucumán en función de su longitud de serie.....	46
Tabla 6: Estaciones pluviométricas seleccionadas de Tucumán (longitud de registro > 14 años).....	47
Tabla 7: Estaciones pluviométricas seleccionadas de Catamarca (longitud de registro >14 años).....	48
Tabla 8: Datos principales de la Estación “El Rodeo” de la provincia de Catamarca.....	49
Tabla 9: Datos de lluvias diarias de la Estación “El Rodeo” de la provincia de Catamarca en los años 1981-1982 .....	50
Tabla 10: Planilla de lluvias diarias máximas anuales de la estación San Martín de la provincia de Catamarca. S/D significa: Sin Datos, es decir, que en ese año hidrológico faltaron datos de los meses pertenecientes al periodo entre Octubre y Abril. ....	55
Tabla 11: Matriz de lluvias de la estación Belén-Playa Larga (código interno 115).....	57
Tabla 12: Parte de la planilla de máximos mensuales anuales y de lluvias diarias de la estación Belen-Playa Larga (código interno 115) .....	58
Tabla 13: Probabilidad empírica de no excedencia de cada dato de lluvia diaria máxima anual para la estación San Martín de la provincia de Catamarca (código interno 383).....	61
Tabla 14: Planilla resumen de datos pluviométricos.....	63
Tabla 15: Estimación de laminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad GEV (parámetros estimados por el método de momentos) sobre los registros de 38 años de la estación San Martín de la provincia de Catamarca (código interno 383).....	70
Tabla 16: Estimación de laminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad Gumbel (parámetros estimados por el método de momentos) sobre los registros de de 38 años de la estación San Martín de la provincia de Catamarca (código interno 383) .....	71
Tabla 17: Estimación de laminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad Log-Pearson tipo	

III (parámetros estimados por el método de momentos) sobre los registros de 38 años de la estación San Martín de la provincia de Catamarca (código interno 383).....	72
Tabla 18: Estimación de laminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad GEV (parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud) sobre los registrosde 38 años de la estación San Martín de la provincia de Catamarca (código interno 383).....	73
Tabla 19: Estimación de laminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad Gumbel (parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud)sobre los registros de 38 años de la estación San Martín de la provincia de Catamarca (código interno 383).....	74
Tabla 20: Estimación de laminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad LogNormal (parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud)sobre los registros de 38 años de la estación San Martín de la provincia de Catamarca (código interno 383).....	75
Tabla 21: Contraste entre los valores de lluvia máxima estimadas con distintas funciones de distribución y métodos de ajuste .....	77
Tabla 22: Contraste relativo de los distintos valores estimados con distintas funciones de distribución (con respecto a los valores estimados con la función de distribución LogNormal) .....	77
Tabla 23: Estación pluviométrica con más de dos Datos Atípicos en Catamarca .....	81
Tabla 24: Estación Pluviométrica que no verificó la Prueba de Independencia de sus valores máximos diarios de Catamarca .....	81
Tabla 25: Estación Pluviométrica que no verificó la Prueba de Independencia de sus valores máximos diarios de Tucumán.....	82
Tabla 26: Estaciones Pluviométricas que rechazaron la Prueba de Estacionalidad de Tucumán .....	82
Tabla 27: Depuración de las estaciones de Catamarca según las pruebas a verificar.....	82
Tabla 28: Depuración de las estaciones de Tucumán según las pruebas a verificar .....	83
Tabla 29: Datos de estadística descriptiva de las series de lluvias diarias máximas anuales finalmente seleccionadas de Tucumán .....	85
Tabla 30: Datos de estadística descriptiva de las series de lluvias diarias máximas anuales finalmente seleccionadas de Catamarca .....	86
Tabla 31: Valores de lluvias máximas diarias (PMDT) estimadas para distintos períodos T (2, 5, 10, 20, 25, 50, 100) para las estaciones finalmente seleccionadas de Catamarca .....	87
Tabla 32: Valores de lluvias máximas diarias (PMDT) estimadas para distintos períodos T (2, 5, 10, 20, 25, 50, 100) para las estaciones finalmente seleccionadas de Tucumán.....	87
Tabla 33: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 2 Años. ....	110

Tabla 34: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 5 Años. ....	111
Tabla 35: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 10 Años.....	111
Tabla 36: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 20 Años.....	111
Tabla 37: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 25 Años.....	111
Tabla 38: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 50 Años.....	111
Tabla 39: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 100 Años.....	111
Tabla 40: Porcentajes obtenidos del cociente entre los mapas digitales de Catamarca- Tucumán con y sin influencia. ....	136



# *Capítulo 1*

## **MARCO REFERENCIAL**



## 1. MARCO REFERENCIAL

### 1.1. INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista humano, el agua tiene un *impacto positivo* si se la considera como **recurso hídrico** y se tienen en cuenta los efectos benéficos, como son su uso doméstico, industrial, agrícola, minero, recreativo, entre otros. Mientras que, también se puede tener un *impacto negativo* si se habla de los fenómenos como **amenazas hídricas**; tal es el caso de los efectos nocivos producidos sobre seres vivos, suelos, infraestructura, seguridad, tránsito, etc.

Dentro de estos efectos nocivos se busca prevenir un *Desastre*, el cual será todo evento o suceso, que generalmente ocurre de manera repentina e inesperada, provocando daños severos a una colectividad, región o país. Los desastres van a responder a amenazas, y evaluar las mismas implica *pronosticar o predecir* la ocurrencia y magnitud del fenómeno, con referencia en el mecanismo generador y el monitoreo y/o registro de eventos en el tiempo. Cuando se **pronostica** se determina un monto y tiempo de ocurrencia breve (dadas las incertidumbres) para el suceso. Es decir que el pronóstico es un anticipo de lo que va a ocurrir, para poder avisar a la población amenazada sobre el fenómeno peligroso. En resumen, los modelos de pronóstico constituyen sistemas de alerta y se utilizan en situaciones de emergencia.

En cambio, en lo que respecta a la **predicción**, la misma no determina cuándo se producirá el evento hipotético, sino cuál será la magnitud del mismo, en función de su duración y recurrencia (con base en información probabilística); o bien, en el largo plazo, cuál será el evento máximo probable. Se asume que ocurrirá en algún momento de un período plurianual, relacionado con la planificación y dimensionamiento de obras en el área potencialmente afectable, con lo que resulta desacertado asignarle fecha u hora. En este ámbito de la predicción está incluido el tema de lluvias para diseño hidrológico.

*“El diseño hidrológico se define como la evaluación del impacto de los procesos hidrológicos y la estimación de valores de las variables relevantes para modificarlo”*

La variable más relevante y requerida es el **caudal, “Q”**; que se predice con una estimación estadística, considerando la estacionariedad del fenómeno, y usando datos históricos, con una longitud de serie suficiente. Con esto se asegura que una muestra sea larga y representativa, con lo que se tendrá menos incertidumbre.

Lamentablemente los registros históricos de caudal no son habituales en Argentina, por ello se recurre a la información de lluvia, proceso físico generador del escurrimiento, y modelos de transformación lluvia-caudal.

Con la información de lluvias, para predecir la lámina para distintas duraciones, se necesitan registros continuos (*pluviografía*), y como la misma es escasa espacialmente y deficiente en lo que hace a la extensión de las series históricas, se recurre a la información

*pluviométrica* habitualmente disponible. La misma es el punto de partida para que luego, con técnicas apropiadas, se estimen lluvias extremas de duración menor, asociadas a un periodo de retorno. Sobre esta base, se realiza un proceso de regionalización de la información pluviométrica, cuyo principal objetivo es aprovechar los datos registrados en distintos lugares, y generar mapas digitales para la zona de estudio.

## 1.2. DESCRIPCIÓN DE LA PROVINCIA DE CATAMARCA

**Catamarca** está situada en la Región del Norte Grande Argentino. Limita al norte con la provincia de Salta, al noreste con Tucumán, al este con Santiago del Estero, al sudoeste con La Rioja, al sur con Córdoba y al oeste con Chile (Ver Figura 1). La provincia se encuentra dividida en 16 departamentos, los cuales incluyen 36 municipios.

Posee un **relieve** montañoso, más elevado en el oeste. Se destacan 3 zonas geológicamente diferenciadas:

- **La puna:** ocupa la porción norte de la provincia, con cordilleras elevadas como la de Calalaste, grandes salares e imponentes volcanes, como el Antofalla. No se encontraron registros de lluvias en esta parte de la provincia. El no tener datos en esta zona no es relevante ya que no se encuentran muchos ríos y lagunas, es una zona muy seca.
- **La cordillera central:** ocupa el sudoeste de la provincia. Presenta cumbres elevadas como el Ojo del Salado, el monte Pissis, y el Tres Cruces entre varios otros colosos conocidos como «seismiles». En esta zona es muy escasa la información de series históricas de lluvias diarias.
- **Sierras Pampeanas:** ocupan el resto de la provincia. Presenta un conjunto de sierras antiguas que forman cordones, y salares como el de Pipanaco. A diferencia de las dos zonas geológicas anteriores, en esta, si encontramos registros de lluvias diarias en una cantidad apreciable.

Las descripciones anteriores de las zonas geológicas las podemos observar en la Figura 2.





Figura 1: Mapa Político de la Provincia de Catamarca

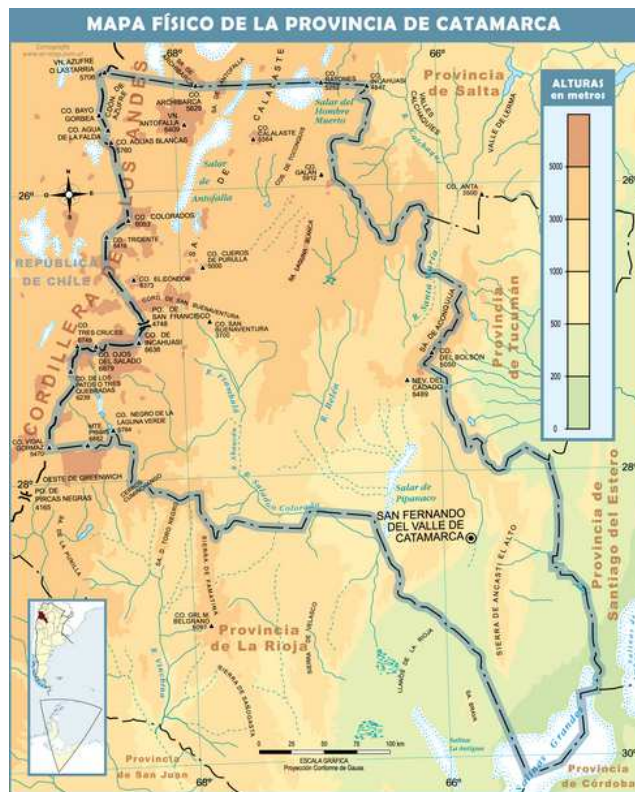


Figura 2: Mapa Físico de la Provincia de Catamarca

Con respecto al **clima**, otro aspecto relevante en este estudio, Catamarca integra la región semiárida Argentina. En la provincia se distinguen dos tipos de climas el cálido y árido:

- **Clima Árido de montaña o Andino Puneño:** el relieve se corresponde con la Puna, es elevado y las mesetas originan bajas temperaturas, lluvias escasas debido a que por el oeste, este y sur del departamento de Antofagasta de la Sierra los cordones montañosos no permiten el paso de los vientos húmedos provenientes del Pacífico. La escasez de lluvias justifica la no disposición de estaciones pluviométricas en estos lugares.

- **Clima Árido de Sierras y Campos:** ocupa la mayor parte de la provincia. Allí se presentan también escasas lluvias, aire seco y fuertes vientos del noreste, este y sudeste en primavera y verano. El Clima es templado continental, con una precipitación media anual entre los 500 y 700 mm en el este (en algunos sectores las precipitaciones superan los 1000 mm), pero con marcada disminución hacia el Oeste (Puna Cordillerana con menos de 150 mm), compensada parcialmente por nieve. Las temperaturas medias anuales son de 20°C en el Este y Centro, registrándose marcas de hasta 45 °C en el verano. En cambio, en las regiones montañosas ubicadas al oeste, por efecto de altura el invierno es muy frío.

- **Clima Cálido o Subtropical Serrano:** se localiza al noreste de la provincia con abundantes lluvias y altas temperaturas, veranos cálidos e inviernos suaves con abundante humedad, por ello encontramos una apreciable cantidad de datos pluviométricos. Los vientos del noroeste, este y sudeste tienen menos frecuencia.

En la Figura 3 apreciamos las tres zonas donde se dan estos tres tipos de climas, y además podemos ver las líneas de isohietas anuales.

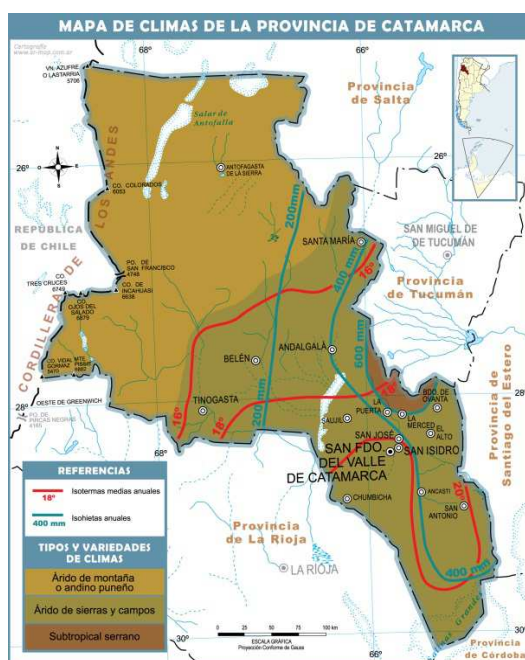


Figura 3: Mapa Climático y de isohietas anuales de la Provincia de Catamarca

### 1.3. DESCRIPCIÓN DE LA PROVINCIA DE TUCUMÁN

Tucumán es una provincia argentina situada en el Noroeste Argentino, formando también parte de la Región del Norte Grande Argentino. Limita al norte con la provincia de Salta, al este y sur con Santiago del Estero y al oeste y sur con Catamarca (Ver Figura 4). Su capital es la ciudad de San Miguel de Tucumán se encuentra dividida en 17 departamentos.

Con respecto al relieve (Ver Figura 5), presenta tres áreas:

- **Sierras Pampeanas:** Se localiza al oeste del territorio provincial, comprende serranías y planicies interserranas de orientación general norte-sur. Las sierras más destacadas en esta región son las de Quilmes, Aconquija y Narvaez como vemos en la Figura 5.
- **Llanura chaqueña:** corresponde a la zona este de la provincia y es de los lugares más llanos del país.
- **La Región Subandina:** esta región esta ubicada al norte de la provincia y esta representada por los cordones subandinos de las cumbres Calchaquies y la sierra de Medina

Los cordones montañosos se encargan de detener los vientos húmedos del Atlántico, provocando que se eleven. La condensación de humedad en esta zona provoca sobre las laderas orientales lluvias y nevadas.

Con respecto al Clima, se pueden diferenciar 3 tipos principales: (Ver Figura 6):

- **Clima Subtropical Serrano:** El clima predominante en la región es de características subtropical serrano, con vientos del este y lluvias que disminuyen en intensidad de norte a sur y de este a oeste. En esta zona es donde se encuentran la mayoría de las estaciones pluviométricas que analizamos de Tucumán.
- **Clima Subtropical con estación seca:** se da en la llanura Chaqueña, las lluvias, que en general no superan los 600 milímetros, son principalmente estivales y disminuyen hacia el oeste. La temperatura media anual es de 20°C.
- **Clima Árido de Sierras y Campos:** es un clima similar al Subtropical Serrano, pero con inviernos más suaves.



Figura 4: Mapa Político de la Provincia de Tucumán



Figura 5: Mapa Físico de la Provincia de Tucumán

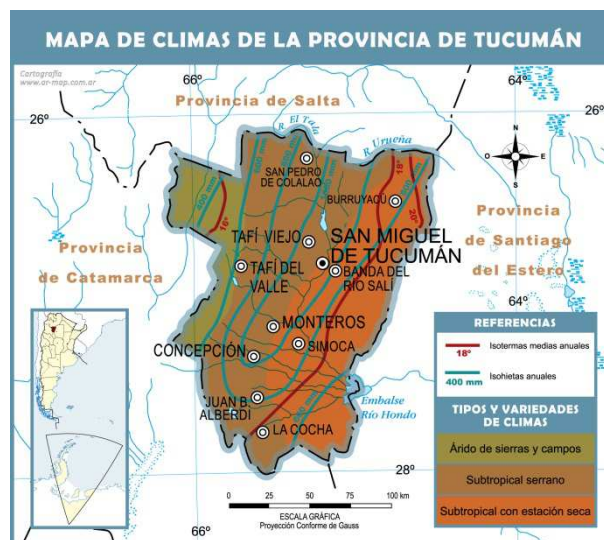


Figura 6: Mapa Climático y de isohietas anuales de la Provincia de Tucumán

## **1.4. OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA**

### **1.4.1. Objetivo General**

Regionalizar la lluvia máxima diaria en la provincia de Catamarca. Se analizarán en forma complementaria registros de la provincia de Tucumán para considerar la influencia por ser una condición de borde.

### **1.4.2. Objetivos Particulares**

Para cumplir el objetivo general mencionado anteriormente se definen algunos objetivos específicos:

- Realizar la búsqueda, depuración, esquematización y análisis de los datos pluviométricos existentes en las provincias de Tucumán y Catamarca.
- Participar en la recopilación, depuración y análisis preliminar de información pluviométrica.
- Entrenamiento en el uso y aplicación de un programa específico para el análisis estadístico (descriptivo e inferencial) de datos.
- Estimar los valores de lluvias máximas diarias para distintos T (Períodos de retorno) para los registros seleccionados.
- Generación de un Sistema de Información Geográfica (SIG) utilizando el programa Idrisi Selva 17.00.
- Generación de mapas de digitales de lluvias máximas diarias asociadas a distintos T, de resolución espacial 25 km<sup>2</sup> utilizando el Sistema de Información Geográfico (SIG).
- Acoplar los resultados obtenidos junto con los de otras provincias limítrofes y evaluar la influencia de los diferentes bordes sobre la provincia de Catamarca que surgen al acoplar provincias vecinas al análisis de regionalización.

## **1.5. METODOLOGÍA**

A continuación se detalla de manera resumida la metodología empleada con la finalidad de cumplimentar los objetivos generales y particulares. El proceso se puede resumir en los siguientes puntos:

1. Entrenamiento en el análisis estadístico de series hidrológicas.
2. Recopilación y procesamiento de series pluviométricas de máximos diarios anuales de las distintas estaciones existentes en las provincias de Catamarca y Tucumán.
3. Ubicación espacial de las distintas estaciones pluviométricas y sus parámetros estadísticos.
4. Determinación del año hidrológico.



5. Generación de la serie hidrológica de máximas lluvias diarias.
6. Verificación de las series históricas de lluvias diarias seleccionadas mediante pruebas estadísticas tales como independencia, estacionalidad y homogeneidad, además de la detección de datos atípicos en las series de precipitación.
7. Determinación de los parámetros provenientes del análisis de estadística descriptiva (media y desvío estándar).
8. Ajuste de distribución de probabilidad.
9. Interpolación de la información puntual, generación de grillas de análisis mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (Idrisi Selva 17.00).
10. Acoplar los resultados obtenidos junto con los de otras provincias limítrofes y evaluar la influencia de los diferentes bordes sobre la provincia de Catamarca que surgen al acoplar provincias vecinas al análisis de regionalización.

Las actividades de los puntos 1, 2 están detallados en el capítulo I y II. El punto 3 lo observamos en el capítulo III. El punto 4 y 5 se ven en el capítulo III y IV, el punto 6, 7 y 8 se detallan en el capítulo IV también. Las actividades del punto 9 se realizan en el capítulo VI y el punto 10 se efectúa en el capítulo VII y VIII.

A continuación se van a ir desarrollando las actividades expresadas anteriormente.

# *Capítulo 2*

## ***CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE ESTADÍSTICA HIDROLÓGICA***





## 2. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE ESTADÍSTICA HIDROLÓGICA.

Los procesos hidrológicos evolucionan en el espacio y en el tiempo en una forma que es parcialmente predecible, y parcialmente aleatoria. Este tipo de tratamiento es apropiado para observaciones de eventos hidrológicos extremos, como crecientes o sequías, y para información hidrológica promediada a lo largo de intervalos de tiempo grandes, como la precipitación anual (como es nuestro caso).

Los métodos estadísticos están basados en principios matemáticos que describen la variación aleatoria de un conjunto de observaciones de un proceso hidrológico, y éstos centran su atención en las observaciones mismas en lugar de en los procesos físicos que las producen. Este capítulo describe estos principios que son los que se aplican en el análisis que se realiza a los registros de lluvias máximas diarias:

### 2.1. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.

El objetivo de la estadística descriptiva es extraer la información esencial de un conjunto de datos, reduciendo un conjunto grande de números a un conjunto pequeño. Las estadísticas son números calculados de una muestra los cuales resumen sus características más importantes.

Uno de los parámetros estadísticos es el valor esperado  $E$  de alguna función de una variable aleatoria. Un parámetro simple es la media  $\mu$ , el valor esperado de la variable aleatoria. Para una variable aleatoria  $x$ , la media es  $E(X)$ , y se calcula como el producto de  $x$  y la correspondiente densidad de probabilidad  $f(x)$ , integrado sobre el rango factible de la variable aleatoria:

$$E(X) = \mu = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx$$

**Ecuación 2-12**

$E(X)$  es el primer momento alrededor del origen de la variable aleatoria, una medida del punto medio o tendencia central de la distribución. La estimación de la media sobre la base de una muestra es el promedio  $\bar{x}$  de la información de la muestra:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

**Ecuación 2-13**

La dispersión de la información en una población se mide por medio de la varianza  $\sigma^2$ , la cual es el segundo momento alrededor de la media:

$$E[(x - \mu)^2] = \sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx$$

**Ecuación 2-14**

El valor estimado sobre una muestra de la varianza está dado por:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

**Ecuación 2-15**

en el cual el divisor es  $(n - 1)$  en lugar de  $n$  para asegurar que el parámetro estadístico obtenido de la muestra no sea sesgado, es decir, que no tenga una tendencia, en promedio, a ser mayor o menor que el valor verdadero estimado con la población. La varianza tiene dimensiones de  $[X]^2$ . La desviación estándar  $\sigma$  es una medida de la dispersión que tienen las observaciones de  $X$ . La cantidad de  $\sigma$  es la raíz cuadrada de la varianza y se estima por  $s$ . A medida que la desviación estándar aumenta, aumenta la dispersión de la información. El coeficiente de variación  $CV = \sigma/\mu$ , estimado por  $s/\bar{x}$ , es una medida adimensional de la variabilidad.

La simetría de una distribución alrededor de la media se mide utilizando la asimetría la cual es el tercer momento alrededor de la media:

$$E[(x - \mu)^3] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^3 f(x) dx$$

**Ecuación 2-16**

La asimetría normalmente se construye en forma adimensional dividiendo la Ecuación 2-16 por  $\sigma^3$  para dar el coeficiente de asimetría  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{1}{\sigma^3} E[(x - \mu)^3]$$

**Ecuación 2-17**

## **2.2. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS BÁSICAS EN LAS SERIES HISTÓRICAS.**

En esta sección se desarrollan las cuatro verificaciones que se realizan a cada una de las series de lluvias máximas diarias, para garantizar que la muestra de la que partimos es representativa, es decir, que describe las características generales de la población a la que pertenece, y que a la misma se le puede aplicar la estadística inferencial. Las verificaciones son:

- Detección de datos atípicos en la serie.
- Prueba de Independencia (Wald-Wolfowitz).
- Prueba de Estacionalidad (Kendall).
- Prueba de Homogeneidad a Escala Anual (Wilcoxon).

### **2.2.1. Detección de datos atípicos en la serie.**

Los “datos atípicos” son definidos como registros que se alejan significativamente de la tendencia observada en la muestra (suponiendo que se encuentran normalmente

distribuidos). La retención o eliminación de estos datos puede afectar significativamente la magnitud de los parámetros estadísticos, especialmente en muestras pequeñas.

La metodología para la detección de los datos atípicos consiste en el análisis de las series históricas de datos correspondientes a las lluvias máximas anuales de las distintas estaciones emplazadas en el territorio provincial. A dichas series se les aplicó el logaritmo neperiano procediendo a la determinación de la media  $y$  y es el desvío estándar  $s_y$ . La siguiente ecuación (aplicando la metodología propuesta por Chow -1959) de frecuencia puede utilizarse para detectar datos atípicos:

$$Y = y \pm K_n * s_y$$

**Ecuación 2-1**

Donde  $Y$  es el umbral de dato atípico alto o bajo, en unidades logarítmicas,  $K_n$  es un valor que depende del tamaño de la muestra (Ver Tabla 1). Si los logaritmos de los valores en una muestra son mayores que  $Y_s$  (limite superior) entonces se consideran como datos atípicos altos, análogamente en el caso de ser menores que  $Y_i$  (limite inferior) serán tomados como datos atípicos bajos.

Tamaño de muestra	$K_n$	Tamaño de muestra	$K_n$	Tamaño de muestra	$K_n$	Tamaño de muestra	$K_n$
10	2,036	24	2,467	38	2,661	60	2,837
11	2,088	25	2,486	39	2,671	65	2,866
12	2,134	26	2,502	40	2,682	70	2,893
13	2,175	27	2,519	41	2,692	75	2,917
14	2,213	28	2,534	42	2,700	80	2,940
15	2,247	29	2,549	43	2,710	85	2,961
16	2,279	30	2,563	44	2,719	90	2,981
17	2,309	31	2,577	45	2,727	95	3,000
18	2,335	32	2,591	46	2,736	100	3,017
19	2,361	33	2,604	47	2,744	110	3,049
20	2,385	34	2,616	48	2,753	120	3,078
21	2,408	35	2,628	49	2,76	130	3,104
22	2,429	36	2,639	50	2,768	140	3,129
23	2,448	37	2,65	55	2,804		

Tabla 1: Valores  $K_n$  para la prueba de datos atípicos

### 2.2.2. Prueba de Independencia (Wald-Wolfowitz).

Una de las condiciones para poder analizar estadísticamente las series de datos es que los mismos sean aleatorios. Se busca que la probabilidad de ocurrencia de uno cualquiera de ellos no dependa de la ocurrencia de los datos que le preceden y que tampoco este influya a los datos que le siguen o datos futuros. Es decir que para el análisis estadístico se requiere que la muestra esté compuesta por datos independientes de los demás.

Una de estas pruebas estadísticas de independencia es la de secuencias de una muestra de Wald-Wolfowitz. En la misma, las hipótesis a contrastar son las siguientes:

$H_0$ : El proceso que genera el conjunto de datos numéricos es aleatorio.

$H_1$ : El proceso que genera el conjunto de datos numéricos no es aleatorio.

En esta prueba se compara cada valor observado con la media de la muestra. Se le asigna a cada dato un término E o F (éxito o fracaso) según si el valor es mayor o menor que la media de la muestra.

Para evaluar la aleatoriedad de la muestra, se considera como estadístico de prueba al número de secuencias presente en los datos. Una secuencia se define como una serie éxitos o fracasos consecutivos. Luego en la muestra completa se puede distinguir:

$R$  : Número de secuencias;

$n_1$  : Número de éxitos, o de valores superiores a la media;

$n_2$  : Número de fracasos, o de valores inferiores a la media;

$n$  : Número de datos en la muestra

En la prueba se utiliza el valor estadístico  $Z$  para una prueba de dos extremos. Si  $Z$  es mayor o igual al valor crítico superior, o menor o igual al valor crítico inferior, la hipótesis nula de aleatoriedad puede ser rechazada al nivel de significancia  $\alpha$ . Sin embargo, si  $Z$  se encuentra entre estos límites, la hipótesis nula de aleatoriedad puede aceptarse. El valor estadístico  $Z$  se determina de la siguiente manera:

$$Z = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R^2}$$

**Ecuación 2-2**

Dónde:

$$\mu_R = \frac{2 \cdot n_1 \cdot n_2}{n} + 1$$

**Ecuación 2-3**

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{(\mu_R - 1)(\mu_R - 2)}{n - 1}}$$

**Ecuación 2-4**

El valor del estadístico  $Z$ , se contrasta con el valor de tabla de la distribución normal para un cierto nivel de significancia establecido.

### 2.2.3. Prueba de Estacionalidad (Kendall).

Mediante la prueba estadística de estacionalidad de Kendall se busca que en la serie de datos no se presente una tendencia temporal. Para cada dato de la serie, la cual se

encuentra ordenada cronológicamente, se calcula cuantos datos posteriores son superiores **(S)**. De esta forma:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} s(i)$$

**Ecuación 2-5**

En donde **s(i)** es el número de los valores en la serie tal que  $X_j > X_i$ , siendo  $i < j \leq n$ . Por otro lado se determinan cuantos valores posteriores son menores **(T)**. Los mismos se determinan de la siguiente manera:

$$T = \sum_{i=1}^{n-1} t(i)$$

**Ecuación 2-6**

En donde **t(i)** es el número de valores en la serie tal que  $X_j < X_i$ , siendo  $i < j \leq n$ . Con los valores de **S** y **T** calculados con las Ecuaciones 2-5 y 2-6, se define el índice  $I = \frac{S - T}{n}$ , que debe ser próximo a cero si la hipótesis nula es verdadera.

Por lo tanto se deben verificar las siguientes condiciones:

- $I < I_{cri}(\alpha)$ , o sea que el  $I$  calculado sea menor que un valor de  $I$  crítico tabulado en función del tamaño de la muestra y según diferentes niveles de significación.
- Para tamaños de muestra mayores a 10, el valor del estadístico se aproxima a una distribución normal. Por lo que se debe utilizar una forma estandarizada del estadístico en donde se transforma el índice  $I$  en el índice  $K$ , definido como:

$$K = \frac{I - 1}{\left(\frac{N * (N - 1) * (2N + 5)}{18}\right)^{0.5}} \quad I > 0$$

$$K = 0 \quad I = 0$$

$$K = \frac{I + 1}{\left(\frac{N * (N - 1) * (2N + 5)}{18}\right)^{0.5}} \quad I < 0$$

**Ecuación 2-7**

Los valores de  $K_{cri}$  son obtenidos de una distribución Normal, los cuales son presentados en la Tabla 2.

Nivel de significancia	0,01	0,05	0,1
$K_{cri}$	2,33	1,64	1,28

Tabla 2: Valores de  $K_{cri}$  para el test de Kendall

#### 2.2.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual (Wilcoxon).

La prueba de homogeneidad a escala anual de Wilcoxon permite comprobar si el promedio de un primer subconjunto de la muestra difiere significativamente del promedio de un segundo subconjunto de la muestra. Para efectuar esta prueba se debe sustituir las observaciones de las dos muestras de tamaños  $N_1$  y  $N_2$ , por sus rangos combinados. Los rangos son asignados de tal manera que el rango 1 se asigna a la más pequeña de las  $N = N_1 + N_2$  observaciones combinadas, el rango 2 se le asigna a la siguiente más, de modo que el rango  $N$  queda asignado a la observación más grande. Si varias observaciones tienen el mismo valor, se asigna a cada una de estas el promedio de los rangos que, en otra circunstancia, se les habría asignado.

La estadística de la prueba de Wilcoxon  $T_1$ , es simplemente la suma de los rangos asignados a las  $n_1$  observaciones de la muestra más pequeña. Para cualquier valor entero  $n$ , la suma de los  $n$  primeros enteros consecutivos pueden calcularse fácilmente como  $N(N+1)/2$ . La estadística de prueba  $T_1$ , más la suma de los rangos asignados a los  $N_2$  elementos de la segunda muestra,  $T_2$ , por consiguiente, debe ser igual a este valor, es decir:

$$T_1 + T_2 = \frac{N(N+1)}{2}$$

**Ecuación 2-8**

de modo que esta ecuación puede ser empleada como verificación del procedimiento de asignación de rangos.

La prueba de la hipótesis nula puede ser de dos extremos o de un extremo, dependiendo de si se está probando si los dos promedios de población son exclusivamente diferentes o si una es mayor que la otra.

La estadística de prueba,  $T_1$ , está distribuida de manera aproximadamente normal. Se puede emplear la siguiente fórmula de aproximación de muestra grande para probar la hipótesis nula:

$$|Z| = \frac{T_1 - \mu_{T_1}}{\sigma_{T_1}}$$

**Ecuación 2-9**

El valor medio de la estadística de prueba  $T_1$ , puede calcularse con:

$$\mu_{T_1} = \frac{n_1(n+1)}{2}$$

**Ecuación 2-10**

y la desviación estándar de la estadística de prueba  $T_1$ , se puede calcular con:

$$\sigma_{T_1} = \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2 (n+1)}{12}}$$

**Ecuación 2-11**

Basándose en  $\alpha$ , el nivel de significación seleccionado, la hipótesis nula puede ser rechazada si el valor  $Z$  calculado cae en la región de rechazo apropiada.

**2.3. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA INFERENCIAL.**

La estadística inferencial estudia la población a partir del estudio de una muestra, y el grado de fiabilidad o significación de los resultados obtenidos. En esta sección del informe se desarrolla:

- Función de distribución de probabilidad empírica.
- Ajuste de función de distribución de probabilidad.
  - Ajuste por el Método de Momentos.
  - Ajuste por el Método de Máxima Verosimilitud.
- Estimación de los valores máximos para distintos periodos de retorno.

**2.3.1. Función de distribución de probabilidad empírica.**

En la naturaleza, la mayoría de los fenómenos hidrológicos constituyen procesos aleatorios y dado que la planificación y el diseño están basados en eventos futuros, cuya magnitud y tiempo de ocurrencia no pueden predecirse, se debe recurrir al estudio de las probabilidades o frecuencias con que un determinado evento puede ser igualado o excedido.

Weibull estableció que la probabilidad que excedencia (porcentaje de veces durante el cual un determinado evento es igual o mayor a la cantidad indicada) de un evento dado se corresponde con la siguiente expresión:

$$p = \frac{m}{(N + 1)}$$

**Ecuación 2-18**

Donde  $N$  corresponde al número total de datos de una serie (años de registro) y  $m$  representa el número de orden de la serie arreglada en forma creciente.

**2.3.2. Ajuste de función de distribución de probabilidad.**

Una distribución de probabilidad es una función que representa la probabilidad de ocurrencia de una variable aleatoria. Mediante un ajuste de una distribución de un conjunto de datos hidrológicos, una gran cantidad de información estadística de la muestra puede resumirse en forma compacta en la función y en sus parámetros asociados.

### 2.3.2.1. Ajuste por el Método de Momentos.

Fue desarrollado por Karl Pearson, (1902). Él consideró que unos buenos estimadores de los parámetros de una función de probabilidad son aquellos para los cuales los momentos de la función de densidad de probabilidad alrededor del origen son iguales a los momentos correspondientes de la información de la muestra.

Si a cada uno de los valores de la información se le asigna una masa hipotética igual a su frecuencia relativa de ocurrencia ( $1/n$ ) y si se imagina que este sistema de masas rota alrededor del origen  $x = 0$ , entonces el primer momento de cada observación  $x_i$  alrededor del origen es el producto de su brazo de momento  $x_i$  y de su masa  $1/n$ , y la suma de estos momentos para toda la información es la media de la muestra.

$$\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \bar{x}$$

**Ecuación 2-21**

Esto es equivalente al centroide de un cuerpo. El centroide correspondiente de la función de probabilidad es:

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx$$

**Ecuación 2-22**

El segundo y el tercer momento en la distribución de probabilidad pueden igualarse a los valores de la muestra para determinar los valores de los parámetros de la distribución de probabilidad. Originalmente Pearson consideró solamente momentos alrededor del origen, pero posteriormente se volvió común el uso de la varianza como el segundo momento central,  $\sigma_2 = E [(x-\mu)^2]$ , y el coeficiente de asimetría como el tercer momento central estandarizado,  $\gamma = E [(x-\mu)^3] / \sigma_3$ , para determinar el segundo y el tercer parámetro de la distribución si se requería.

### 2.3.2.2. Ajuste por el Método de Máxima Verosimilitud.

Fue desarrollado por Fisher, (1922). Él razonó que el mejor valor de un parámetro de una distribución de probabilidad debería ser el valor que maximizara la verosimilitud ó probabilidad conjunta de ocurrencia de la muestra observada. Si se supone que el espacio muestral se divide en intervalos de longitud  $dx$  y se toma una muestra de observaciones independientes e idénticamente distribuidas  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . El valor de la densidad de probabilidad para  $X = x_i$  es  $f(x_i)$ , y la probabilidad de que la variable aleatoria ocurra en el intervalo que incluye  $x_i$  es  $f(x_i)dx$ . Debido a que las observaciones son independientes



(verifican de acuerdo a hipótesis de sección 2.1.2), su probabilidad de ocurrencia conjunta está dada por la Ecuación 2-19. Como el producto:

$$f(x_1)dx f(x_2)dx \dots f(x_n)dx = \left[ \prod_{i=1}^n f(x_i) \right] dx^n$$

**Ecuación 2-23**

Y puesto que el tamaño del intervalo  $dx$  es fijo, el maximizar la probabilidad conjunta de la muestra observada es equivalente a maximizar la función de verosimilitud:

$$L = \prod_{i=1}^n f(x_i)$$

**Ecuación 2-24**

Debido a que muchas funciones de densidad de probabilidad son exponenciales, algunas veces es conveniente trabajar con la función logaritmo de la verosimilitud:

$$\ln L = \sum_{i=1}^n \ln [f(x_i)]$$

**Ecuación 2-25**

El método de la máxima verosimilitud teóricamente es el más correcto para ajustar distribuciones de probabilidad a información en el sentido de que produce los estimativos de parámetros más eficientes, ya que estiman los parámetros de la población con los menores errores promedio. Pero, para algunas distribuciones de probabilidad, no existe solución analítica para todos los parámetros en términos de las estadísticas de la muestra y la función logaritmo de verosimilitud debe maximizarse numéricamente, lo cual puede ser bastante difícil.

### 2.3.3. Estimación de los valores máximos para distintos periodos de retorno.

El periodo de retorno  $T$  de un evento puede definirse como el intervalo promedio entre eventos que igualan o exceden una magnitud especificada. El mismo, puede considerarse como la inversa de la probabilidad de ocurrencia de un evento de igual o mayor magnitud de un evento crítico.

$$P(X \geq x_t) = \frac{1}{T}$$

**Ecuación 2-26**

Este concepto es muy utilizado en el diseño hidrológico. En el diseño hidrológico existen tres enfoques para decidir el periodo de retorno óptimo: una aproximación empírica, un análisis del riesgo asumido o un análisis hidroeconómico. Los dos primeros evalúan la amenaza en si mientras que el último tiene en cuenta también la vulnerabilidad del sistema y considera el riesgo en su conjunto.

En cuanto al método empírico tiene en cuenta la probabilidad de ocurrencia  $P(np, nd, no)$  de que en  $np$  años de predicción futuros se alcance o se supere la magnitud del evento crítico, de duración  $nd$  años, medido en  $no$  años de observación precedentes.

$$P(n_p, n_d, n_o) = \frac{n_p - n_d + 1}{(n_o - n_d + 1) + (n_p - n_d + 1)}$$

$$P(n_p, n_d, n_o) = \frac{n_p - n_d + 1}{n_o + n_p - 2 * n_d + 2}$$

**Ecuación 2-27**

Cuando el evento crítico persiste menos de un año puede considerarse  $nd=1$ . Luego la Ecuación 2-23 queda:

$$P(n_p, n_o) = \frac{n_p}{n_o + n_p}$$

**Ecuación 2-28**

En el análisis hidroeconómico se determina el tiempo de retorno de manera tal que los costos totales sean mínimos. Para la determinación de los costos totales se debe tener en cuenta que si bien al aumentar el periodo de retorno se reducen los costos o riesgos ante una falla, la magnitud y costo de una obra se ven incrementadas; para este método la cantidad de información necesaria es mucho mayor que para los demás. En la Tabla 3 se presentan rangos de valores usualmente seleccionados de periodos de retorno para el diseño de estructuras de control en las que se ven implicados fenómenos hidrológicos.

Tipo de Estructuras	Periodo de Retorno (años)
<b>Alcantarillas</b>	
Volúmenes de tráfico bajos	05-0ct
Volúmenes de tráfico medios	10 - 25
Volúmenes de tráfico altos	50 - 100
<b>Puentes</b>	
Sistema secundario	5 - 50
Sistema primario	50 - 100
<b>Drenaje urbano</b>	
Alcantarillas pequeñas	2 - 25
Alcantarillas grandes	25 - 50

Tabla 3: Periodos de retorno en años utilizados para el diseño de estructuras de control de agua (Chow, 1994)

# *Capítulo 3*

## ***INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA ANALIZADA***



### **3. INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA ANALIZADA.**

#### **3.1. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN METEOROLÓGICA HISTÓRICA.**

Se recopiló información de lámina de lluvia diaria de las estaciones pluviométricas instaladas en las provincias de Catamarca y Tucumán. Luego fue necesario confeccionar las series de máximos anuales a partir de series pluviométricas de cada una de las estaciones analizadas. Para la obtención de datos se recurrió a diferentes fuentes:

a) En el caso de la provincia de CATAMARCA la mayoría de los datos fueron proporcionados por la Dirección Provincial de Hidrológica y Evaluación de Recursos Hídricos, Dpto. Hidrología Superficial. Los departamentos de los cuales se poseían datos fueron 14: Valle Viejo, Tinogasta, Santa Rosa, Santa María, Poman, Paclin, La Paz, El Alto, Capital, Capayan, Belen, Andalaga, Ancasti, Ambato. Cada uno tiene distintas estaciones.

Son diarios expresados en milímetros precipitados durante 24hs, establecidas por convención desde las nueve de la mañana a las nueve de la mañana del día subsiguiente.

Se usaron también datos de estaciones pluviométricas sacadas de las siguientes páginas web, pertenecientes a entidades gubernamentales:

<http://bdhi.hidricosargentina.gov.ar/sitioweb/frmFiltro.aspx>

<http://dev.sija.gov.ar/series>

<http://siga2.inta.gov.ar/en/datoshistoricos/>

<http://www.tutiempo.net/clima/Argentina/AR.html>

b) Para el caso de la provincia de TUCUMÁN se utilizaron datos obtenidos de las páginas web anteriores.

#### **3.2. SELECCIÓN DE ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS.**

El criterio de Longitud de Serie consistió, en un principio, en fijar veinte años como longitud mínima de las series anuales de lluvias máximas diarias a analizar. Este condicionante, en Catamarca, implica rechazar 128 de los 154 puestos pluviométricos disponibles, lo que equivale a un 83% de la información disponible. Por esta razón, se adopta como criterio final la aceptación de todas las estaciones con una longitud de serie mayor o igual a catorce años.

La Tabla 4 y Figura 5 permite visualizar la cantidad de estaciones que pertenecen a cada intervalo de longitud de serie, es decir, entre uno y catorce años, entre catorce y veinte y mayor o igual de veinte. Por otra parte, existen 50 estaciones con más de catorce años de

registro, conformando el 32% del total. Este porcentaje de estaciones son las que continuaron las verificaciones subsiguientes.

Longitud de Serie - CATAMARCA		
Estaciones con datos	154	Porcentaje
1 < Longitud de serie < 14	104	68%
Longitud de Serie >= 14	50	32%
Longitud de Serie >= 20	28	18%

Tabla 4: Porcentajes de las estaciones pluviométricas de Catamarca en función de su longitud de serie

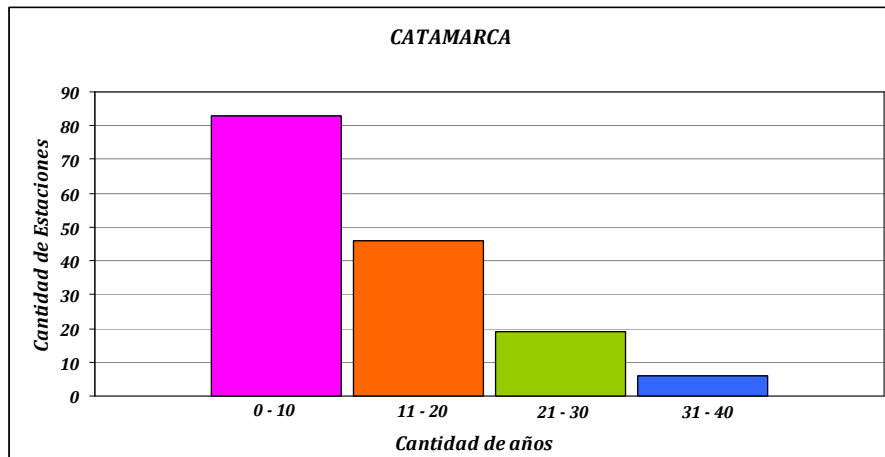


Figura 7: Longitud de registro de las estaciones pluviométricas de Catamarca

Para el caso de Tucumán, se partió de un total de 17 estaciones, de las cuales 6 tienen una longitud de serie menor a 14 años, y 11 mayor o igual a 14 años.

Longitud de Serie - TUCUMÁN		
Estaciones con datos	17	Porcentaje
1 < Longitud de serie < 14	6	35%
Longitud de Serie >= 14	11	65%
Longitud de Serie >= 20	10	59%

Tabla 5: Porcentajes de las estaciones pluviométricas de Tucumán en función de su longitud de serie

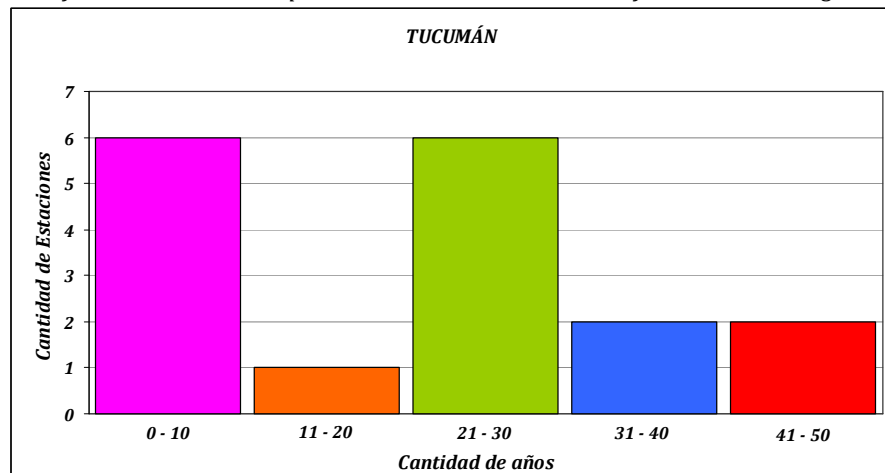


Figura 8: Longitud de registro de las estaciones pluviométricas de Tucumán

### 3.3. LOCALIZACIÓN ESPACIAL DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS SELECCIONADAS.

En la Tabla 6 y 7 se describen las estaciones seleccionadas en primera instancia tanto para Tucumán como para Catamarca; y en la Figura 9 la localización de las estaciones.

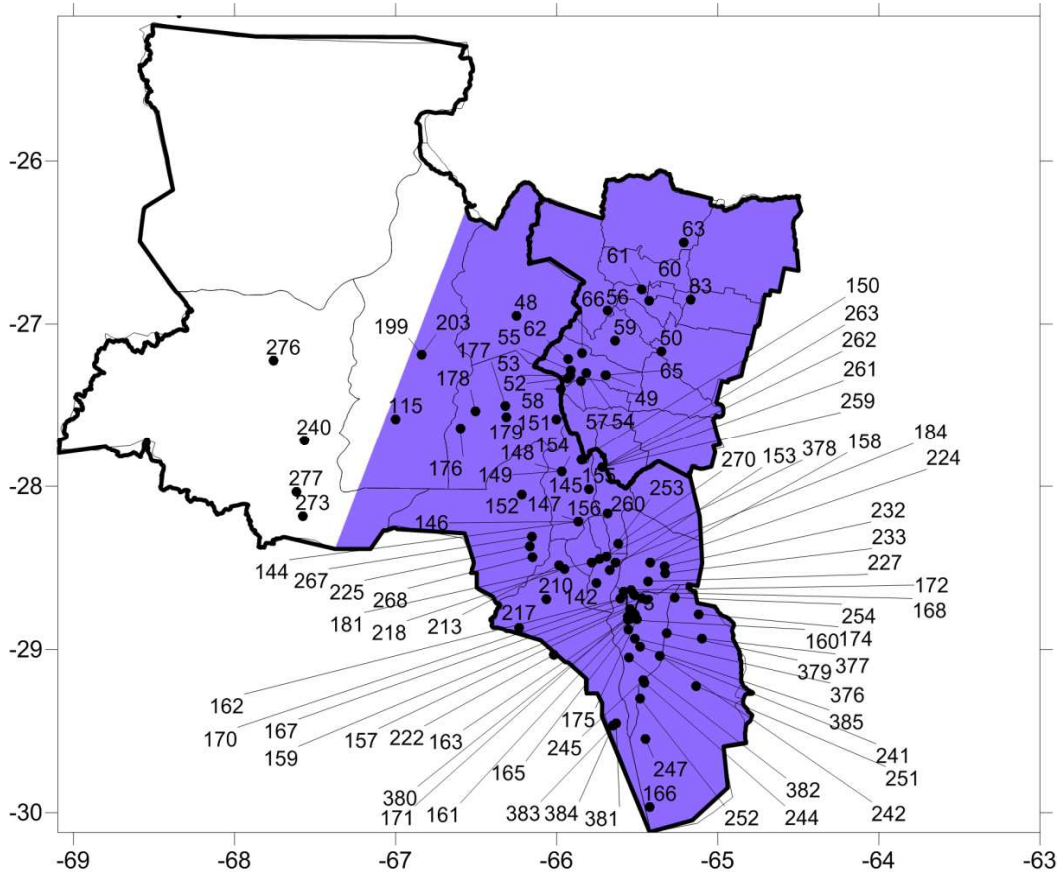


Figura 9: Disposición espacial de las estaciones pluviométricas encontradas en las provincias de Catamarca y Tucumán

Codigo	Codigo INTERNO	Nombre de la estación	Provincia	Latitud	Longitud
1	52	Cochuna - La Banderita	Tucumán	-27.333	-65.933
2	53	Cochuna - Los Hornitos	Tucumán	-27.317	-65.914
3	54	Jaya - Piedra Grande	Tucumán	-27.300	-65.818
4	55	Jaya - Casa de Piedra	Tucumán	-27.283	-65.911
5	59	Lules - El Nogalito	Tucumán	-26.786	-65.471
6	60	Solco - Las Higueras	Tucumán	-27.313	-65.693
7	61	Solco - Yampa 2	Tucumán	-27.179	-65.841
8	62	San Miguel de Tucumán	Tucumán	-26.850	-65.167
9	65	Los Sosas - Ruta Provincial	Tucumán	-27.101	-65.636
10	66	San Miguel de Tucumán	Tucumán	-26.858	-65.426
11	83	San Miguel de Tucumán	Tucumán	-27.215	-65.928

Tabla 6: Estaciones pluviométricas seleccionadas de Tucumán (longitud de registro > 14 años)

ID Org.	Nombre de la estación	Provincia	Máximo [mm]	Media [mm]	Desvío [mm]
48	Santa María Pie de Médano	Catamarca	43.8	26.10	8.61
115	Belen - Playa Larga	Catamarca	65.0	38.9	16.6
144	El Rodeo	Catamarca	122.0	60.16	21.51
147	Las Piedras Blancas	Catamarca	105.0	62.31	18.47
148	Los Castillos	Catamarca	120.0	70.03	22.82
156	Las Juntas	Catamarca	151.0	83.04	28.00
160	Cda. De Ipizca	Catamarca	143.0	84.89	29.00
161	Dique de Ipizca	Catamarca	115.0	75.12	19.00
162	El Taco	Catamarca	137.0	84.86	27.00
163	Las Ruditas	Catamarca	141.0	88.82	27.00
170	Casa Armada	Catamarca	123.0	86.86	22.00
172	La Estancia	Catamarca	122.0	86.00	17.00
174	Las Ensenadas	Catamarca	138.0	79.97	23.53
175	Ancasti	Catamarca	166.0	100.38	29.84
181	Capital	Catamarca	72.0	47.32	12.53
184	El Portezuelo	Catamarca	112.0	63.00	17.31
186	Nana Huasi	Catamarca	127.0	79.30	25.98
192	Dique de la Cañada	Catamarca	97.5	68.70	19.18
193	Guasayan	Catamarca	115.0	71.00	25.22
213	Los Angeles Capayan	Catamarca	90.0	63.68	12.70
214	Los Nacimientos	Catamarca	98.0	51.07	27.53
218	Villa Los Angeles	Catamarca	75.0	43.00	7.41
224	El Lindero	Catamarca	150.0	91.79	22.57
226	Guayondo	Catamarca	132.0	70.25	22.89
228	La Chacrita	Catamarca	140.0	88.48	27.65
232	Los Corrales	Catamarca	205.0	106.06	39.94
233	Molle Pampa	Catamarca	185.0	98.44	33.67
241	Loma Sola	Catamarca	120.0	78.25	24.11
242	Dique Montegasta	Catamarca	140.0	70.30	30.76
244	El Divisadero	Catamarca	145.0	77.28	27.22
245	El Talar	Catamarca	150.0	84.78	32.50
259	Balcozna	Catamarca	170.0	82.74	33.83
260	La Merced	Catamarca	142.0	71.57	35.77
261	La Higuera	Catamarca	142.0	77.30	28.40
262	Las Lajas	Catamarca	270.3	93.78	49.01
263	San Antonio	Catamarca	215.0	90.05	42.18
268	Mutquin	Catamarca	124.0	53.88	19.46
284	La Bajada	Catamarca	120.0	66.20	26.31
376	Amana	Catamarca	133.0	81.29	21.23
377	S. Antonio de la Paz	Catamarca	138.0	62.30	25.00
378	Esquiú	Catamarca	90.0	50.80	16.30
379	Icaño	Catamarca	122.0	65.33	23.43
380	Ipizca	Catamarca	125.0	68.83	25.32
381	Las Peñas	Catamarca	99.0	55.24	19.25
382	Majada	Catamarca	100.0	63.89	18.91
383	San Martín	Catamarca	119.0	49.47	20.12
384	Telarltos	Catamarca	119.0	49.83	25.22
385	Yerba Buena	Catamarca	128.0	72.06	22.24

Tabla 7: Estaciones pluviométricas seleccionadas de Catamarca (longitud de registro >14 años)



### 3.4. DETERMINACIÓN DEL AÑO HIDROLÓGICO PARA LA REGIÓN EN ESTUDIO.

Para el análisis y procesamiento estadístico de las lluvias es recomendable dividir las series históricas en “años hidrológicos”. Este concepto, se define como el período anual que no fracciona el ciclo estacional de lluvia, pudiendo ser distinto al año calendario.

Se observó, para los registros encontrados, que las máximas lluvias se daban entre los meses de Octubre a Abril, por ende, para el análisis se optó por determinar cómo año hidrológico al periodo desarrollado de Julio a Junio del año (calendario) siguiente. Las planillas se encuentran ordenadas según el año hidrológico. A continuación se describe un ejemplo para poder observar con claridad este concepto:

En la Tabla 8 se observan los datos principales de la estación “El Rodeo”. En la Tabla 9 se presentan las láminas de lluvias diarias; en la fila inferior se resumen los datos de lluvias máximas diarias, de cada mes, del año hidrológico 1981-1982. Podemos atender a que el máximo se da dentro de los meses de Octubre a Abril.

Analizando cada uno de los años de la serie vamos a ver esta disposición de las precipitaciones máximas se repite siempre, ya que son los períodos donde más se tiene. Cada uno de los máximos conforma la muestra de lluvias máximas anuales la cual es analizada.

Estación 'EL RODEO'	
Código:	2
Cuenca:	CUENCA DEL VALLE
Departamento:	AMBATO
Localidad:	EL RODEO
Estado:	ACTIVO
Tipo:	PLUVIOMETRICA
A.S.N.M:	
Coordenada W:	27° 34' 60" S   67° 00' 00" W
Coordenada S:	

Tabla 8: Datos principales de la Estación “El Rodeo” de la provincia de Catamarca

Día	1981						1982					
	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
1	0,00	0,00	1,00	0,00	3,00	0,00	8,00	0,00	28,50	2,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	9,00	0,00	0,00	0,00	29,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	6,00	0,00	0,00	0,00	18,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,00	0,00	0,00	8,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	2,00	0,00	0,00	1,50	0,00	16,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,00	15,00	6,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	16,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	7,00	0,00	0,00	0,00	14,00	0,00	0,00	0,00
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
13	0,00	0,00	6,00	0,00	3,00	0,00	0,00	32,00	4,00	5,00	3,00	0,00
14	0,00	0,00	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,00	14,50	0,00	3,00
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	7,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,50	5,00	0,00	0,00	0,00
18	0,00	0,00	0,00	0,00	3,50	6,00	6,00	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	31,00	0,00	0,00	8,00	0,00	0,00	0,00
21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,00	11,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,00	4,50	0,00	0,00	0,00	0,00
23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,00	0,00	7,00	0,00	0,00	3,50	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	25,00	0,00	7,00	0,00	0,00
27	0,00	0,00	0,00	26,00	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,50	0,00	1,50	0,00	0,00	0,00	5,00
29	0,00	12,00	0,00	0,00	0,00	36,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
30	0,00	0,00	0,00	68,00	4,50	4,00	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
31	0,00	5,00	0,00	0,00	0,00	6,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Acumulado	7,00	19,50	10,00	101,00	60,50	95,50	111,00	85,50	139,50	69,50	3,00	9,00
Minima	7,00	0,50	1,00	7,00	1,50	4,00	3,50	1,50	1,00	2,00	3,00	1,00
Media	7,00	4,88	3,33	33,67	5,50	13,64	11,10	9,50	11,62	8,69	3,00	3,00
Maxima	7,00	12,00	6,00	68,00	16,00	36,00	30,00	32,00	29,00	19,00	3,00	5,00

Tabla 9: Datos de lluvias diarias de la Estación "El Rodeo" de la provincia de Catamarca en los años 1981-1982

### 3.5. GENERACIÓN DE LA SERIE HIDROLÓGICA DE LÁMINA DE LLUVIA MÁXIMAS DIARIAS.

Luego de fijar el año hidrológico se pudo determinar los seis meses que contenían los datos de precipitación máxima para ese año. Se concluyó que si entre los meses de Octubre y Abril, inclusive, no se contaba con algún dato, se prescindiría de ese año hidrológico, dado que en esos meses podría hallarse la precipitación máxima anual, la cual no se tendría en cuenta en la confección de las series de máximos anuales, pudiendo ocasionar problemas significativos en los análisis estadísticos que se realizaran sobre ellas.

# *Capítulo 4*

## ***ANÁLISIS ESTADÍSTICO COMPLETO DE LOS REGISTROS DE UNA SERIE SELECCIONADA***



## **4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO COMPLETO DE LOS REGISTROS DE UNA SERIE SELECCIONADA.**

En el presente capítulo, en base a los registros pluviométricos de una estación ejemplo elegida, se realiza el análisis estadístico completo descrito en el capítulo II.

### **4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS REGISTROS A ANALIZAR.**

A modo de ejemplo, se presenta el análisis estadístico completo de los registros de lluvia diaria de la estación San Martín (código interno 383) localizada en la provincia de Catamarca. Se elige esta serie por ser la más larga en cuanto a longitud de registro de datos que se ha utilizado en el análisis (38 años). En forma similar se analizaron las otras 49 estaciones de esta provincia y las que corresponden a la Provincia de Tucumán.

En la Tabla 10 se puede apreciar la forma en que se proporcionaron los datos de la estación San Martín; y se observa que se partió en este caso de las láminas de lluvia máximas diarias de cada año hidrológico. En la Tabla 8 y 9, vista anteriormente en el capítulo III, se muestra otra de las formas en que se facilitaron los antecedentes para otra estación de la provincia de Catamarca.

En el caso de los datos que se obtuvieron de la página WEB de la Subsecretaría de Recursos Hídricos, se realizó un procedimiento diferente ya que los datos vienen en un vector histórico de lluvias diarias. Un ejemplo de este caso es de la estación pluviométrica de Belen-Playa Larga (código interno 115), y en la Figura 10 se observa cómo se obtuvieron los datos originales desde la web.

Para el análisis de los datos se creó, en Excel, una "Planilla Modelo" (que a su vez fue utilizada para el resto de las estaciones) que contiene 3 pestañas específicas. Al inicio de la primera de ellas (llamada "Datos Básicos") se debe dejar asentados los datos de la estación, como son:

- El año de inicio de la recolección de dichos datos.
- Nombre de la estación.
- Coordenadas y ubicación.
- Provincia.
- Código interno asignado a la estación.

En el caso de Belen-Playa Larga primero los datos debieron ser reordenados en forma de matriz (de orden  $N \times 12 \times 31$ , donde  $N$  es la longitud de registros disponible en años). Para ello se desarrolló un programa en Matlab que genera la matriz necesaria, ordenando los datos pluviométricos por día y mes. En la Tabla 12 se observa una porción de la planilla de datos

perteneciente a esta estación. En las últimas filas, se muestra el cálculo de la suma mensual de todas las lluvias y los valores máximos y mínimos de las lluvias de cada mes.

Luego se conformó, en la pestaña (“Datos Basicos”), una planilla (Ver Tabla 12) para cada estación pluviométrica, la cual tiene en sus filas todos los años hidrológicos en los cuales se disponía de información correspondiente a las lluvias máximas diarias mensuales, para cada uno de los meses del año ordenados de izquierda a derecha de acuerdo al año hidrológico (Julio, Agosto, Septiembre, Octubre, Noviembre, Diciembre, Enero, Febrero, Marzo, Abril, Mayo y Junio). También puede apreciarse los valores de máxima lluvia anual y datos estadísticos de cada mes, como son Máximo, Mínimo, Promedio, Desvío Estándar y Coeficiente de Asimetría.

Siguiendo con el análisis de la estación San Martín (que será analizada a modo de ejemplo en forma completa en este capítulo), en la Figura 11, se presenta la evolución temporal de los máximos valores anuales de lluvia diaria en función del año en que se registró el evento para la estación San Martín. Los registros cuentan con 38 años de longitud, siendo el más extenso de todas las series registradas, como dijimos anteriormente.

Fecha y Hora	Valor	Calificador
01/09/1970 09:00	0,0	
02/09/1970 09:00	0,0	
03/09/1970 09:00	0,0	
04/09/1970 09:00	0,0	
05/09/1970 09:00	0,0	
06/09/1970 09:00	0,0	
07/09/1970 09:00	0,0	
08/09/1970 09:00	0,0	
09/09/1970 09:00	0,0	
10/09/1970 09:00	0,0	
11/09/1970 09:00	0,0	
12/09/1970 09:00	0,0	
13/09/1970 09:00	0,0	
14/09/1970 09:00	0,0	
15/09/1970 09:00	0,0	
16/09/1970 09:00	0,0	
17/09/1970 09:00	0,0	
18/09/1970 09:00	0,0	
19/09/1970 09:00	0,0	
20/09/1970 09:00	0,0	
21/09/1970 09:00	0,0	
22/09/1970 09:00	0,0	
23/09/1970 09:00	0,0	
24/09/1970 09:00	0,0	
25/09/1970 09:00	0,0	
26/09/1970 09:00	0,0	
27/09/1970 09:00	0,0	
28/09/1970 09:00	0,0	
29/09/1970 09:00	0,0	

Figura 10: Parte del vector histórico de datos de lluvia diaria de la estación Belén-Playa Larga (código interno 115)

ESTACION	SAN MARTIN
ANO	
1933	119.0
1934	34.0
1935	57.0
1936	38.0
1937	42.0
1938	50.0
1939	80.0
1940	95.0
1941	55.0
1942	38.0
1943	50.0
1944	60.0
1945	36.0
1946	43.0
1947	39.0
1948	25.0
1949	53.0
1950	37.0
1951	56.0
1952	56.0
1953	63.0
1954	45.0
1955	43.0
1956	47.0
1957	45.0
1958	18.0
1959	30.0
1960	S/D
1961	S/D
1962	S/D
1963	S/D
1964	S/D
1965	S/D
1966	55.0
1967	25.0
1968	80.0
1969	35.0
1970	45.0
1971	27.0
1972	37.0
1973	47.0
1974	75.0
1975	S/D
1976	35.0
1977	65.0

Tabla 10: Planilla de lluvias diarias máximas anuales de la estación San Martín de la provincia de Catamarca. S/D significa: Sin Datos, es decir, que en ese año hidrológico faltaron datos de los meses pertenecientes al periodo entre Octubre y Abril.

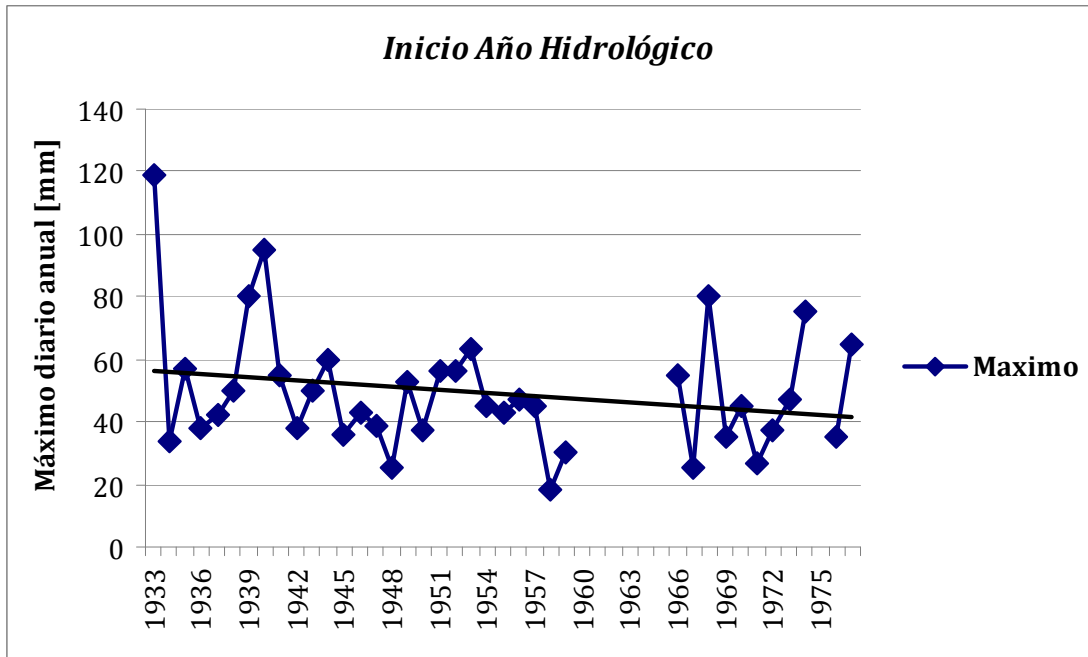


Figura 11: Evolución temporal de los valores máximos anuales de lluvia diaria para la estación de San Martín de la provincia de Catamarca



Año Inicio 1970

Estacion:	Belen-Playa Larga		
Coordenadas:	27° 34' 60,00" S	67° 00' 00,00" W	
Provincia:	CATAMARCA		
Codigo interno:	115		

Día	Enero 1970	Febrero 1970	Marzo 1970	Abril 1970	Mayo 1970	Junio 1970	Julio 1970	Agosto 1970	Septiembre 1970	Octubre 1970	Noviembre 1970	Diciembre 1970	Enero 1971
01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.4	0	0
09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.6
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0.2
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.5
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.7
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7.2	0
S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.4	19.2	40.3
MAX	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.4	12	33
MIN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 11: Matriz de Lluvias de la estación Belén-Playa Larga (código interno 115)

Año	Precipitaciones Maximias Diarias												Maximo
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	
1970				0	3.4	12	33	38.6	2.4	0.5	0.4	0	
1971	0	0	0	7.7	4.3	3.1	27.6	8.3	5.5	0	0	0	27.6
1972	10	0	0	0	0	17.5	28.5	31.4	61.9	0	0	0	61.9
1973	0	0	0	0	0.4	9.5	14.6	13	14	9.5	17	0	17
1974	6.5	4	0	3	0	0.8	40	59	4.5	5	0	1	59
1975	0	2.5	1.5	0	15	7.2	65	15.5	23	20	0	0	65
1976	0	0.7	0	0	5.7	6.5	23.3	10.8	21.5	13	5	0	23.3
1977	0	0	5	8.6	0	13	33.5	26	37	1.3	0	0	37
1978	0	0	0	11.5	6.5	40	23.5	10	22	3.5	0	2	40
1979	0	0	0	2.5	20.3	15.5	10	19.5	11.5	4	0	0	20.3
1980	0	0	1	2	6	10	57	225	47	33	0	0	225
1981	3	0	4	14	11	8	15.5	22	13.5	4.3	0	0	22
1982	0	0	2.5	0	0	16	19	21	0	0.5	0	0.4	21
1983	2	0	0	7.8	7	7.5	60	18.5	24	2.5	0	0.8	60
1984	0	0	3.2	0	0	0	18.5	15	43	8	0	0	43
1985	8.5	6.5	0	1.8	25.5	27	4	57	14	0	0	0.3	57
1986	7.8	0	2.5	16	6	11.5	38	28	22	27	3	0	38
1987	0	1.5	0	7.9	15	25	19	14.2	2.5	7	1.2	0	25
1988	5.5	0	0	0	7.7	8	44	20	0	0	0	0	44
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Maximo	10.00	6.50	5.00	16.00	25.50	40.00	65.00	225.00	61.90	33.00	17.00	2.00	225.00
Minimo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	17.00
Promedio	0.79	0.28	0.36	1.55	2.40	4.36	10.69	11.82	7.29	2.72	0.49	0.09	49.23
Desv. Est.	2.29	1.08	1.05	3.68	5.39	8.15	17.46	32.11	14.21	6.64	2.38	0.32	46.74
Coef. Asim.	2.96	4.64	3.13	2.60	2.72	2.43	1.63	5.62	2.19	3.16	6.42	4.62	3.43

Tabla 12: Parte de la planilla de máximos mensuales anuales y de lluvias diarias de la estación Belen-Playa Larga (código interno 115)

## 4.2. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.

El procedimiento del análisis descriptivo de datos con Hyfran puede resumirse en:

- La pestaña “Descripción” (Ver Figura 12) se coloca el número y nombre de la estación como “Titulo del Proyecto”; se borran los comentarios, se coloca “P” en el nombre de la variable, “mm” en unidad y “5” en números significativos. En formula de probabilidad empírica se selecciona 0.0, correspondiente a la Formula de Weibull.
- En la pestaña “Datos” se copian los años con datos de lluvia máxima anual (eliminando datos atípicos), teniendo en cuenta de cambiar las “,” por “.” ya que es el formato a introducir en el programa Hyfran y se borran los datos excedentes. Los datos obtenidos (Observaciones, Identificador y Probabilidad empírica) se copian y se pegan en la segunda pestaña de la Planilla Modelo construida en Excel, siendo esta, “Hyfran Muestra” (Figura 13 y Tabla 13). En la tabla 13 se pueden observar de manera completa los datos con las probabilidades empíricas de no excedencia, no así en la Figura 13.
- Se selecciona la pestaña “Estadística de Base”, la cual nos proporciona los datos estadísticos correspondientes a los valores mínimos, máximos, mediana, desvío estándar y coeficientes de asimetría, variación y curtosis (Ver Figura 14).

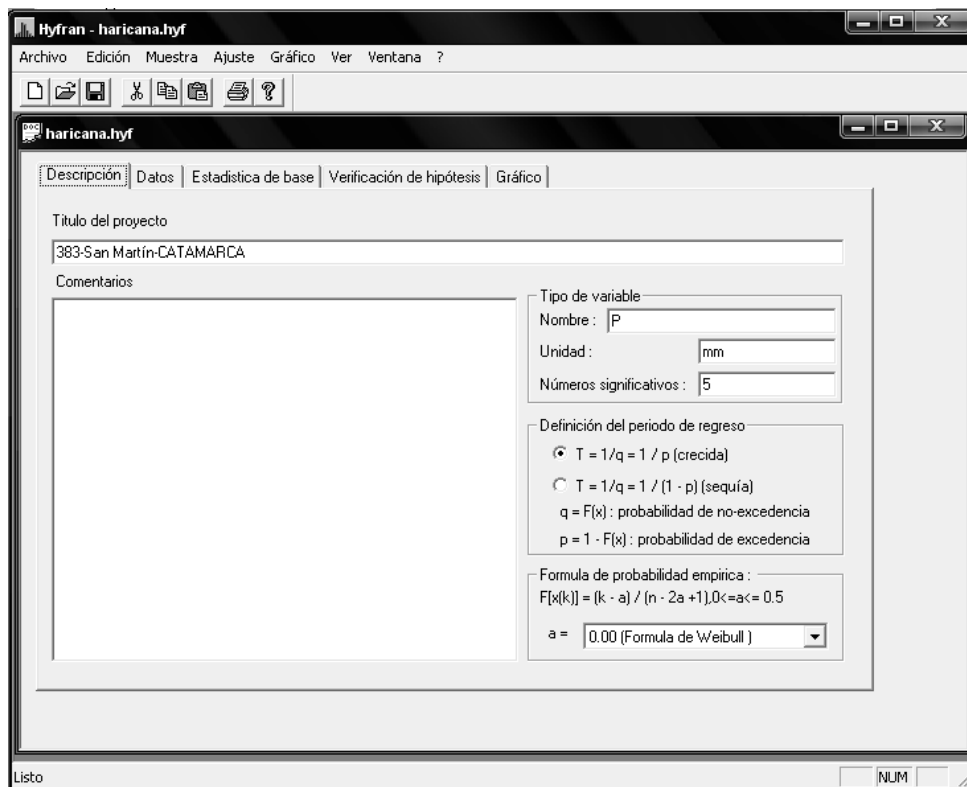


Figura 12: Salida del programa Hyfran para descripción de la estación

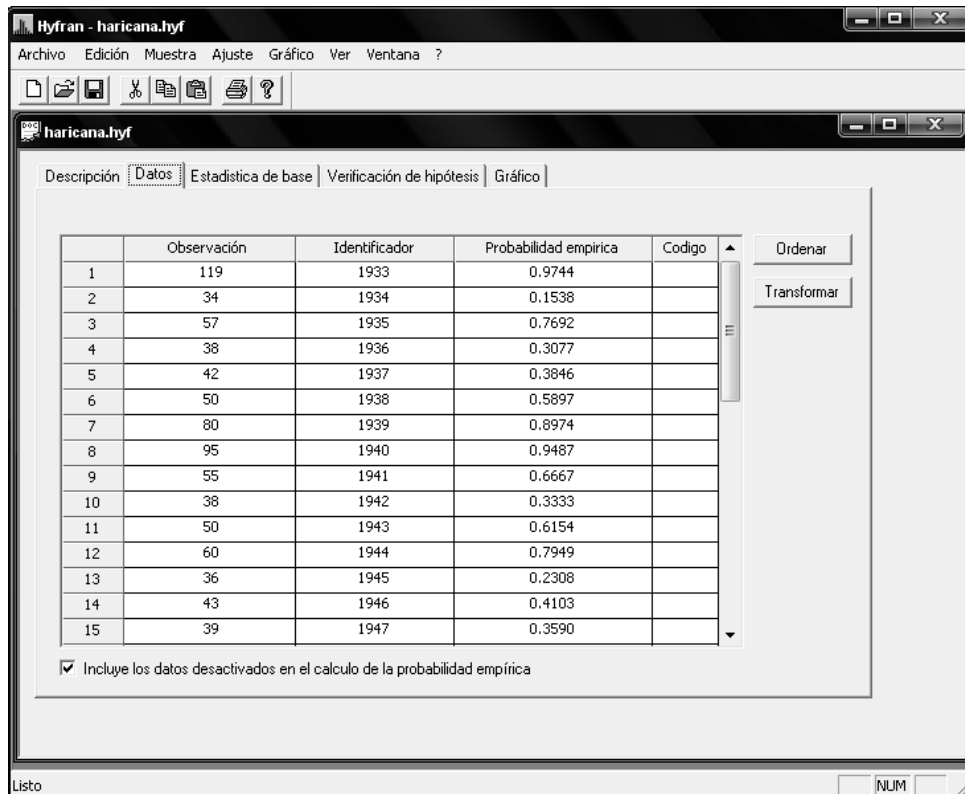


Figura 13: Determinación, utilizando el programa Hyfran, de probabilidades empíricas de cada dato de lluvia diaria máxima anual utilizando la Ecuación de Weibull para la estación San Martín de la provincia de Catamarca (código interno 383)

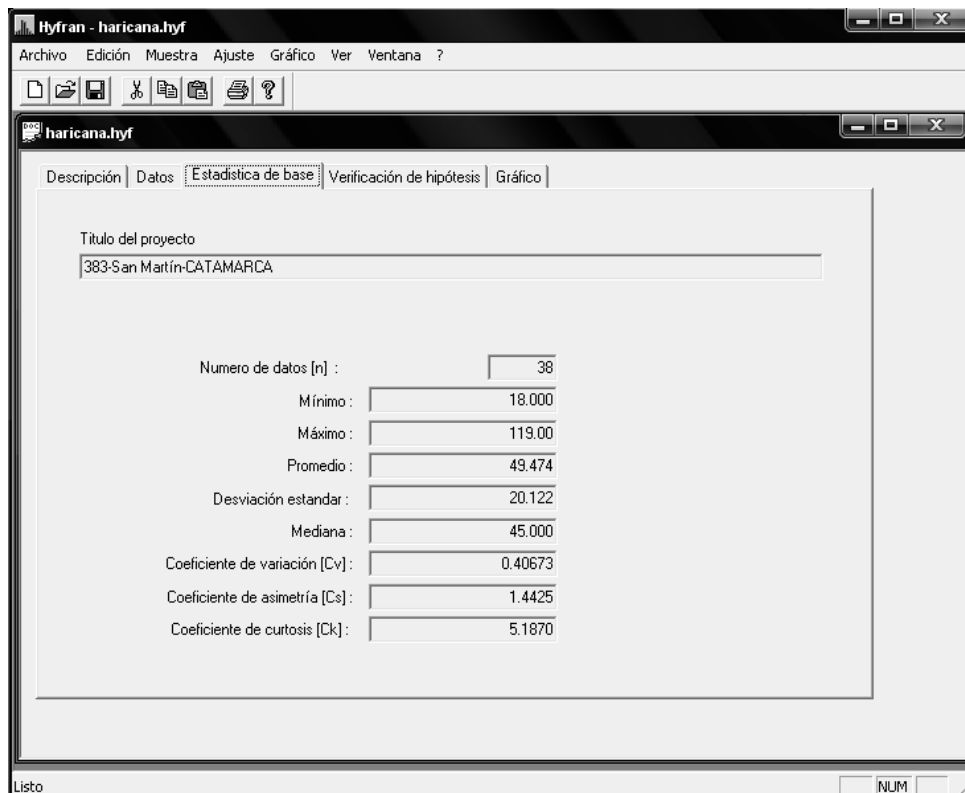


Figura 14: Salida de Estadística Base de la estación San Martín de la provincia de Catamarca

Observación	Identificador	Probabilidad Empírica
119	1933	0.9744
34	1934	0.1538
57	1935	0.7692
38	1936	0.3077
42	1937	0.3846
50	1938	0.5897
80	1939	0.8974
95	1940	0.9487
55	1941	0.6667
38	1942	0.3333
50	1943	0.6154
60	1944	0.7949
36	1945	0.2308
43	1946	0.4103
39	1947	0.3590
25	1948	0.0513
53	1949	0.6410
37	1950	0.2564
56	1951	0.7179
56	1952	0.7436
63	1953	0.8205
45	1954	0.4615
43	1955	0.4359
47	1956	0.5385
45	1957	0.4872
18	1958	0.0256
30	1959	0.1282
55	1966	0.6923
25	1967	0.0769
80	1968	0.9231
35	1969	0.1795
45	1970	0.5128
27	1971	0.1026
37	1972	0.2821
47	1973	0.5641
75	1974	0.8718
35	1976	0.2051
65	1977	0.8462

Tabla 13: Probabilidad empírica de no excedencia de cada dato de lluvia diaria máxima anual para la estación San Martín de la provincia de Catamarca (código interno 383)

### **4.3. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS EN LAS SERIES DE MÁXIMOS HIDROLÓGICOS.**

#### **4.3.1. Detección de datos atípicos.**

Los datos atípicos en la serie se detectan utilizando la metodología presentada en la sección 2.2.1. En la Tabla 14 se observa el test realizado implementando el uso de las herramientas de Excel en la serie de la estación pluviométrica San Martín. En este caso no se detectó ningún dato atípico, por lo cual en todos los datos aparece la palabra “VERIFICA” en la quinta columna.

En caso de que se detecten datos atípicos el procedimiento consiste en depurar el dato atípico y volver a realizar el análisis; en caso de no encontrar datos atípicos nuevamente la prueba verifica y se continúa. En caso contrario y al detectar un segundo dato atípico se descarta la estación.

n	Prec. Max diaria anual	Año	LnMax		Completa (x-media)^2	Trunca (x-media)^2
1	119	1933	4.779	VERIFICA	4833.91	5098.73
2	34	1934	3.526	VERIFICA	239.43	184.81
3	57	1935	4.043	VERIFICA	56.65	88.46
4	38	1936	3.638	VERIFICA	131.65	92.06
5	42	1937	3.738	VERIFICA	55.86	31.30
6	50	1938	3.912	VERIFICA	0.28	5.79
7	80	1939	4.382	VERIFICA	931.86	1050.11
8	95	1940	4.554	VERIFICA	2072.65	2247.27
9	55	1941	4.007	VERIFICA	30.54	54.84
10	38	1942	3.638	VERIFICA	131.65	92.06
11	50	1943	3.912	VERIFICA	0.28	5.79
12	60	1944	4.094	VERIFICA	110.80	153.89
13	36	1945	3.584	VERIFICA	181.54	134.43
14	43	1946	3.761	VERIFICA	41.91	21.11
15	39	1947	3.664	VERIFICA	109.70	73.87
16	25	1948	3.219	VERIFICA	598.96	510.52
17	53	1949	3.970	VERIFICA	12.43	29.22
18	37	1950	3.611	VERIFICA	155.59	112.25
19	56	1951	4.025	VERIFICA	42.59	70.65
20	56	1952	4.025	VERIFICA	42.59	70.65
21	63	1953	4.143	VERIFICA	182.96	237.33
22	45	1954	3.807	VERIFICA	20.01	6.73
23	43	1955	3.761	VERIFICA	41.91	21.11
24	47	1956	3.850	VERIFICA	6.12	0.35
25	45	1957	3.807	VERIFICA	20.01	6.73
26	18	1958	2.890	VERIFICA	990.59	875.84
27	30	1959	3.401	VERIFICA	379.22	309.57
28	55	1966	4.007	VERIFICA	30.54	54.84
29	25	1967	3.219	VERIFICA	598.96	510.52
30	80	1968	4.382	VERIFICA	931.86	1050.11
31	35	1969	3.555	VERIFICA	209.49	158.62
32	45	1970	3.807	VERIFICA	20.01	6.73
33	27	1971	3.296	VERIFICA	505.07	424.14
34	37	1972	3.611	VERIFICA	155.59	112.25
35	47	1973	3.850	VERIFICA	6.12	0.35
36	75	1974	4.317	VERIFICA	651.59	751.06
37	35	1976	3.555	VERIFICA	209.49	158.62
38	65	1977	4.174	VERIFICA	241.07	302.95
Promedio	49.47	Media Ln	3.8294		14981.47	15115.65
Desvío est.	20.12	Desvió Ln	0.3819		20.12	20.21
		K	<b>2.661</b>			
		Yh	4.8457	Promedio n-1 =		47.59
		Yl	2.8130	Desvío est. n-1 =		16.68

Tabla 14: Planilla resumen de datos pluviométricos

#### 4.3.2. Pruebas de independencia.

Luego de realizada la prueba de datos atípicos, se procede a realizar la verificación de las otras hipótesis estadísticas detalladas en la sección 2.1. a través del programa Hyfran; el mismo puede describirse como un software que permite ajustar datos a leyes estadísticas. Incluye un conjunto de instrumentos matemáticos, accesibles y flexibles que permiten en particular el análisis estadístico de eventos extremos (máximos o mínimos).

La prueba de independencia de Wald-Wolfowitz, detallada en la sección 2.2.2., permite verificar la existencia de una auto-correlación significativa de primer orden entre las observaciones. En la Figura 15 se muestra el análisis realizado para la estación en cuestión.

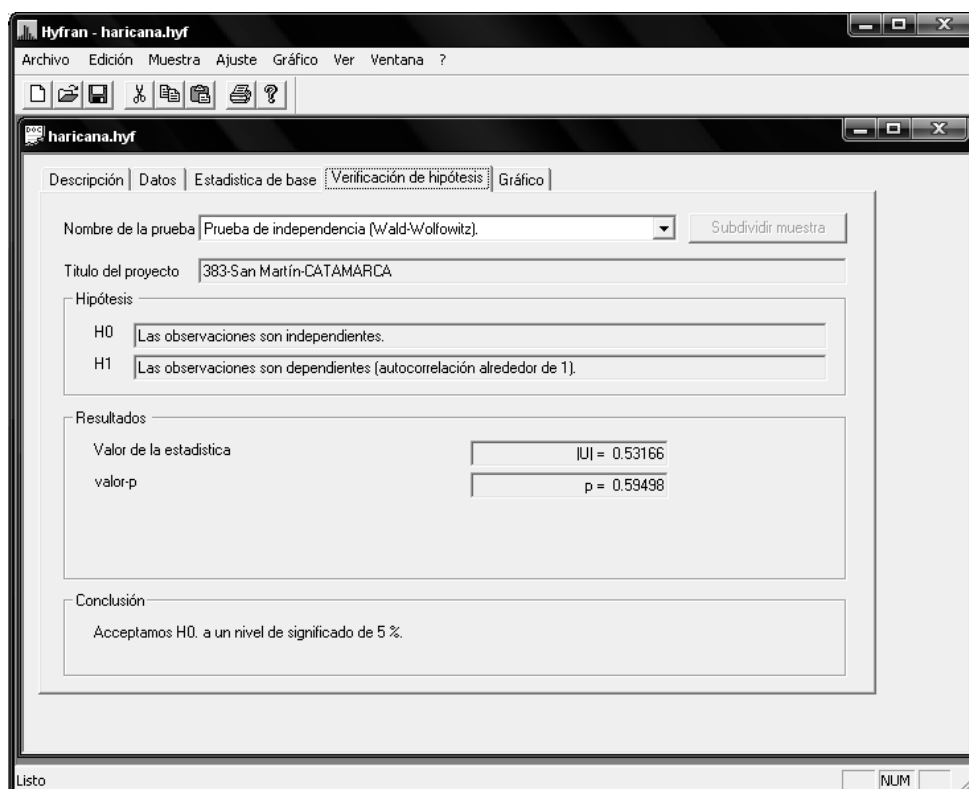


Figura 15: Salida del programa Hyfran para la prueba de independencia de la serie de máximos anuales de lluvia diaria de la estación San Martín de la provincia de Catamarca (código interno 383)

Se puede observar que verifica la prueba de Independencia con un nivel de significancia del 59%. El nivel de significación de un test es un concepto estadístico asociado a la verificación de una hipótesis. En pocas palabras, se define como la probabilidad de tomar la decisión de rechazar la hipótesis nula cuando ésta es verdadera (decisión conocida como error de tipo I, o "falso positivo"). La decisión se toma a menudo utilizando el valor P (o p-valor): si el valor P es inferior al nivel de significación, entonces la hipótesis nula es rechazada. Cuanto menor sea el valor P, más significativo será el resultado.



### 4.3.3. Prueba de Estacionaridad.

La prueba de estacionalidad de Kendall (detallada en la sección 2.2.3) permite verificar si existe una tendencia importante en la serie. En la Figura 16 se muestra el análisis realizado para la estación en cuestión. Se puede observar que verifica la prueba de Estacionaridad con un nivel de significancia del 30%.

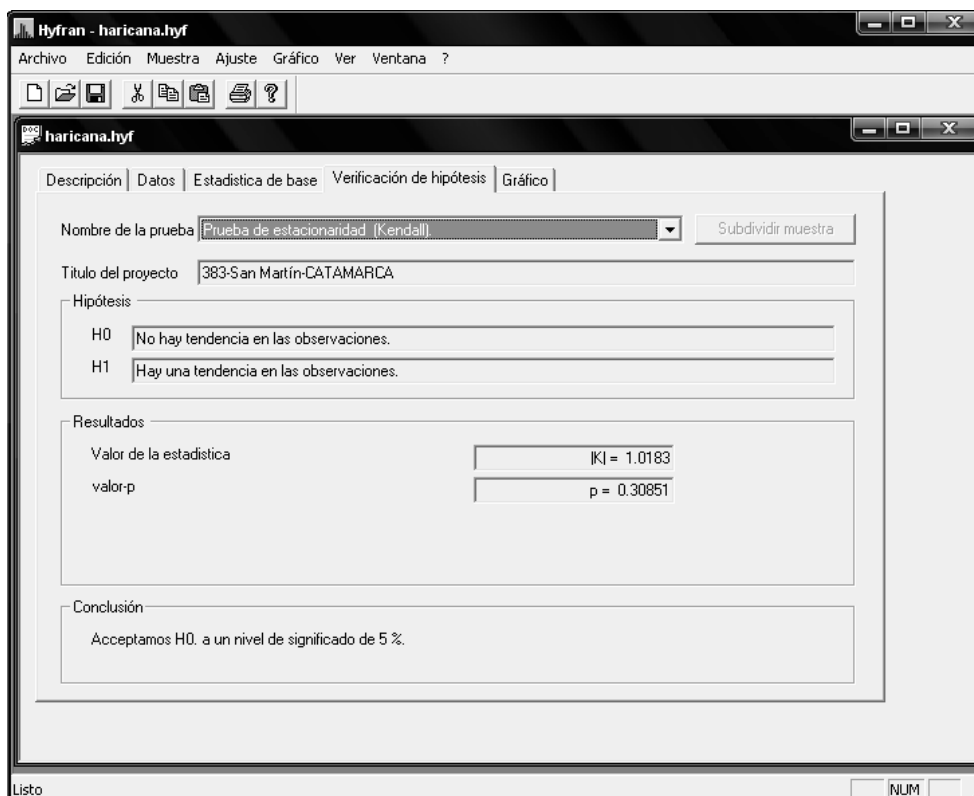


Figura 16: Salida del programa Hyfran para la prueba de estacionaridad de la serie de máximos anuales de lluvia diaria de la estación San Martín de la provincia de Catamarca (código interno 383)

### 4.3.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual.

La prueba de homogeneidad del promedio a escala anual de Wilcoxon (detallada en la sección 2.2.4.) permite comprobar si el promedio de un primer subconjunto de la muestra difiere significativamente del promedio de un segundo subconjunto de la muestra. Para esta estación se definió la fecha final del primer grupo al año 1959 a partir del análisis de la Figura 11.

El primer subgrupo se compone de las observaciones que comienzan con el primer año y terminan con un año de corte (1959), el segundo subgrupo está integrado a partir del año siguiente al año de corte hasta las observaciones finales. En la Figura 17 se muestra el análisis realizado para la estación en cuestión, se puede observar que verifica la prueba de Homogeneidad con un nivel de significancia del 68%.

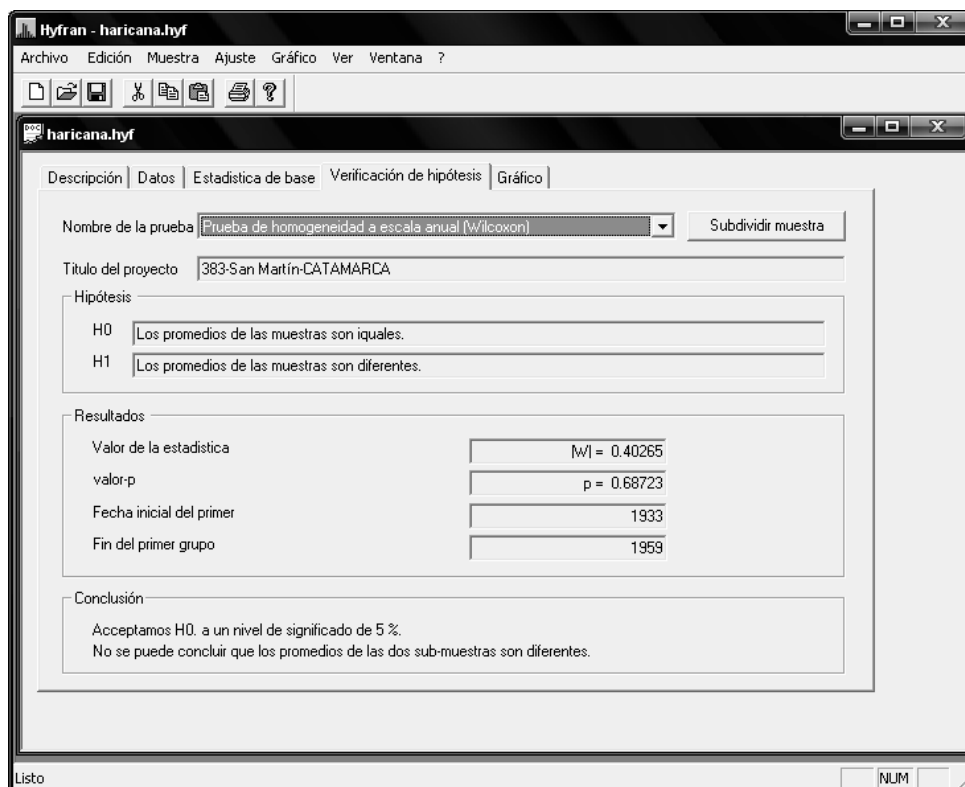


Figura 17: Salida del programa Hyfran para la prueba de homogeneidad a escala anual de la serie de máximos anuales de lluvia diaria de la estación San Martín de la provincia de Catamarca (código interno 383)

#### 4.4. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA INFERENCIAL.

En esta última parte del capítulo se analiza la muestra habiendo verificado todos los puntos anteriores, como una población. (Detallado en el capítulo II en el punto 2.3).

##### 4.4.1. Ajuste de función de distribución de probabilidad.

Las funciones de distribución y métodos de ajuste ensayados fueron:

- GEV (Método de Max. Verosimilitud).
- Gumbel (Método de Max. Verosimilitud).
- LogNormal (Método de Max. Verosimilitud).
- GEV(Método de Momentos).
- Gumbel (Método de Momentos).
- LogPearson tipo III (Método de Momentos).

Debido a que este trabajo busca extender un análisis de regionalización de lluvias máximas diarias realizado en otras regiones de Argentina, es que se busca adoptar una misma función de distribución de probabilidades para representar las muestras de valores de lluvias diarias máximas anuales; se optó por la función LogNormal, que coincide con la estimación por el método de las normales. Se realizó un análisis de sensibilidad a esta decisión al

comparar los resultados obtenidos con las otras funciones de distribución ajustadas con distintos métodos. Esto se muestra al final del capítulo.

Los ajustes antes mencionados se realizaron con el software Hyfran. Para ello, debía seleccionarse la pestaña “Ajuste” y elegir el método a utilizar, pudiendo ser “Método de Momentos” o “Método de Máxima Verosimilitud” y en algunos casos con método de momentos ponderados (esta última opción no fue seleccionada en ningún caso). En La Figura 18 y Figura 19 se demuestra el procedimiento descripto.

Al realizar los ajustes, el programa, por defecto, selecciona 12 periodos de retorno diferentes (10.000, 2.000, 1.000, 200, 100, 50, 20, 5, 3, 2, 1.43) para realizar la estimación de láminas de lluvia diaria y sus intervalos de confianza. Además se incorporó manualmente el periodo de retorno de 25 años. Esto se llevaba a cabo seleccionando la pestaña “Otro periodo de regreso” y tipeando el valor a asignar (Figura 20).

Los resultados del análisis inferencial se copian y pegan en la tercera pestaña de la “Planilla Modelo”, siendo esta denominada “Hyfran Población”. Este procedimiento se realizó conjuntamente con el gráfico que muestra las lluvias máximas diarias (P (mm)) para cada periodo de retorno (Probabilidad de no-excedencia) y los intervalos de confianza. Además se realizó un test de “adecuación” de la distribución de probabilidades ensayadas a la muestra analizada. Este procedimiento se realizó para cada una de las opciones de función de distribución y modelo de ajuste seleccionado (Figura 21 y Figura 22).

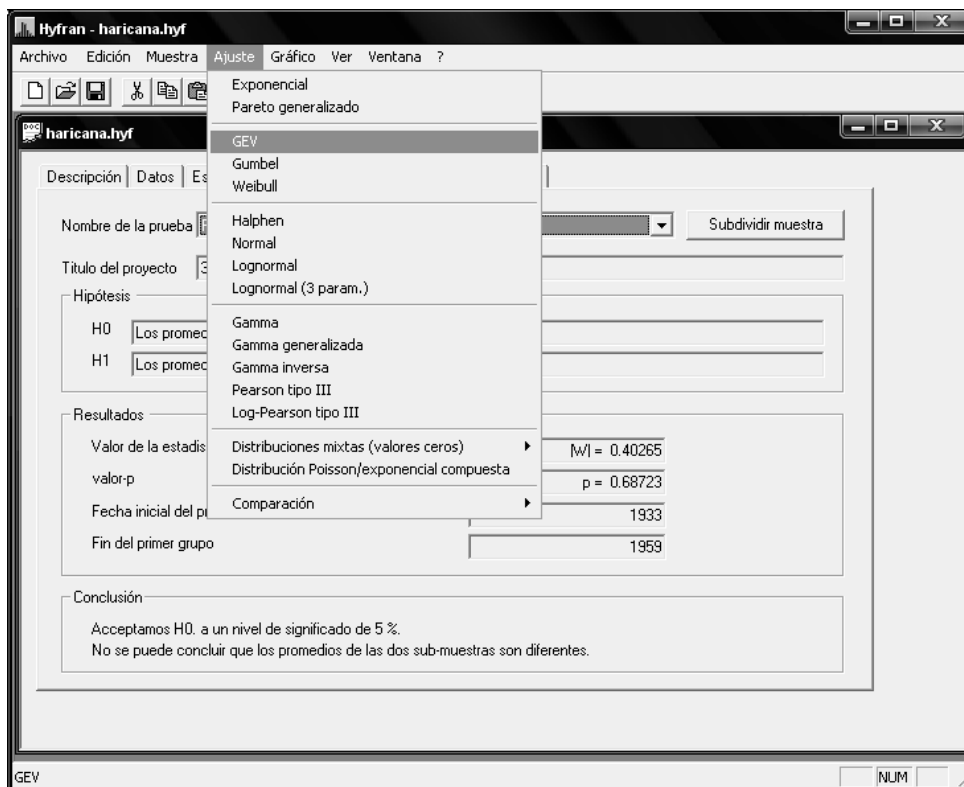


Figura 18: Captura de pantalla donde se indica la selección de la función de distribución de probabilidad

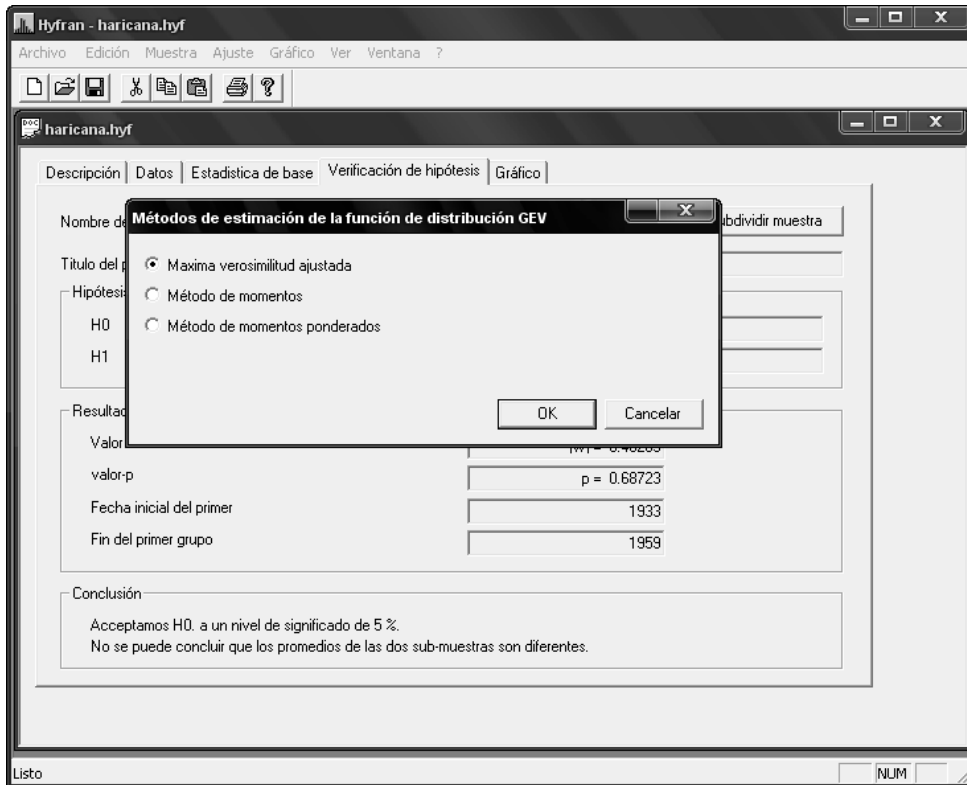


Figura 19: Captura de pantalla donde se indica la selección del método de ajuste de los parámetros de la función de distribución de probabilidad

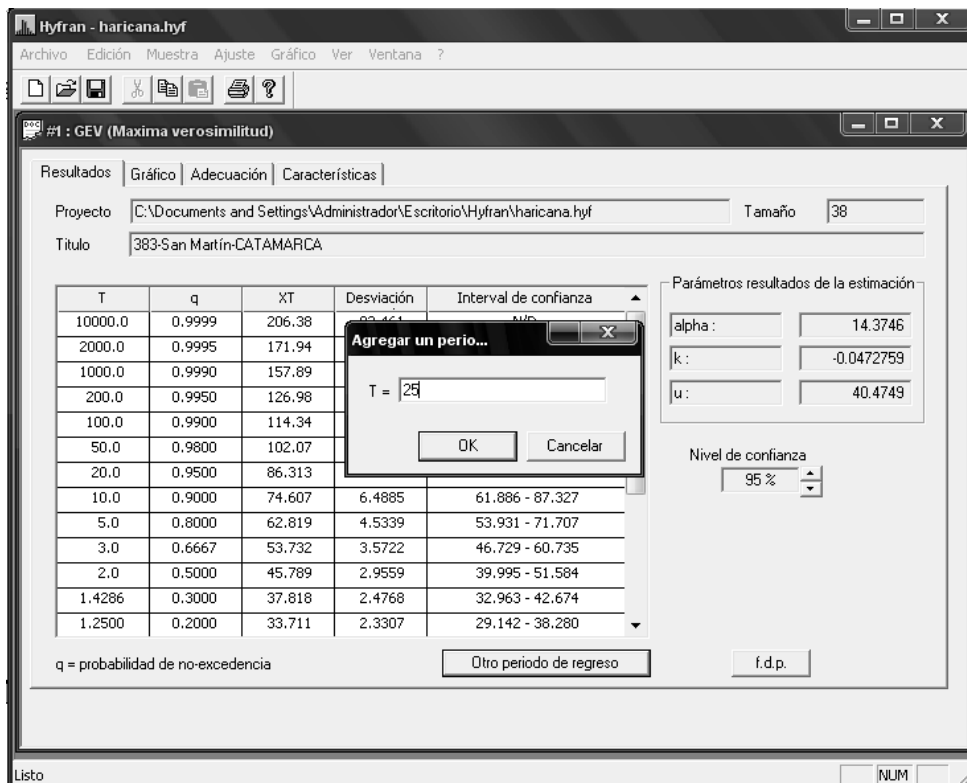


Figura 20: Captura de pantalla donde se indica la inclusión del periodo de retorno T=25 años

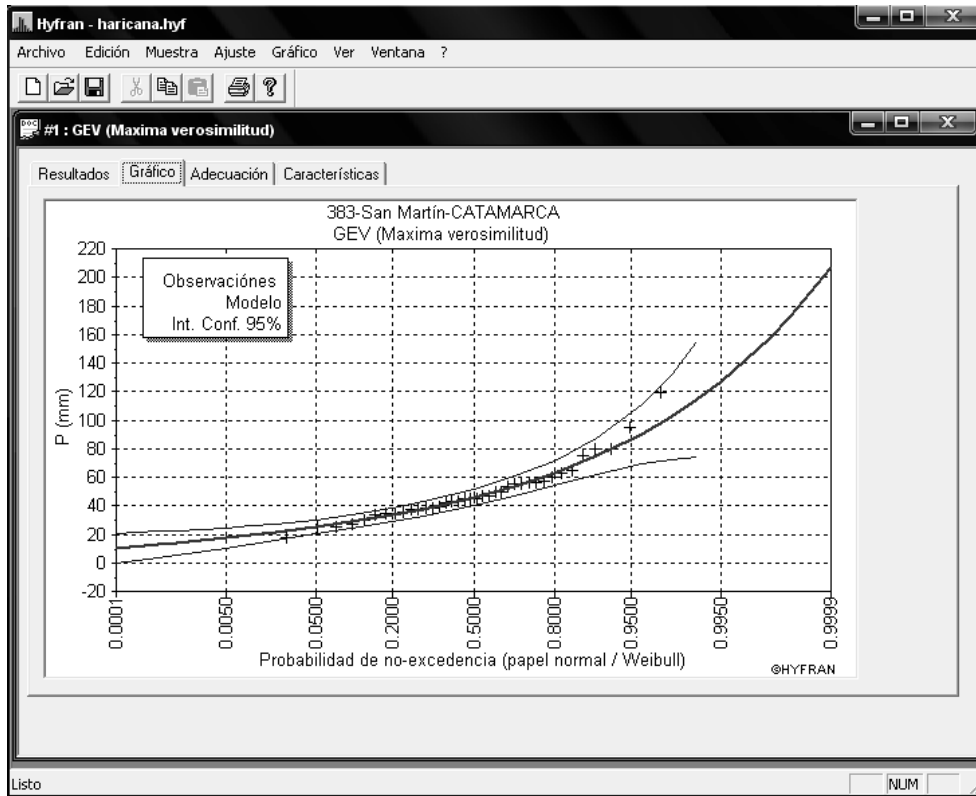


Figura 21:  $P$  (mm) vs Probabilidad de no-excedencia (incluyendo intervalos de confianza) estimada con la función de distribución de probabilidad GEV sobre la base de la región de estudio de la estación San Martín de la provincia de Catamarca (código interno 383)

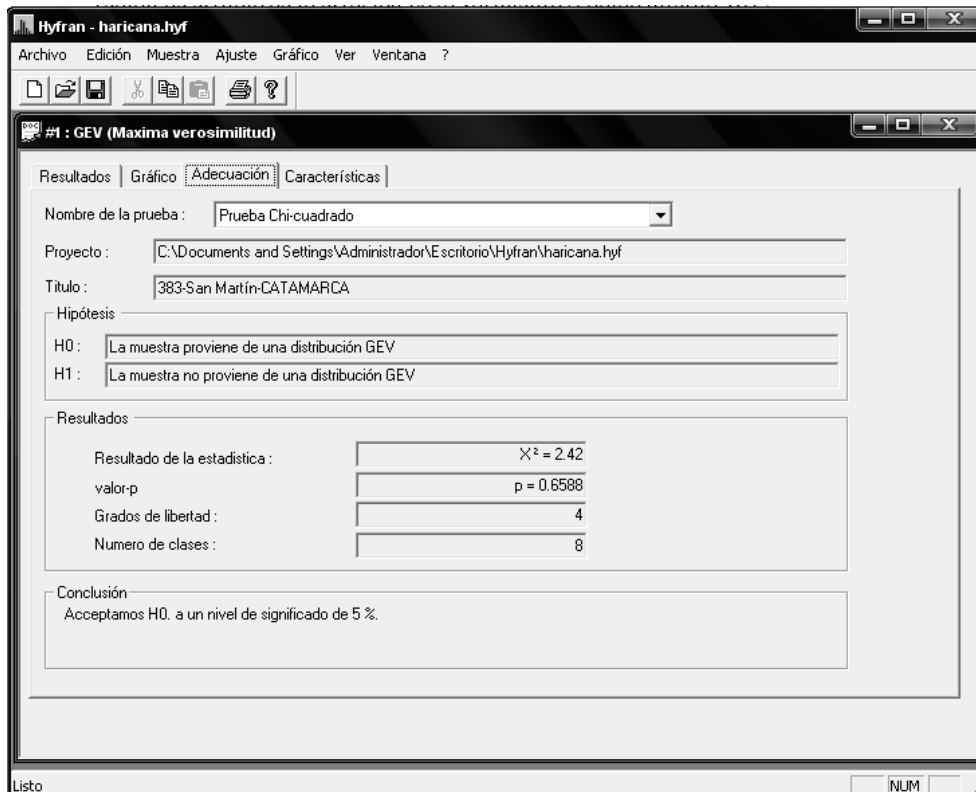


Figura 22: Test de adecuación para la función de distribución de probabilidad GEV sobre la base de la región de estudio de la estación San Martín (código interno 383)

De la tabla 15 a la 20 se muestran los resultados del análisis inferencial realizado sobre los registros de la estación San Martín con las distintas distribuciones de probabilidades y métodos de estimación de parámetros.

<b>GEV (Método de momentos)</b>					
Numero de observaciones 38					
Parámetros					
alpha	15				
k	-0.04576				
u	40				
Quintiles					
q = F(X) : probabilidad de no-excedencia					
T = 1/(1-q)					
T [años]	q	PMD [mm]	Desviación estandar [mm]	Interval de confianza (95%)	
				Inferior [mm]	Superior [mm]
10000.000	0.9999	208.88	87.83	N/D	N/D
2000.000	0.9995	174.07	51.15	N/D	N/D
1000.000	0.999	159.85	38.67	N/D	N/D
200.000	0.995	128.48	16.62	N/D	N/D
100.000	0.99	115.64	9.86	96.30	134.98
50.000	0.98	103.16	4.62	94.10	112.21
25.000	0.96	90.98	0.46	90.08	91.88
20.000	0.95	87.11	0.14	86.84	87.38
10.000	0.9	75.17	2.17	70.91	79.43
5.000	0.8	63.13	2.88	57.49	68.78
3.000	0.6667	53.85	2.47	49.01	58.69
2.000	0.5	45.72	1.41	42.96	48.49
1.429	0.3	37.56	0.33	36.92	38.21
1.250	0.2	33.35	1.50	30.42	36.29
1.111	0.1	28.24	3.17	22.03	34.45
1.053	0.05	24.53	4.55	15.61	33.46
1.020	0.02	20.82	6.09	8.88	32.76
1.010	0.01	18.57	7.10	4.66	32.48
1.005	0.005	16.66	8.00	0.98	32.33
1.001	0.001	13.06	9.80	-6.15	32.27
1.001	0.0005	11.77	10.48	N/D	N/D
1.000	0.0001	9.21	11.89	N/D	N/D

Tabla 15: Estimación de laminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad GEV (parámetros estimados por el método de momentos) sobre los registros de 38 años de la estación San Martín de la provincia de Catamarca (código interno 383)

**Gumbel (Método de momentos)**

Numero de observaciones 38

Parámetros  
 u                      40  
 alpha                16

Quintiles  
 q = F(X) : probabilidad de no-excedencia  
 T = 1/(1-q)

T [años]	q	PMD [mm]	Desviación estandar [mm]	Interval de confianza (95%)	
				Inferior [mm]	Superior [mm]
10000.000	0.9999	184.92	24.97	135.97	233.87
2000.000	0.9995	159.67	20.70	119.08	200.25
1000.000	0.999	148.79	18.87	111.79	185.78
200.000	0.995	123.50	14.63	94.83	152.18
100.000	0.99	112.59	12.81	87.48	137.70
50.000	0.98	101.64	11.00	80.08	123.19
25.000	0.96	90.60	9.19	72.59	108.61
20.000	0.95	87.02	8.61	70.14	103.90
10.000	0.9	75.72	6.82	62.36	89.08
5.000	0.8	63.95	5.05	54.06	73.84
3.000	0.6667	54.58	3.81	47.12	62.04
2.000	0.5	46.17	3.00	40.29	52.04
1.429	0.3	37.51	2.75	32.11	42.90
1.250	0.2	32.95	2.93	27.21	38.70
1.111	0.1	27.33	3.39	20.69	33.98
1.053	0.05	23.20	3.84	15.67	30.74
1.020	0.02	19.02	4.37	10.44	27.59
1.010	0.01	16.46	4.72	7.20	25.71
1.005	0.005	14.26	5.03	4.40	24.12
1.001	0.001	10.10	5.64	-0.96	21.15
1.001	0.0005	8.60	5.86	-2.90	20.09
1.000	0.0001	5.58	6.32	-6.81	17.97

Tabla 16: Estimación de laminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad Gumbel (parámetros estimados por el método de momentos) sobre los registros de de 38 años de la estación San Martín de la provincia de Catamarca (código interno 383)

**Log-Pearson tipo III (Método de momentos (BOB), basis = 10)**

Numero de observaciones 38

Parámetros

alpha	149
lambda	609
m	-2

Quintiles

q = F(X) : probabilidad de no-excedencia  
T = 1/(1-q)

T [años]	q	PMD [mm]	Desviación estandar [mm]	Interval de confianza (95%)	
				Inferior [mm]	Superior [mm]
2000.000	0.9995	169.14	79.14	N/D	N/D
1000.000	0.999	155.70	63.11	N/D	N/D
200.000	0.995	126.11	33.78	N/D	N/D
100.000	0.99	113.97	24.34	N/D	N/D
50.000	0.98	102.11	16.77	69.25	134.98
25.000	0.96	90.46	11.07	68.75	112.16
20.000	0.95	86.73	9.70	67.70	105.75
10.000	0.9	75.12	6.68	62.01	88.22
5.000	0.8	63.24	5.24	52.96	73.51
3.000	0.6667	54.08	4.37	45.52	62.64
2.000	0.5	45.74	3.46	38.96	52.52
1.429	0.3	37.53	2.54	32.55	42.50
1.250	0.2	33.34	2.54	28.36	38.32
1.111	0.1	28.35	3.30	21.89	34.82
1.053	0.05	24.83	4.29	16.43	33.23
1.020	0.02	21.41	5.59	10.45	32.38
1.010	0.01	19.41	6.52	6.63	32.18
1.005	0.005	17.75	7.36	3.32	32.17
1.001	0.001	14.78	8.98	N/D	N/D
1.001	0.0005	13.77	9.53	N/D	N/D
1.000	0.0001	11.86	10.56	N/D	N/D

Tabla 17: Estimación de laminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad Log-Pearson tipo III (parámetros estimados por el método de momentos) sobre los registros de 38 años de la estación San Martín de la provincia de Catamarca (código interno 383).



**GEV (Maxima verosimilitud)**

Numero de observaciones 38

Parámetros

alpha                    14

k                         -0.047276

u                         40

Quintiles

q = F(X) : probabilidad de no-excedencia

T = 1/(1-q)

T [años]	q	PMD [mm]	Desviación estandar [mm]	Interval de confianza (95%)	
				Inferior [mm]	Superior [mm]
10000.000	0.9999	206.38	92.46	N/D	N/D
2000.000	0.9995	171.94	59.79	N/D	N/D
1000.000	0.999	157.89	48.38	N/D	N/D
200.000	0.995	126.98	27.42	N/D	N/D
100.000	0.99	114.34	20.60	73.95	154.73
50.000	0.98	102.07	15.02	72.63	131.51
25.000	0.96	90.11	10.59	69.34	110.88
20.000	0.95	86.31	9.43	67.82	104.80
10.000	0.9	74.61	6.49	61.89	87.33
5.000	0.8	62.82	4.53	53.93	71.71
3.000	0.6667	53.73	3.57	46.73	60.74
2.000	0.5	45.79	2.96	40.00	51.58
1.429	0.3	37.82	2.48	32.96	42.67
1.250	0.2	33.71	2.33	29.14	38.28
1.111	0.1	28.72	2.36	24.10	33.34
1.053	0.05	25.11	2.58	20.06	30.16
1.020	0.02	21.49	2.99	15.62	27.35
1.010	0.01	19.30	3.33	12.76	25.83
1.005	0.005	17.43	3.68	10.22	24.63
1.001	0.001	13.93	4.43	5.23	22.62
1.001	0.0005	12.67	4.74	3.38	21.97
1.000	0.0001	10.18	5.40	-0.41	20.76

Tabla 18: Estimación de laminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad GEV (parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud) sobre los registros de 38 años de la estación San Martín de la provincia de Catamarca (código interno 383).

**Gumbel (Maxima verosimilitud)**

Numero de observaciones 38

Parámetros  
 u                      41  
 alpha                15

Quintiles  
 q = F(X) : probabilidad de no-excedencia  
 T = 1/(1-q)

T [años]	q	PMD [mm]	Desviación estandar [mm]	Interval de confianza (95%)	
				Inferior [mm]	Superior [mm]
10000.000	0.9999	178.03	18.67	141.44	214.62
2000.000	0.9995	154.03	15.60	123.45	184.60
1000.000	0.999	143.69	14.28	115.70	171.68
200.000	0.995	119.66	11.23	97.65	141.67
100.000	0.99	109.29	9.92	89.83	128.74
50.000	0.98	98.88	8.63	81.97	115.79
25.000	0.96	88.39	7.34	74.01	102.77
20.000	0.95	84.99	6.92	71.42	98.55
10.000	0.9	74.25	5.64	63.19	85.32
5.000	0.8	63.06	4.38	54.48	71.65
3.000	0.6667	54.16	3.48	47.34	60.98
2.000	0.5	46.16	2.83	40.62	51.71
1.429	0.3	37.93	2.45	33.12	42.74
1.250	0.2	33.60	2.42	28.85	38.35
1.111	0.1	28.26	2.56	23.24	33.29
1.053	0.05	24.34	2.77	18.91	29.77
1.020	0.02	20.36	3.05	14.37	26.35
1.010	0.01	17.93	3.26	11.55	24.31
1.005	0.005	15.84	3.44	9.09	22.59
1.001	0.001	11.88	3.82	4.39	19.38
1.001	0.0005	10.46	3.97	2.68	18.23
1.000	0.0001	7.59	4.27	-0.77	15.96

Tabla 19: Estimación de laminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad Gumbel (parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud) sobre los registros de 38 años de la estación San Martín de la provincia de Catamarca (código interno 383).

**Lognormal (Maxima verosimilitud)**

Numero de observaciones 38

Parámetros  
 mu 4  
 sigma 0.381932

Quintiles  
 q = F(X) : probabilidad de no-excedencia  
 T = 1/(1-q)

T [años]	q	PMD [mm]	Desviación estandar [mm]	Interval de confianza (95%)	
				Inferior [mm]	Superior [mm]
10000.000	0.9999	190.53	33.60	124.66	256.41
2000.000	0.9995	161.78	25.67	111.44	212.11
1000.000	0.999	149.86	22.56	105.63	194.10
200.000	0.995	123.14	16.02	91.74	154.54
100.000	0.99	111.95	13.49	85.51	138.38
50.000	0.98	100.88	11.12	79.07	122.68
25.000	0.96	89.85	8.93	72.34	107.36
20.000	0.95	86.29	8.27	70.09	102.49
10.000	0.9	75.11	6.32	62.72	87.49
5.000	0.8	63.48	4.59	54.48	72.49
3.000	0.6667	54.26	3.52	47.36	61.15
2.000	0.5	46.03	2.85	40.44	51.62
1.429	0.3	37.68	2.49	32.80	42.57
1.250	0.2	33.38	2.42	28.65	38.12
1.111	0.1	28.21	2.37	23.56	32.87
1.053	0.05	24.56	2.35	19.95	29.17
1.020	0.02	21.01	2.32	16.47	25.55
1.010	0.01	18.93	2.28	14.46	23.40
1.005	0.005	17.21	2.24	12.82	21.60
1.001	0.001	14.14	2.13	9.97	18.31
1.001	0.0005	13.10	2.08	9.02	17.17
1.000	0.0001	11.12	1.96	7.28	14.97

Tabla 20: Estimación de laminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad LogNormal (parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud) sobre los registros de 38 años de la estación San Martín de la provincia de Catamarca (código interno 383).

Se destaca en los resultados reportados en las tablas precedentes la importancia de la amplitud de los intervalos de confianza para los valores de la variable analizada independientemente de la función de la distribución utilizada. Se puede observar en las planillas de cada ajuste que, a medida que aumenta el periodo de retorno, aumenta de forma considerable la diferencia entre el límite superior y el límite inferior lo que define el intervalo de confianza de la predicción de la lámina de lluvia diaria (Ver Figura 23).

Este aumento del intervalo que se observa, del valor estimado, es debido a que la longitud de la serie histórica, en años, es mucho menor al periodo de retorno analizado. La bibliografía aconseja que la cantidad de años en los cuales se puede realizar una extrapolación confiable es igual a cuatro veces la cantidad de datos obtenidos; es decir, que para un registro de 20 años puede realizarse una extrapolación viable de hasta 80 años (probabilidad de no excedencia= 0,99); a partir de ese punto aumenta la incertidumbre de los valores obtenidos por los métodos de ajuste. Esto es recomendable al definir el periodo de retorno conveniente para el diseño de una obra, por lo que nuestro análisis sólo llega hasta los 100 años, con lo cual será válido para el cálculo de caudales de pequeñas y medianas obras.

Podemos observar en la tabla 20 (Función de distribución de LogNormal) que el límite superior del intervalo de confianza de la variable para un periodo de retorno de 100 años es mayor que el valor medio obtenido para un periodo de retorno de 200 años. Por lo tanto, si se adoptara un  $T=200$  años, no sería conveniente porque el diseño se haría para un valor esperado para un  $T=100$  años. Debido a esto, es recomendable hacer hincapié en el hecho de que el escaso registro de datos pluviométricos con el que se cuenta en nuestro país limita la veracidad de los datos obtenidos por extrapolaciones para periodos de retorno altos.

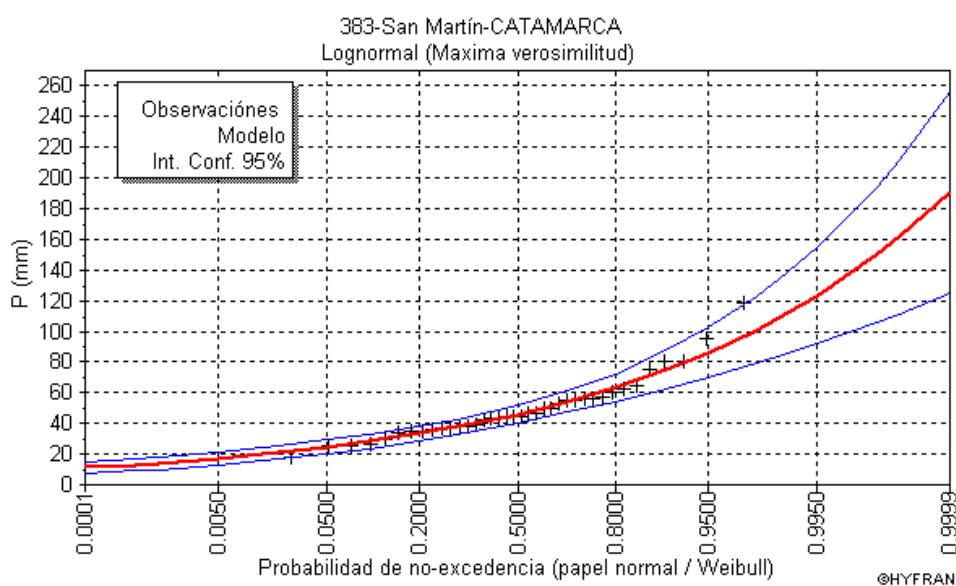


Figura 23:  $P$  (mm) vs Probabilidad de no-excedencia (incluyendo intervalos de confianza) estimada con la función de distribución de probabilidad LogNormal sobre la base de la región de estudio de la estación San Martín de la Provincia de Catamarca (código interno 383)

#### 4.4.2. Contraste entre los valores de lluvia máxima estimadas con distintas funciones de distribución y métodos de ajuste.

Para finalizar el análisis se creó una planilla (Ver Tabla 21) en donde se resumen los valores de láminas de lluvia para los distintos periodos de retorno con las distintas funciones de distribución y métodos de ajuste de los parámetros.

Tr	Precipitación Máxima Diaria Esperada para T(mm)					
	GEV		Gumbel		LogNormal	LogPearson III
	(M verosimilitud)	(Momentos)	(M verosimilitud)	(Momentos)	(M verosimilitud)	(Momentos)
100	114.34	115.64	109.29	112.59	111.95	113.97
50	102.07	103.16	98.87	101.64	100.88	102.11
25	90.11	90.97	88.39	90.60	89.85	90.45
20	86.31	87.10	84.98	87.00	86.29	86.72
10	74.60	75.16	74.25	75.72	75.10	75.11
5	62.81	63.13	63.00	63.95	63.48	63.23

Tabla 21: Contraste entre los valores de lluvia máxima estimadas con distintas funciones de distribución y métodos de ajuste

En la Tabla 22 se compara en forma relativa el porcentaje de variación de los distintos valores estimados para el mismo periodo de retorno de la función LogNormal con método de ajuste de Máxima Verosimilitud, ya que como se mencionó anteriormente, debido a que este trabajo busca extender un análisis de regionalización de lluvias máximas diarias realizado en otras regiones de Argentina, es que se adopta a priori la función de distribución LogNormal con parámetros ajustados por el método de Máxima Verosimilitud para representar las muestras de valores de lluvias diarias máximas anuales. Aun así se realizó un análisis de sensibilidad a esta decisión al comparar los resultados obtenidos con las otras funciones de distribución ajustadas con distintos métodos.

Tr	Porcentaje de variación % respecto a Log Normal					
	GEV		Gumbel		LogNormal	LogPearson III
	(M verosimilitud)	(Momentos)	(M verosimilitud)	(Momentos)	(M verosimilitud)	(Momentos)
100	97.91%	96.81%	97.62%	99.43%	100.00%	98.23%
50	98.83%	97.79%	98.01%	99.25%	100.00%	98.80%
25	99.71%	98.77%	98.38%	99.17%	100.00%	99.34%
20	99.98%	99.07%	98.48%	99.18%	100.00%	99.50%
10	99.33%	99.92%	98.87%	99.18%	100.00%	99.99%
5	98.94%	99.45%	99.24%	99.27%	100.00%	99.61%

Tabla 22: Contraste relativo de los distintos valores estimados con distintas funciones de distribución (con respecto a los valores estimados con la función de distribución LogNormal)

Se puede verificar en la tabla anterior, para períodos menores a los 50 años, las diferencias resultantes según las diferentes funciones de distribución respecto al LogNormal son menores al 3%. Mientras que para un período de retorno de 100 años, la diferencia resultante es levemente mayor (4%).

#### 4.4.3. Contraste entre los distintos funciones de ajustes por Métodos de Momentos y Método de Máxima Verosimilitud.

Para concluir con estas pruebas se compararon en un mismo gráfico (Ver Figura 24 y Figura 25) las distintas funciones de distribución de probabilidad utilizadas. Se observó que hasta para un período de retorno de 200 años inclusive (Para una probabilidad de no-excedencia de 0,995) las diferencias entre las distintas funciones propuestas no son significativas.

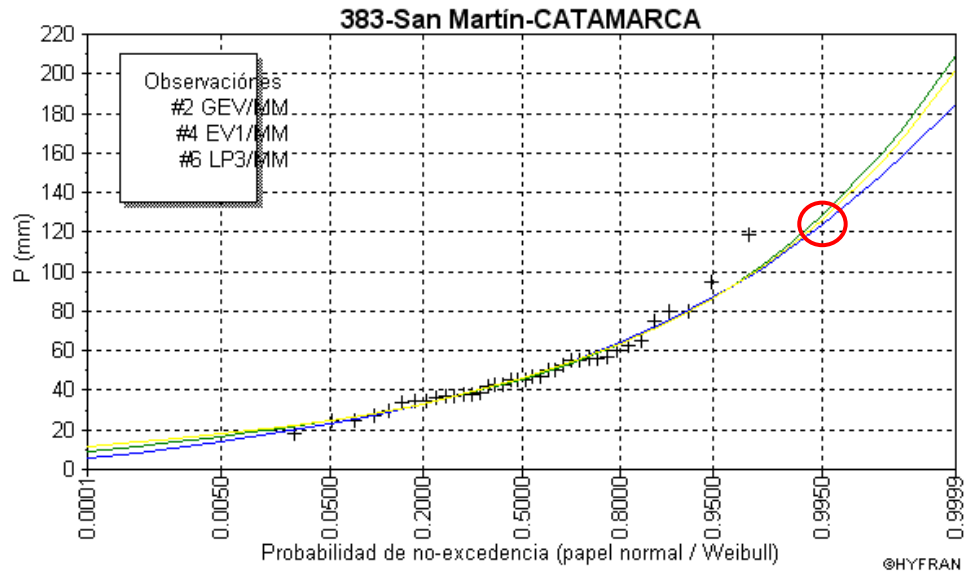


Figura 24: Comparación entre estimaciones realizadas con distintas funciones de distribución de probabilidad y parámetros ajustados con el método de momentos

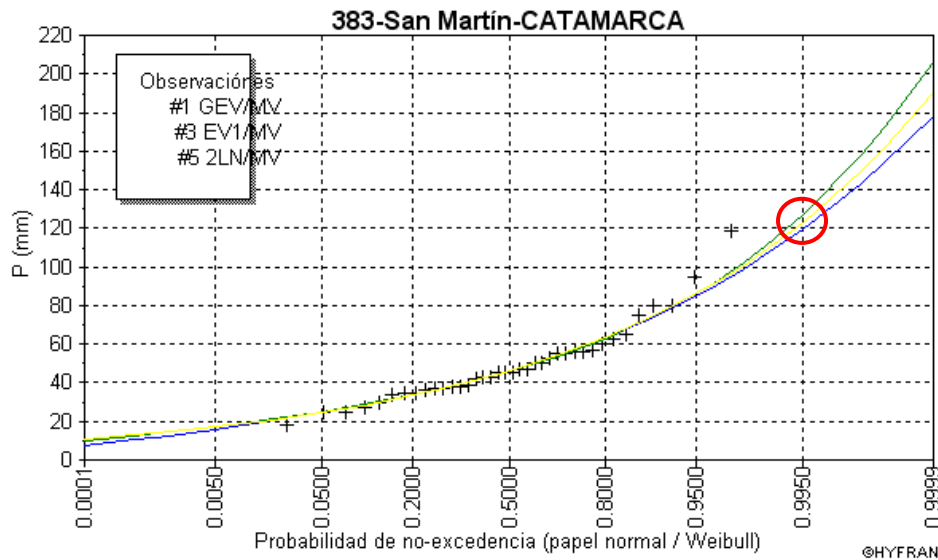


Figura 25: Comparación entre estimaciones realizadas con distintas funciones de distribución de probabilidad y parámetros ajustados con el método de verosimilitud.

# *Capítulo 5*

## ***ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA EL CONJUNTO DE ESTACIONES SELECCIONADAS***





## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA EL CONJUNTO DE ESTACIONES SELECCIONADAS.

En este apartado se busca sintetizar los resultados más relevantes de la información de todas las estaciones analizadas de Catamarca y Tucumán en el capítulo anterior (capítulo IV).

### 5.1. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS EN LAS SERIES DE LLUVIAS MÁXIMAS.

En esta sección se determinan cuales fueron las estaciones que no pasaron (es decir, que fueron rechazadas a un nivel de significancia del 1%) las pruebas de hipótesis estadísticas.

#### 5.1.1. Detección de presencia de datos Atípicos.

En Catamarca, solo la estación Presidente Roque Saenz Peña Aeródromo (Ver Tabla 23) ha evidenciado más de dos valores atípicos, por lo cual fue rechazada. Dicha eliminación solo representa el 2% de las estaciones con una longitud mayor a 14 años.

Estación Pluviométrica	Longitud de serie	Latitud	Longitud
Presidente Roque Saenz Peña Aeródromo	30	-60,450	-26,810

Tabla 23: Estación pluviométrica con más de dos Datos Atípicos en Catamarca

Por otro lado, en Tucumán las once estaciones con registro mayor a 14 años verificaron esta prueba.

#### 5.1.2. Prueba de Independencia.

De las cuarenta y nueve estaciones de Catamarca de las cuales se partió, una sola estación no paso esta prueba, lo cual constituye el 2% de las estaciones con una longitud mayor a 14 años. En la Tabla 24 se muestra la estación que no verificó esta prueba.

Estación Pluviométrica	Longitud de serie	Latitud	Longitud
Tinogasta	43	-58,985	-27,463

Tabla 24: Estación Pluviométrica que no verificó la Prueba de Independencia de sus valores máximos diarios de Catamarca

En Tucumán, de las once estaciones que se analizaron solo una no verificó esta prueba (Tabla 25).

Estación Pluviométrica	Longitud de serie	Latitud	Longitud
Lules – Potrero de las Tablas	59	-65,471	-26,858

Tabla 25: Estación Pluviométrica que no verificó la Prueba de Independencia de sus valores máximos diarios de Tucumán

### 5.1.3. Prueba de Estacionareidad.

Las estaciones que verificaron las anteriores pruebas y con longitud de serie mayor a 14 años fueron sometidas a la Prueba de Estacionalidad (Kendall). En Catamarca todas verificaron esta prueba, mientras que en Tucumán dos estaciones la rechazaron (Tabla 26). Esto representa un 18% de las estaciones de esta provincia que tienen una longitud de serie mayor a 14 años:

Estaciones Pluviométricas	Longitud de serie	Latitud	Longitud
Los Sosas – Ruta Provincial	60	-65,636	-27,101
Pavas – Las Mesadas	25	-65,928	-27,215

Tabla 26: Estaciones Pluviométricas que rechazaron la Prueba de Estacionalidad de Tucumán

### 5.1.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual.

Las estaciones restantes fueron sometidas a la Prueba de Homogeneidad (Wilcoxon) de sus registros históricos. Tanto en Catamarca como en Tucumán todas verificaron a la prueba.

Por lo tanto, se concluye que de las 50 estaciones pluviométricas con las que se inicio el análisis en Catamarca 48 pasaron las pruebas, representando estas el 96% del total. De la misma manera, para Tucumán, se partió de 11 estaciones de las cuales solo 8 pasaron las pruebas, representando un 72% del total.

En las tablas a continuación se presenta en forma descendente la depuración de las estaciones debido a las pruebas anteriores, tanto para Catamarca (Tabla 27), como para Tucumán (tabla 28):

CATAMARCA		
PRUEBAS	CANTIDAD ESTACIONES	PORCENTAJE
Estaciones Iniciales Recopiladas	154	100%
Longitud de serie $\geq$ 14 años	50	32%
Datos atípicos	49	32%
Independencia	48	31%
Estacionareidad	48	31%
Homogeneidad a Escala Anual	48	31%
Estaciones Finales Seleccionadas	48	31%

Tabla 27: Depuración de las estaciones de Catamarca según las pruebas a verificar.

TUCUMÁN		
PRUEBAS	CANTIDAD ESTACIONES	PORCENTAJE
Estaciones Iniciales Recopiladas	17	100%
Longitud de serie $\geq$ 14 años	11	65%
Datos atípicos	11	65%
Independencia	10	59%
Estacionareidad	8	47%
Homogeneidad a Escala Anual	8	47%
Estaciones Finales Seleccionadas	8	47%

Tabla 28: Depuración de las estaciones de Tucumán según las pruebas a verificar.

### 5.1.5. Contraste entre los valores de lluvia máxima estimadas con distintas funciones de distribución y métodos de ajuste para 100 años de periodo de retorno con respecto a la Distribución Log normal.

A continuación se compara, en porcentaje, los valores de la lámina de lluvia para 100 años de periodo de retorno asociadas a las distintas funciones de distribución con respecto a la “LogNormal” con un análisis similar al mostrado en la sección 4.4.2. Se puede observar en la Figura26 (Catamarca) que para longitudes de serie que oscilan entre 15 y 25 años los porcentajes son mayores, a partir de 26 comienzan a disminuir. La máxima diferencia de valores estimados con otras funciones de distribución con respecto a la LogNormal disminuye a medida que aumenta la longitud de registro.

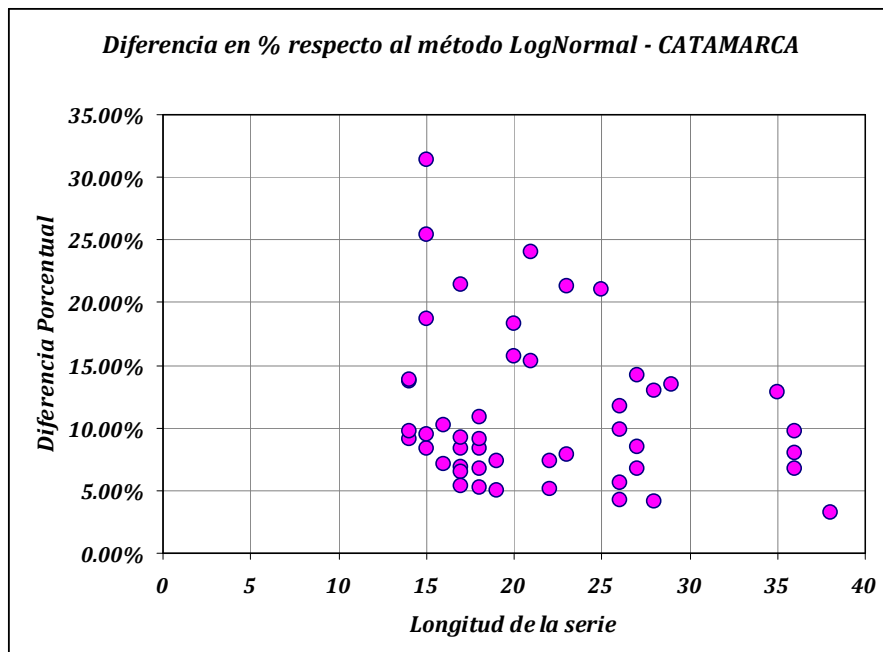


Figura 26: Evolución de la máxima diferencia porcentual entre los valores estimados con la distribución LogNormal y alguna función de distribución a medida que aumenta la longitud de la serie para Catamarca

Un análisis similar se realiza para las estaciones de la provincia de Tucumán aunque no se observa una tendencia, debido a que son muy pocas las estaciones analizadas (Figura 27).

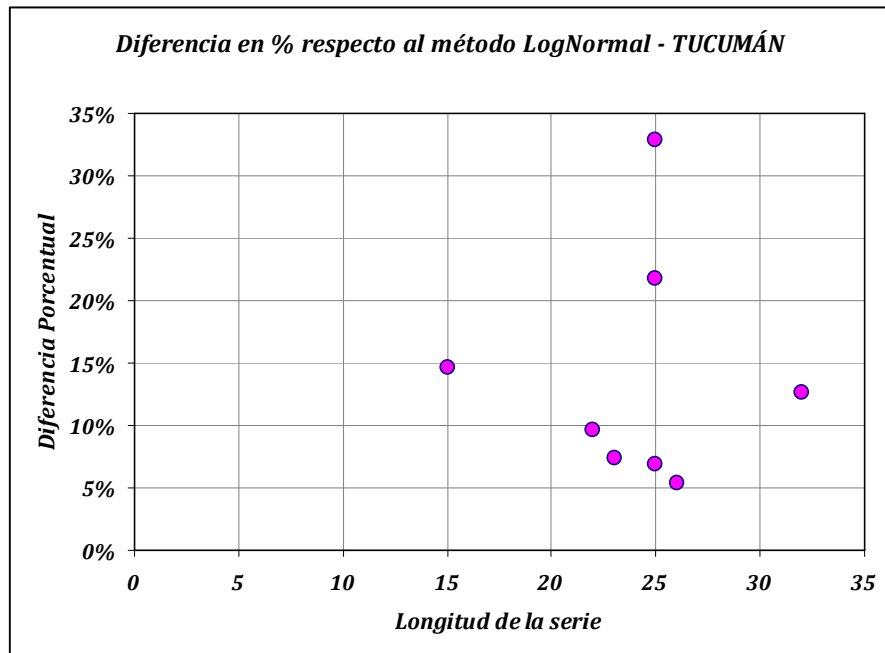


Figura 27: Evolución de la máxima diferencia porcentual entre los valores estimados con la distribución LogNormal y alguna función de distribución a medida que aumenta la longitud de la serie para Tucumán

Para analizar la importancia relativa de la selección de la función de distribución óptima se realiza un análisis para 100 años de periodo de retorno. Se elige este valor (y no los asociados a otros periodos de retorno) por ser el que más diferencia muestra en relación a los demás. En este análisis se compara la diferencia porcentual mostrada en la Figura 28 y 29 con los intervalos de confianza de la estimación de la función Log Normal.

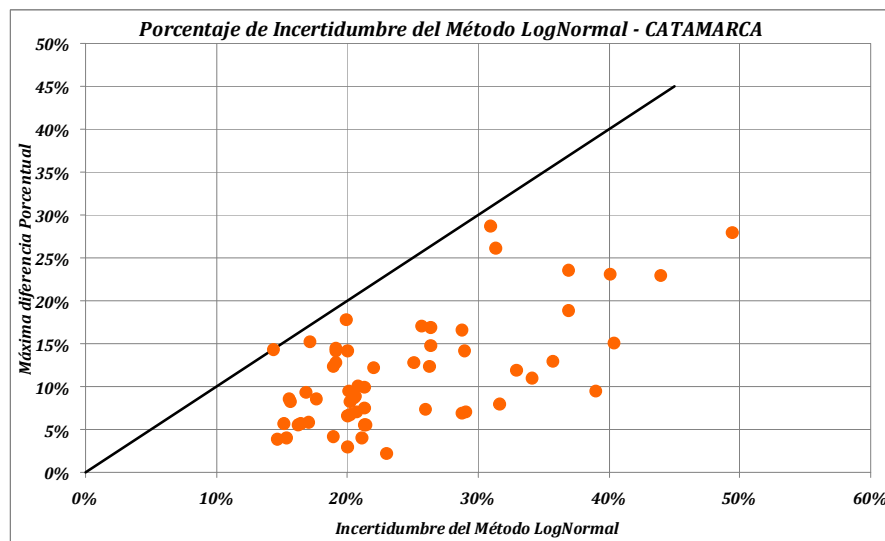


Figura 28: Análisis de dispersión del método LogNormal de Catamarca

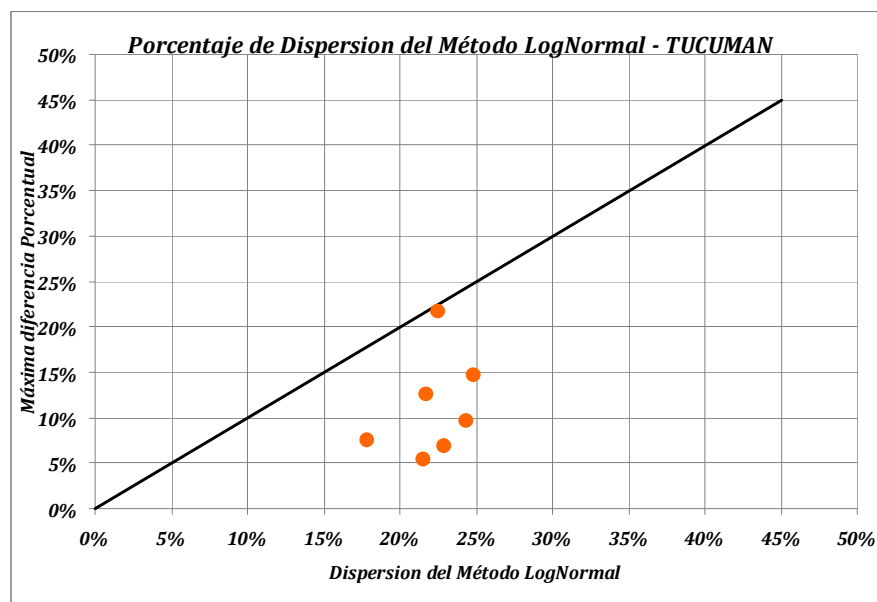


Figura 29: Análisis de dispersión del método LogNormal de Tucumán

Del análisis de las imágenes anteriores, para un período de retorno para 100 años (T=100), se muestra que el intervalo de confianza de LogNormal, comprende entre sus límites, a todas las funciones de distribución. Por lo que no incurrimos en un error significativo al adoptar esta distribución (LogNormal). Esto se demuestra al quedar todos los valores por debajo de la recta de 45 grados en las figuras.

## 5.2. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.

A continuación se presenta una tabla resumen con los datos estadísticos más importantes – Valor máximo de lámina de lluvia anual, Media y Desvío – de las estaciones finalmente seleccionadas (Ver Tabla 29 y 30). Además, en la misma se describe su nombre y código interno.

ID Org.	Nombre de la estación	Provincia	Máximo [mm]	Media [mm]	Desvío [mm]
52	Cochuna - La Banderita	Tucumán	161.3	103.51	27.27
53	Cochuna - Los Hornitos	Tucumán	224.2	119.28	38.41
54	Jaya - Piedra Grande	Tucumán	186.0	116.01	36.09
55	Jaya - Casa de Piedra	Tucumán	225.0	140.09	40.10
60	Lules - El Nogalito	Tucumán	125.0	70.92	20.30
65	Solco - Las Higueras	Tucumán	176.5	112.40	27.72
66	Solco - Yampa 2	Tucumán	211.0	139.03	43.00
83	San Miguel de Tucumán	Tucumán	149.9	94.95	23.10

Tabla 29: Datos de estadística descriptiva de las series de lluvias diarias máximas anuales finalmente seleccionadas de Tucumán

ID Org.	Nombre de la estación	Provincia	Máximo [mm]	Media [mm]	Desvío [mm]
48	Santa María Pie de Médano	Catamarca	43.8	26.10	8.61
115	Belen - Playa Larga	Catamarca	65.0	38.9	16.6
144	El Rodeo	Catamarca	122.0	60.16	21.51
147	Las Piedras Blancas	Catamarca	105.0	62.31	18.47
148	Los Castillos	Catamarca	120.0	70.03	22.82
156	Las Juntas	Catamarca	151.0	83.04	28.00
160	Cda. De Ipizca	Catamarca	143.0	84.89	29.00
161	Dique de Ipizca	Catamarca	115.0	75.12	19.00
162	El Taco	Catamarca	137.0	84.86	27.00
163	Las Ruditas	Catamarca	141.0	88.82	27.00
170	Casa Armada	Catamarca	123.0	86.86	22.00
172	La Estancia	Catamarca	122.0	86.00	17.00
174	Las Ensenadas	Catamarca	138.0	79.97	23.53
175	Ancasti	Catamarca	166.0	100.38	29.84
181	Capital	Catamarca	72.0	47.32	12.53
184	El Portezuelo	Catamarca	112.0	63.00	17.31
186	Nana Huasi	Catamarca	127.0	79.30	25.98
192	Dique de la Cañada	Catamarca	97.5	68.70	19.18
193	Guasayan	Catamarca	115.0	71.00	25.22
213	Los Angeles Capayan	Catamarca	90.0	63.68	12.70
214	Los Nacimientos	Catamarca	98.0	51.07	27.53
218	Villa Los Angeles	Catamarca	75.0	43.00	7.41
224	El Lindero	Catamarca	150.0	91.79	22.57
226	Guayondo	Catamarca	132.0	70.25	22.89
228	La Chacrita	Catamarca	140.0	88.48	27.65
232	Los Corrales	Catamarca	205.0	106.06	39.94
233	Molle Pampa	Catamarca	185.0	98.44	33.67
241	Loma Sola	Catamarca	120.0	78.25	24.11
242	Dique Montegasta	Catamarca	140.0	70.30	30.76
244	El Divisadero	Catamarca	145.0	77.28	27.22
245	El Talar	Catamarca	150.0	84.78	32.50
259	Balcozna	Catamarca	170.0	82.74	33.83
260	La Merced	Catamarca	142.0	71.57	35.77
261	La Higuera	Catamarca	142.0	77.30	28.40
262	Las Lajas	Catamarca	270.3	93.78	49.01
263	San Antonio	Catamarca	215.0	90.05	42.18
268	Mutquin	Catamarca	124.0	53.88	19.46
284	La Bajada	Catamarca	120.0	66.20	26.31
376	Amana	Catamarca	133.0	81.29	21.23
377	S. Antonio de la Paz	Catamarca	138.0	62.30	25.00
378	Esquiú	Catamarca	90.0	50.80	16.30
379	Icaño	Catamarca	122.0	65.33	23.43
380	Ipizca	Catamarca	125.0	68.83	25.32
381	Las Peñas	Catamarca	99.0	55.24	19.25
382	Majada	Catamarca	100.0	63.89	18.91
383	San Martín	Catamarca	119.0	49.47	20.12
384	Telaritos	Catamarca	119.0	49.83	25.22
385	Yerba Buena	Catamarca	128.0	72.06	22.24

Tabla 30: Datos de estadística descriptiva de las series de lluvias diarias máximas anuales finalmente seleccionadas de Catamarca

### 5.3. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA INFERENCIAL.

Se conformo una tabla resumen con los valores de distribución de probabilidad empírica para los periodos de retorno T= 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años de las estaciones finalmente seleccionadas (Ver Tabla 31 y 32). Además, en la misma se describe su nombre y código interno.

ID Org.	Nombre de la estación	PMD2	PMD5	PMD10	PMD20	PMD25	PMD50	PMD100
48	Santa María Pie de Médano	24.84	32.53	37.46	42.08	43.53	47.98	52.35
115	Belen - Playa Larga	36.00	52.00	63.00	75.00	78.00	90.00	101.00
144	El Rodeo	57.00	75.10	86.76	97.73	101.18	111.75	122.19
147	Las Piedras Blancas	59.93	75.84	85.79	94.98	97.83	106.49	114.94
148	Los Castillos	67.13	85.77	97.50	108.39	111.78	122.10	132.19
156	Las Juntas	79.22	102.92	118.03	132.16	136.58	150.09	163.37
160	Cda. De Ipizca	80.64	106.37	122.96	138.59	143.51	158.56	173.45
161	Dique de Ipizca	72.92	90.12	100.69	110.33	113.31	120.30	130.99
162	El Taco	86.76	106.81	123.63	139.51	144.50	159.81	174.96
163	Las Ruditas	85.30	109.02	123.95	137.81	142.13	155.26	168.11
170	Casa Armada	84.24	104.88	117.63	129.31	132.92	143.84	154.42
172	La Estancia	84.50	99.52	108.41	116.35	118.77	125.99	132.85
174	Las Enseñadas	78.97	99.90	112.98	125.06	128.81	140.19	151.29
175	Ancasti	96.35	123.58	140.77	156.75	161.74	176.91	191.77
181	Capital	45.67	57.59	65.02	71.89	73.99	80.44	86.71
184	El Portezuelo	60.98	75.68	84.74	93.02	95.59	103.32	110.81
186	Nana Huasi	75.12	100.39	116.84	132.43	137.35	152.47	167.49
192	Dique de la Cañada	66.15	84.31	97.72	106.29	109.59	119.59	129.37
193	Guasayan	66.71	90.97	107.00	122.34	127.21	142.26	157.30
213	Los Angeles Capayan	62.45	74.23	81.26	87.55	89.48	95.23	100.71
214	Los Nacimientos	44.01	71.78	92.72	114.54	121.81	145.28	170.23
218	Villa Los Angeles	43.87	52.54	57.75	62.43	63.86	68.15	72.26
224	El Lindero	89.24	109.62	122.09	133.43	136.93	147.47	157.64
226	Guayondo?	66.90	87.45	100.61	112.96	116.83	128.67	140.34
228	La Chacrita?	84.41	110.06	126.44	141.79	146.60	161.30	175.78
232	Los Corrales?	99.50	136.00	159.00	182.00	189.00	212.00	234.00
233	Molle Pampa?	93.10	124.41	144.80	164.12	170.21	188.95	207.56
241	Loma Sola?	74.89	97.03	111.11	124.26	128.37	140.92	153.26
242	Dique Montegasta	64.61	91.50	109.76	127.56	133.26	151.05	169.07
244	El Divisadero	72.93	98.11	114.58	130.25	135.20	150.45	165.63
245	El Talar	79.25	108.93	128.65	147.60	153.63	172.28	190.98
259	Balcozna	76.83	106.48	126.30	145.43	151.52	170.43	189.43
260	La Merced	63.67	97.25	121.38	145.75	153.73	179.07	205.41
261	La Higuera	72.20	99.70	118.00	136.00	141.00	159.00	176.00
262	Las Lajas	84.84	122.79	149.00	174.80	183.13	209.21	235.84
263	San Antonio	82.45	117.29	141.04	164.24	171.69	194.93	218.51
268	Mutquin	51.03	67.39	77.94	87.89	91.02	100.61	110.09
284	La Bajada	61.65	85.56	101.56	117.00	121.92	137.20	152.56
376	Amana	78.90	97.40	109.00	119.00	122.00	132.00	141.00
377	S. Antonio de la Paz	58.60	77.70	90.00	102.00	105.00	117.00	128.00
378	Esquiú	48.40	63.50	73.30	82.40	85.30	94.10	103.00
379	Icaño	61.25	84.06	99.20	113.74	118.36	132.66	146.99
380	Ipizca	64.28	88.90	105.34	121.18	126.22	141.86	157.58
381	Las Peñas	51.63	71.72	85.17	98.16	102.31	115.16	128.10
382	Majada	61.45	78.02	88.40	98.00	100.99	110.05	118.90
383	San Martín	46.03	63.48	75.11	86.29	89.85	100.88	111.95
384	Telaritos	44.71	66.28	81.44	96.53	101.43	116.89	132.78
385	Yerba Buena	68.75	89.65	103.01	115.53	119.45	131.44	143.24

Tabla 31: Valores de lluvias máximas diarias (PMDT) estimadas para distintos períodos T (2, 5, 10, 20, 25, 50, 100) para las estaciones finalmente seleccionadas de Catamarca

ID Org.	Nombre de la estación	PMD2	PMD5	PMD10	PMD20	PMD25	PMD50	PMD100
52	Cochuna - La Banderita	100.00	124.00	138.00	151.00	155.00	167.00	179.00
53	Cochuna - Los Hornitos	114.00	146.00	166.00	184.00	190.00	207.00	224.00
54	Jaya - Piedra Grande	112.00	141.00	159.00	176.00	181.00	197.00	212.00
55	Jaya - Casa de Piedra	134.00	172.00	196.00	218.00	224.00	245.00	266.00
60	Lules - El Nogalito	68.27	86.51	97.92	108.00	112.00	122.00	131.00
65	Solco - Las Higueras	109.00	135.00	152.00	166.00	171.00	185.00	198.00
66	Solco - Yampa 2	133.00	171.00	196.00	220.00	228.00	252.00	275.00
83	San Miguel de Tucumán	92.00	113.00	126.00	137.00	141.00	152.00	162.00

Tabla 32: Valores de lluvias máximas diarias (PMDT) estimadas para distintos períodos T (2, 5, 10, 20, 25, 50, 100) para las estaciones finalmente seleccionadas de Tucumán

Finalmente para contrastar mostramos las Figuras 30. Contiene sólo las estaciones que verificaron las pruebas de hipótesis de estadísticas básicas y que fueron analizadas con estadística inferencial.

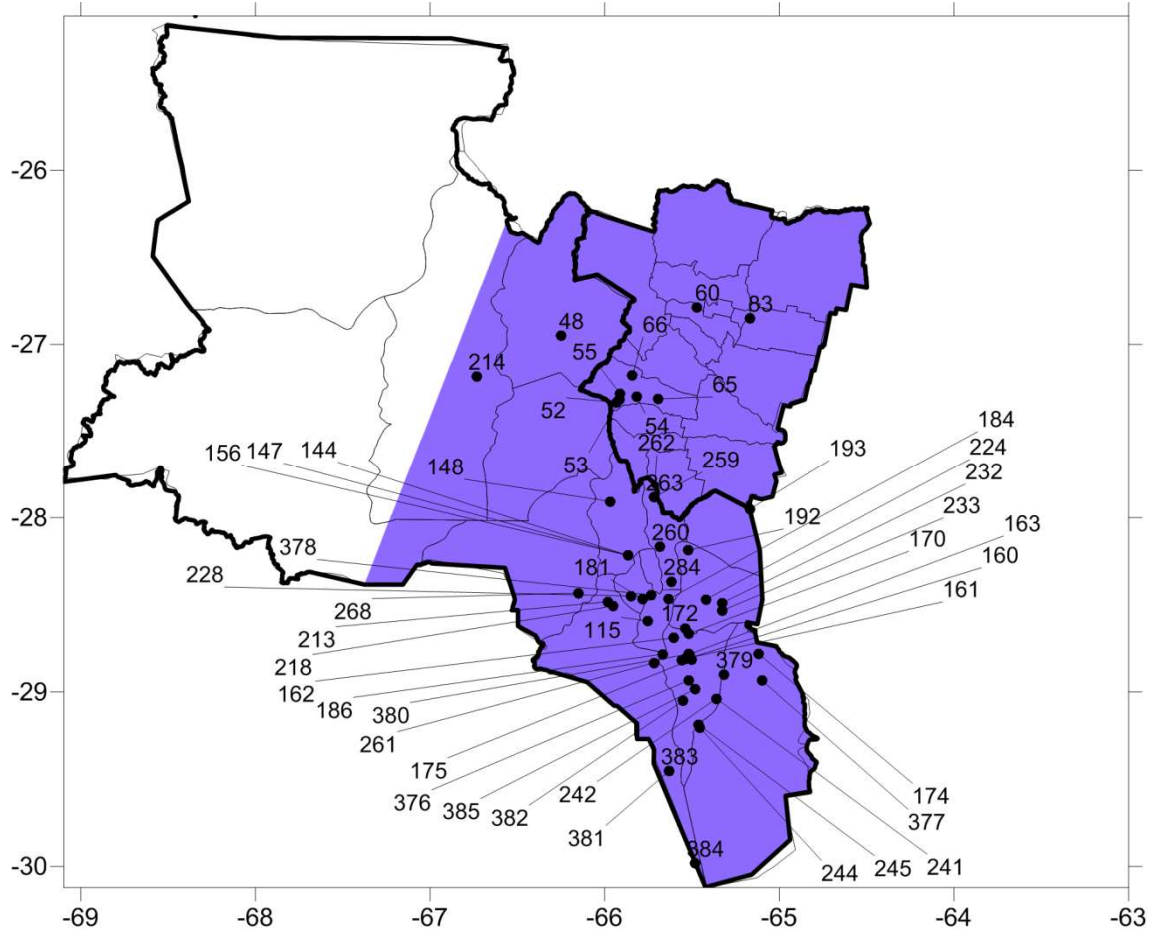


Figura 30: Estaciones finalmente seleccionadas de Catamarca y Tucumán.



# *Capítulo 6*

## **REGIONALIZACIÓN**



## **6. REGIONALIZACIÓN.**

### **6.1. INTRODUCCIÓN.**

Se procedió a ubicar espacialmente las distintas estaciones pluviométricas y regionalizar los valores de lámina de lluvia para los distintos periodos de retorno, para luego, mediante el empleo de técnicas de análisis espacial poder interpolar la información puntual con el objeto de generar grillas de información pluviométrica.

En este proceso se utilizó un Sistema de Información Geográfica (*SIG*), el cual es definido como un sistema asistido por computadora para la adquisición, almacenamiento, procesamiento, análisis y visualización de datos geográficos. En la actualidad, se encuentran disponibles una gran variedad de herramientas y paquetes computacionales para asistir estas tareas. El paquete computacional elegido fue el Idrisi Selva, el cual permite generar un archivo vectorial o de tipo raster georeferenciado.

### **6.2. CREACIÓN DE UNA BASE DE DATOS.**

Para la conformación de la base de datos empleada se recurre al paquete computacional IDRISI Selva, con el cual es posible transformar datos numéricos en un archivo digital. La gran virtud de este sistema es la facilidad con la que se puede relacionar información y referenciarla mediante coordenadas al espacio. A continuación se detallan los pasos seguidos para la elaboración de la base de datos con el programa de referencia.

1. Se realiza una hoja de cálculo, en la cual se visualiza el nombre de las estaciones junto a su código, coordenadas geográficas, parámetros estadísticos, lluvia máxima diaria anual para los distintos periodos de retorno, juntos con sus intervalos de confianza, además de otra información relevante como longitud de serie, departamento, etc.
2. Con la información ya organizada, se prosigue a incorporarla al programa IDRISI Selva. Para ello, es necesario crear una nueva Bases de Datos, en el menú GIS Analysis se elige la opción DatabaseQuery y luego DatabaseWorkshop (Figura 31) o bien a través del menú Data Entry. En forma directa se podrá hacer clic sobre el icono en la barra de herramientas.
3. Una vez abierto el cuadro de diálogo, se debe crear un nuevo archivo, para lo cual, en el menú File se selecciona la opción New y se le asigna un nombre.
4. A continuación, se debe importar la planilla de Excel previamente tabulada. En el cuadro de diálogo de DatabaseWorkshop, en el menú File seleccionar la opción Import, Table y posteriormente fromExternal File como se muestra en la Figura32. Finalmente, se debe guardar con la opción Save del menú File.

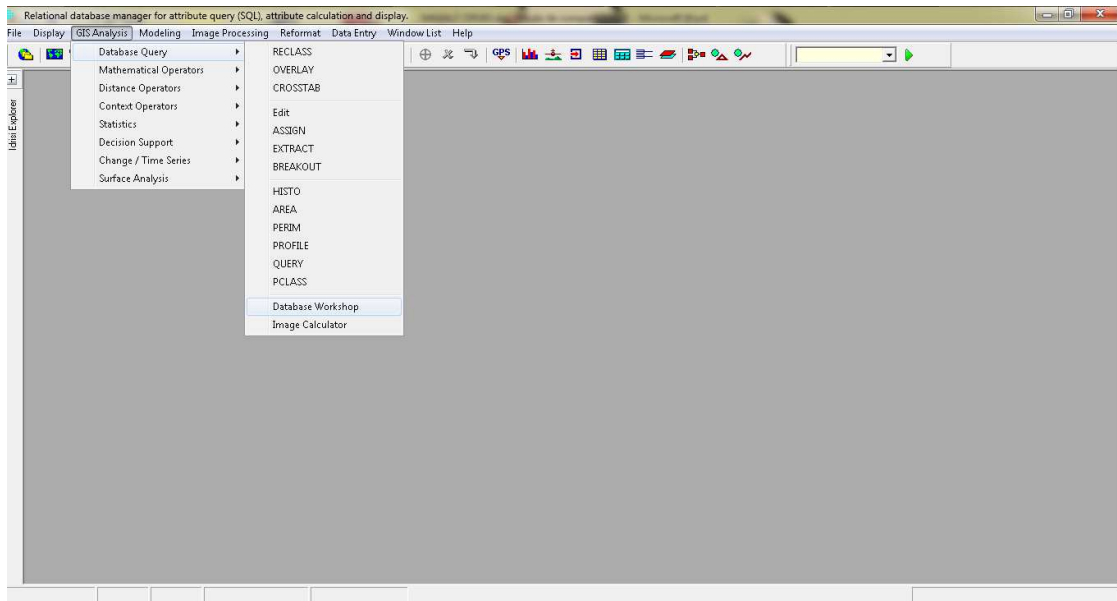


Figura 31: Cuadro de diálogo DatabaseWorkshop.

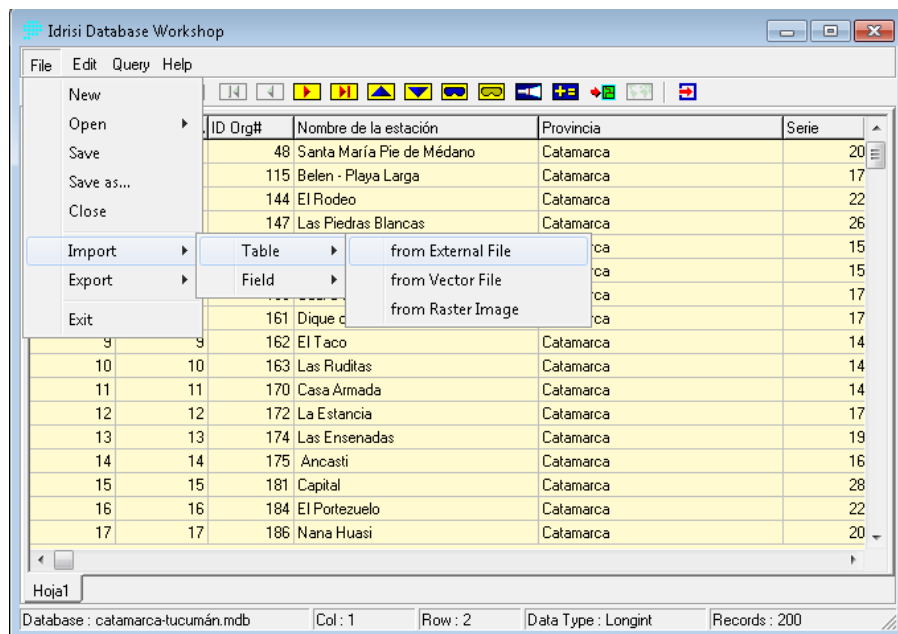



Figura 32: Cuadro de diálogo DatabaseWorkshop – Import

### 6.3. CREACIÓN DE ARCHIVO VECTORIAL Y DE VALORES.

Disponiendo de la base de datos, es necesario crear un archivo de tipo vector punto para posteriormente generar una Imagen Digital. Los archivos de puntos se utilizan para representar características, donde sólo tiene importancia la ubicación. Cada característica de punto se describe con un valor de atributo, que puede ser entero o real, y con un par de coordenadas (X, Y). En nuestro caso, cada punto representa una de las estaciones pluviométrica y los atributos asignados son los distintos valores Mínimos, Medios y Máximos esperados de lluvia máxima diaria anual para recurrencias de 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años.

Un archivo de valores es un archivo muy simple que contiene los valores para un solo atributo. Se almacena en un formato de texto ASCII y consiste en dos columnas de datos separadas por uno o más espacios. La primer columna contiene un identificador que puede usarse para asociar el valor con una característica tanto raster como vectorial, mientras que la segunda contiene el valor del atributo. Los archivos con valores de atributo tienen una extensión .avl. Dichos archivos pueden ser importados o exportados desde o hacia una tabla de base de datos usando el Taller de Bases de Datos.

1. En primer lugar, se debe abrir la base de datos. Para ello, desde el menú File se elige la opción Open y se selecciona Database File.
2. Una vez visualizada la base de datos correspondiente, nuevamente en el menú File, se escoge la opción Export y se selecciona Field, X Y to Point Vector File como se muestra en la Figura 33. Se genera de esta manera la Figura 34.
3. Luego se debe abrir el cuadro de diálogo Export Vector File como se muestra en la Figura 35. En el presente trabajo se adopta el sistema de coordenadas (X, Y) de latitud y longitud con el cual se ubican las estaciones pluviométricas. Por esta razón se utiliza el sistema de referencia LATLONG equivalente al WSG1984 y grados como unidades de referencia.
4. Luego se debe establecer un vector de enlace. Para ello se debe hacer clic en el ícono  para abrir el cuadro de diálogo de Establish a Display Link, como se muestra en la Figura 36.

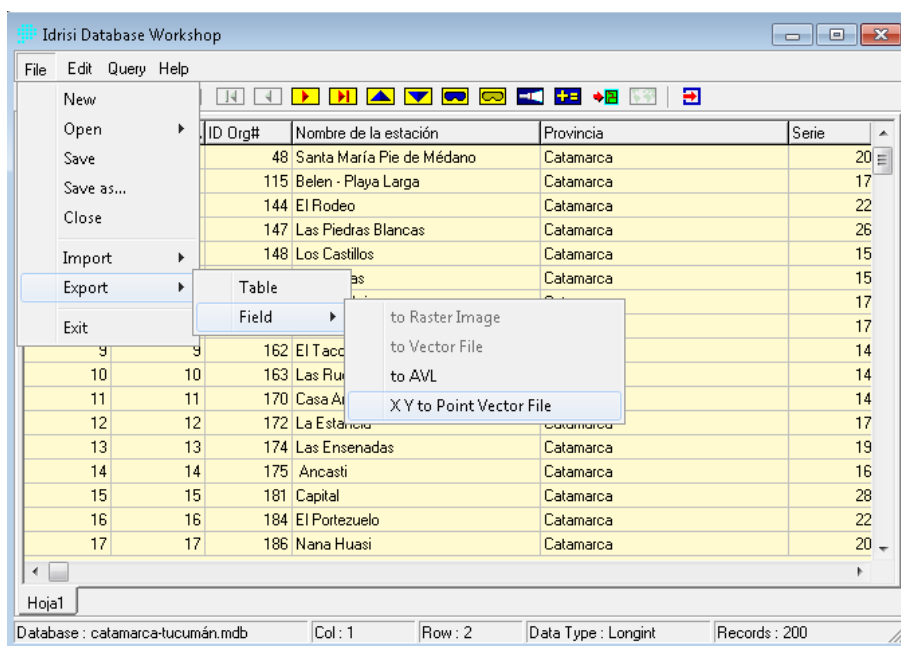


Figura 33: Cuadro de Diálogo Database Workshop - Export



Figura 34: Mapa con la localización de las estaciones en las provincias de Catamarca y Tucumán.

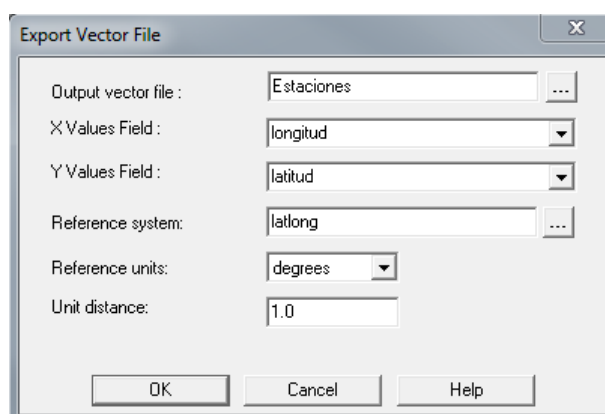


Figura 35: Cuadro de Diálogo Export Vector File.

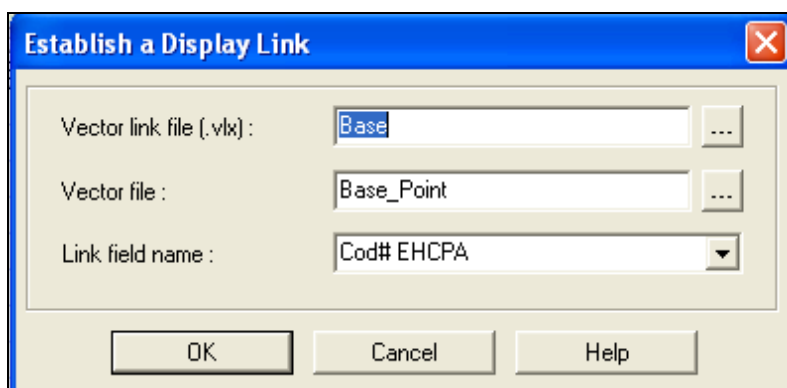


Figura 36: Cuadro de Diálogo de Establish a Display Link

Vector link file: asocia un archivo vectorial de definición de características con una tabla de base de datos.

Vector file: la hoja que se usa como base (archivo vectorial de valores).

Link fieldname: el archivo al cual se hace referencia.

Desde el cuadro DatabaseWorkshop se ejecuta la opción CreateIdrisi Vector File. Aparecerá en pantalla una nueva ventana Export Vector File que se debe completar de la siguiente manera, según la Figura 37:

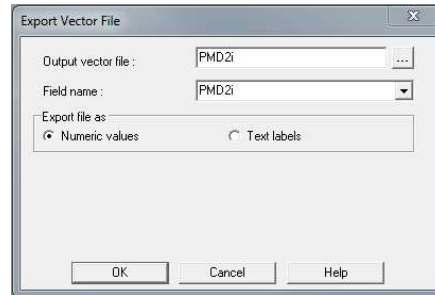


Figura 37: Cuadro de Diálogo Export Vector File

Dicho mecanismo para la generación de vectores se realiza para los valores mínimos, medios y máximos esperados de precipitación para recurrencias de 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años. Los mapas logrados hasta el momento son como el de la Figura 38.

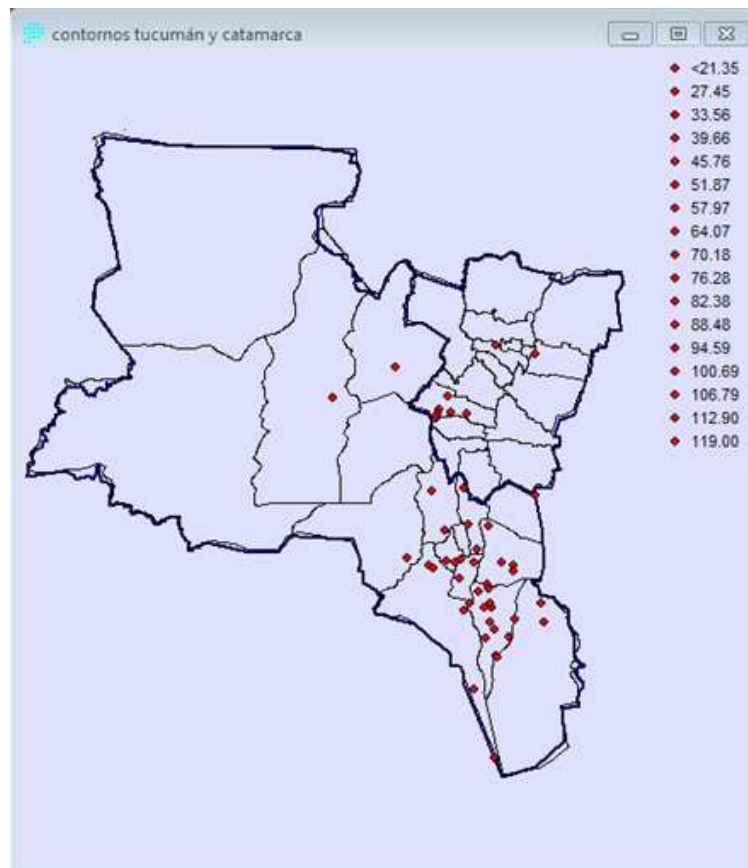


Figura 38: Mapa con la localización y valores de lluvias máximas diarias para  $T=2$  años, en las provincias de Catamarca y Tucumán

#### 6.4. GENERACIÓN DE UNA MÁSCARA PARA DELIMITAR LA ZONA DE INTERPOLACIÓN.

Para poder generar las superficies con el método de interpolación de Kriging, el programa nos pide la creación de una “mascara”, para delimitar las zonas de interpolación de la variable en cuestión. Para ello se describe a continuación los pasos a seguir:

- a) En Autocad genero la superficie que luego utilizare como mascara, esta debe ser creada con una polilínea cerrada. Una vez terminada guardo el archivo en formato “dxf” – “Autocad R12”.
- b) Importo el archivo dxf a IDRISI, a través de la función “file”, “Import”, “Desktop publishingformats”, “DXFIDRISI” (Ver Figura 39 y Figura 40)

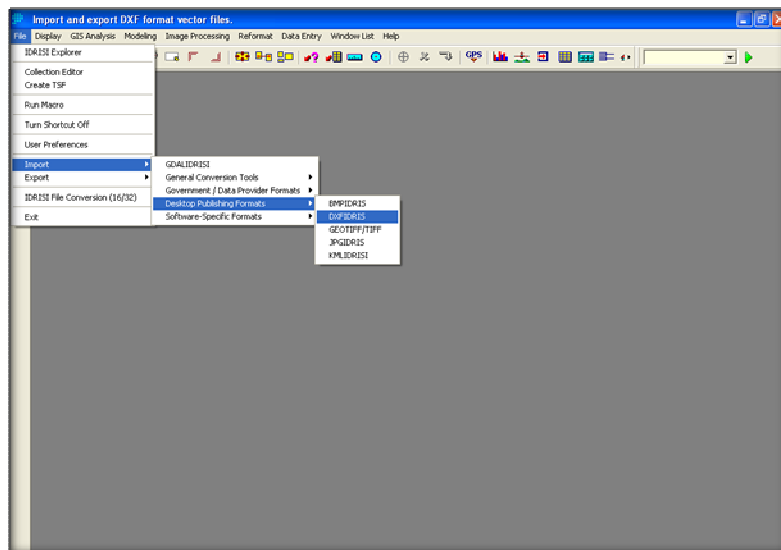


Figura 39: Cuadro de dialogo Import Dxf IDRISI.

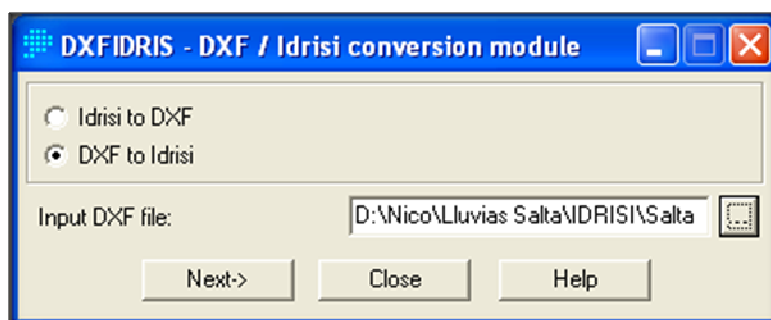


Figura 40: Cuadro de dialogo DXF / Idrisi conversión module

- c) Se debe describir la configuración de la superficie, como ser Reference system, Reference units, Featurestoextract. En la Figura41, se puede apreciar en detalle la metodología.



d) Luego debo transformar esta superficie que se encuentra como vector en un archivo raster, para poder ser utilizado en el modelo de Kriging, a través de la opción “Reformat” y “RASTERVECTOR” (Ver Figura 42 y Figura 43).

e) Por último, en la Figura 44, se muestra el formato de salida de la máscara utilizada para las provincias de Catamarca y Tucumán donde se excluye del análisis la región donde no se recopilaron datos pluviométricos.

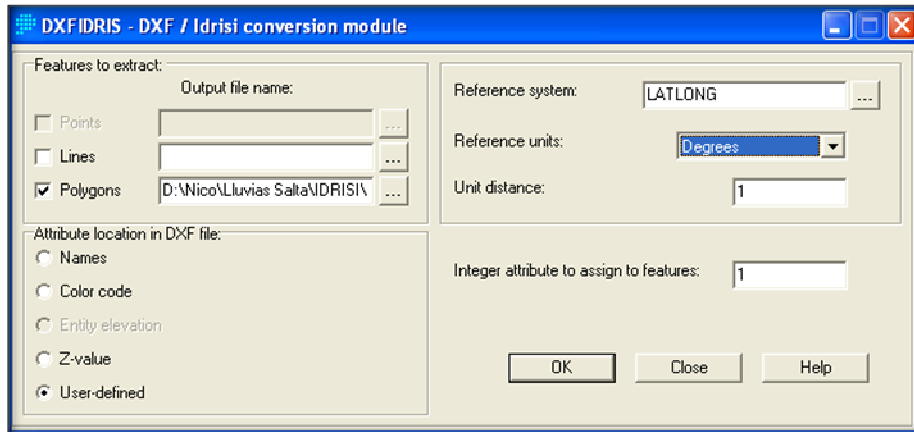


Figura 41: Cuadro de dialogo DXF / Idrisi conversión module

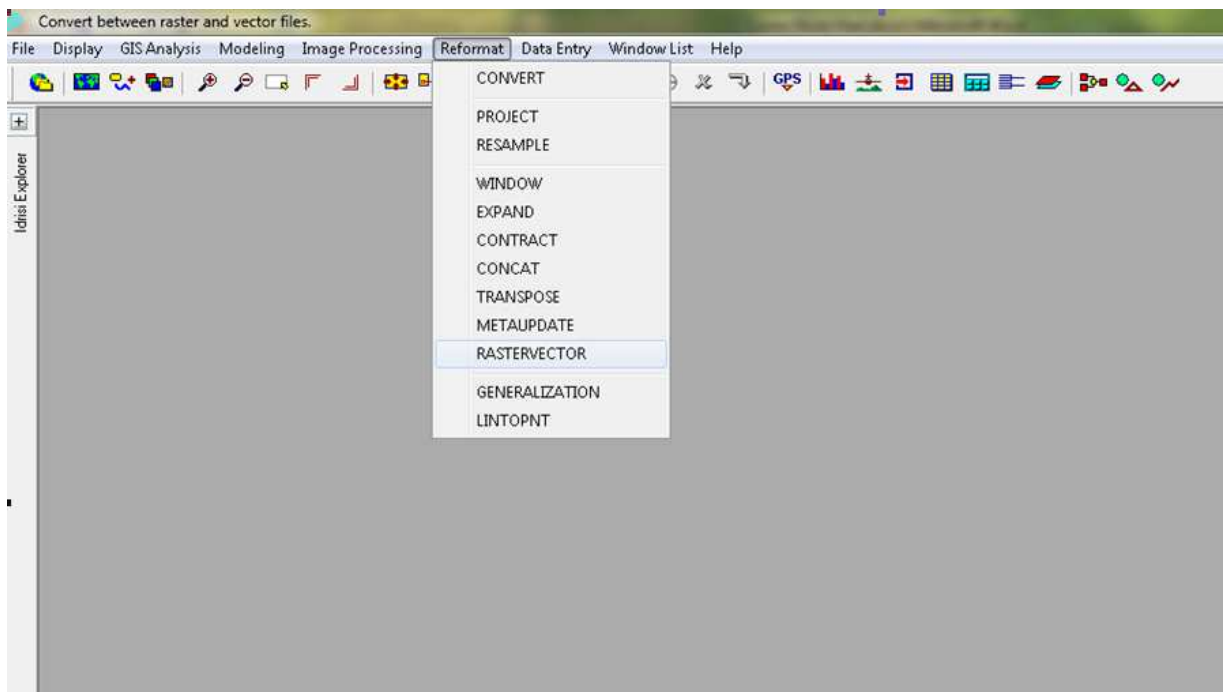


Figura 42: Cuadro de diálogo RASTERVECTOR

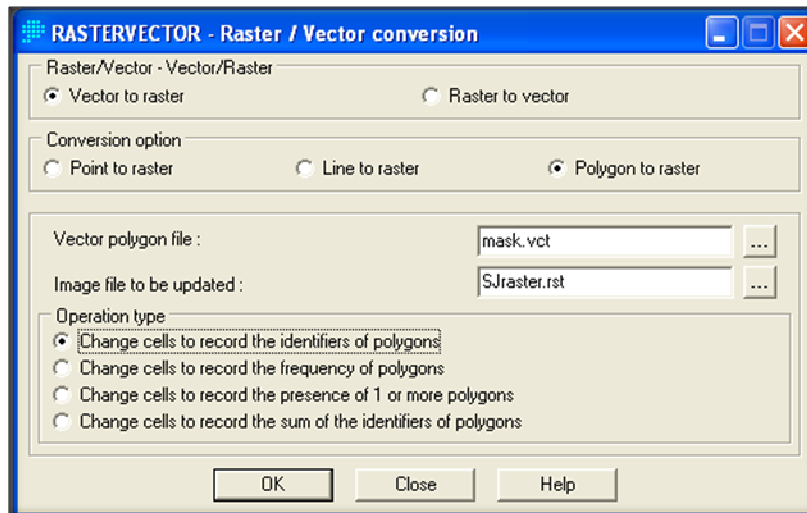


Figura 43: Cuadro de dialogo Raster / Vector Conversión

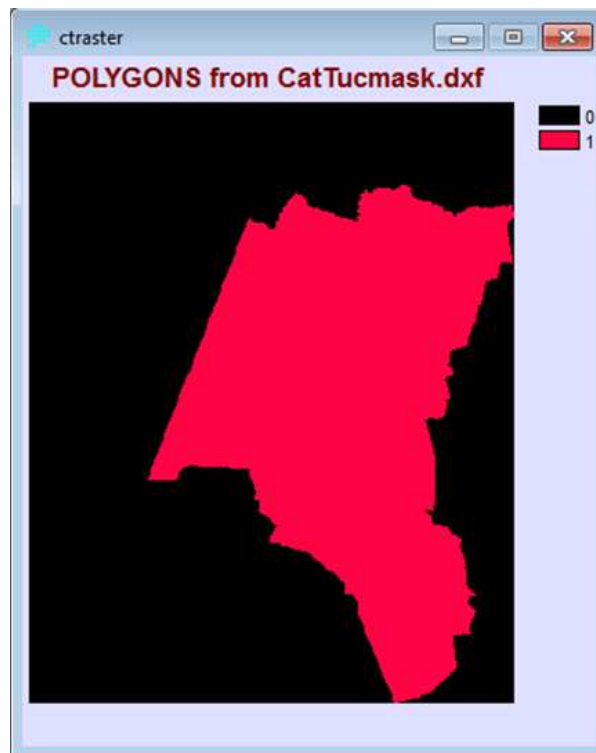


Figura 44: Mascara utilizada para las Provincias de Catamarca y Tucumán

## 6.5. MÉTODO DE INTERPOLACIÓN DE KRIGING.

El submenú Kriging conduce a tres interfaces. En la interface SpatialDependenceModeler (Modelador de Dependencia Espacial), se emplea un amplio rango de herramientas para aprender acerca de los patrones de dependencia espacial en el juego de datos de muestra. En la interfaseModelingFitting (Ajuste de la Modelación), se definen modelos matemáticos para describir las relaciones de covarianza entre los datos de muestra. Por último, en la interfaseKriging and Simulation (Kriging y Simulación) se pueden crear superficies raster completas a partir de datos de muestras y a través de otras interfaces desarrollar modelos. El uso de estas técnicas geoestadísticas es más amplio que el de CERVIO, Marisa Magalí

interpolación, y por lo tanto, también se encuentran disponibles a través del submenú Geoestadística. La geoestadística brinda herramientas para la exploración y caracterización estadística de datos puntuales de muestras. También provee un número de técnicas para la interpolación de superficies a partir de dichos datos. Dentro de estos, el Método de Kriging Ordinario es el más conocido.

Varias técnicas de interpolación fueron introducidas en el apartado Interpolación de Superficies. A diferencia de éstas, las técnicas geoestadísticas permiten incorporar información acerca de los patrones de continuidad espacial en el modelo de interpolación y también producir superficies que incluyen artefactos de variación local. Los métodos permiten un alto grado de flexibilidad en la detección y definición de estructuras que describen la naturaleza de un grupo de datos. Es más, se puede ensamblar un grupo de estructuras, cada una de las cuales describe un aspecto del grupo de datos.

Con esta flexibilidad, sin embargo, también se genera cierto riesgo. Dentro de un mismo grupo de datos es posible producir muchas superficies, todas muy diferentes y a su vez razonablemente representativas de la realidad. El entendimiento y respeto, por las suposiciones subyacentes de estas técnicas, son esenciales si los resultados deben brindar información significativa para cualquier análisis.

La interfase Kriging y Simulación utiliza el modelo desarrollado en las interfaces Modelador de Dependencia Espacial y Ajuste del Modelo para interpolar una superficie. El modelo se emplea para derivar información sobre la continuidad espacial que define cómo se van a ponderar los datos de muestra cuando se combinan para producir los valores para los puntos desconocidos. Los pesos asociados con puntos muestrales se determinan por la dirección y la distancia con respecto a otros puntos conocidos, así como también por el número y carácter de los puntos de datos en una vecindad local definida por el usuario.

Luego se generan archivos raster a partir de la totalidad de los archivos vectorial anteriormente creados aplicando el método de interpolación Kriging. Los pasos a seguir para la obtención de los mapas de valores mínimos, medios y máximos esperados de precipitación para recurrencias de 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años son:

1. Ejecutar el módulo Kriging, en el menú GIS Analysis elegir el submenú SurfaceAnalysis, seleccionar Interpolation, hacer clic sobre Kriging y finalmente en *Kriging and Simulation* como se observa en la Figura 45.
2. En el cuadro de diálogo Kriging and Simulation se completarán las opciones como se muestra en la Figura 46.
3. Al usar una máscara se está delimitando el análisis solo a los píxeles que se encuentran dentro de la provincia (Ver Figura 47).

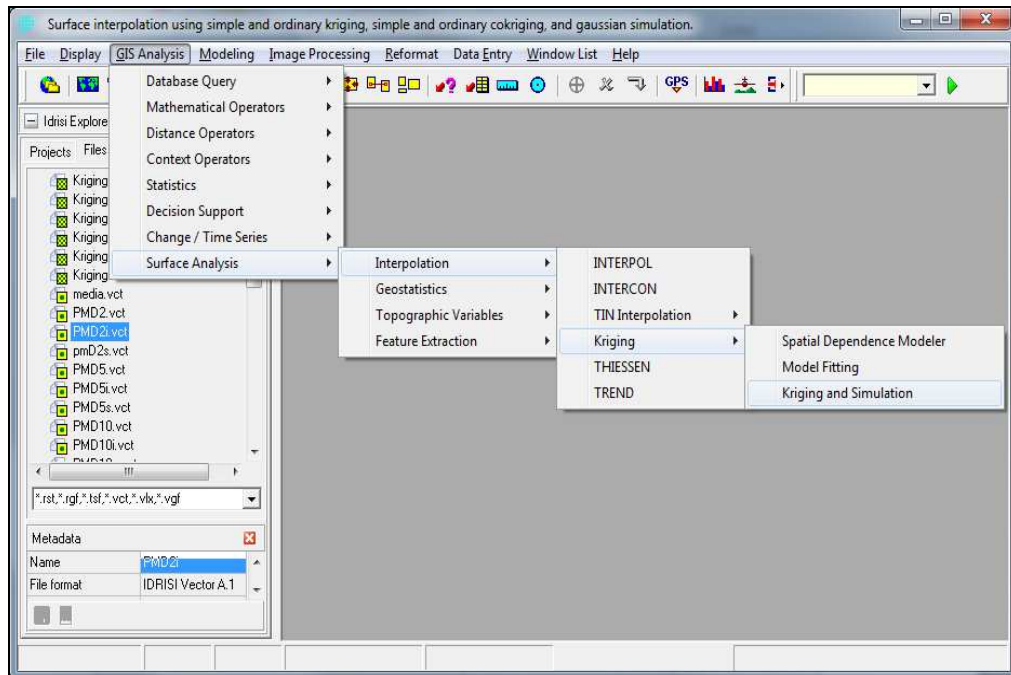


Figura 45: Secuencia para abrir el método de interpolación Kriging and Simulation

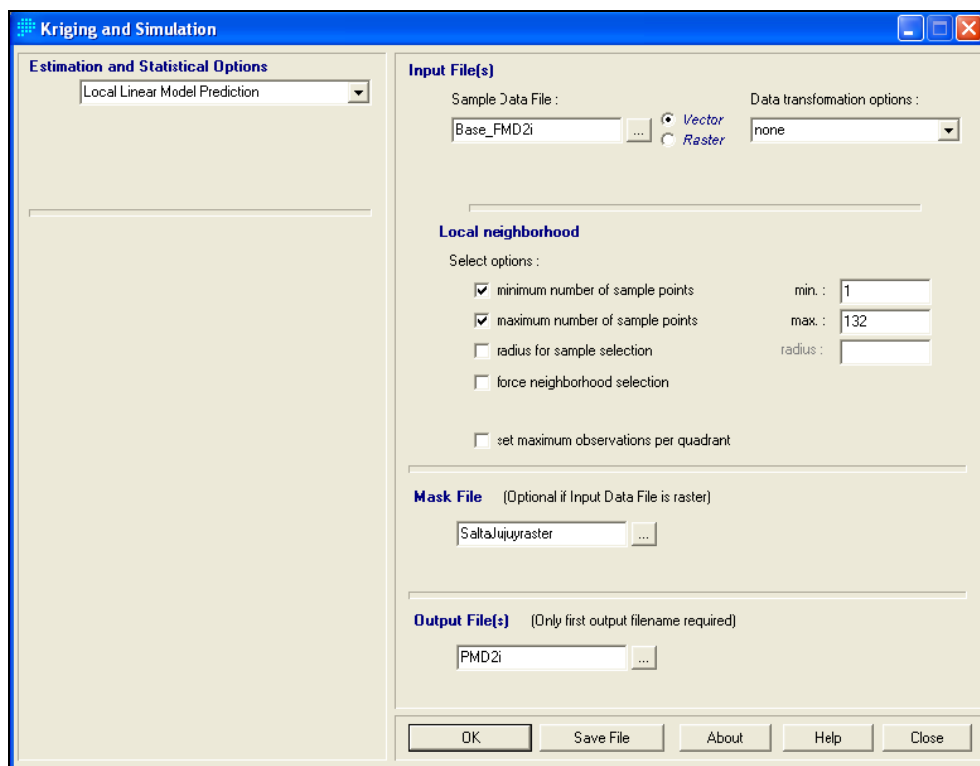


Figura 46: Cuadro de Diálogo Kriging and Simulation

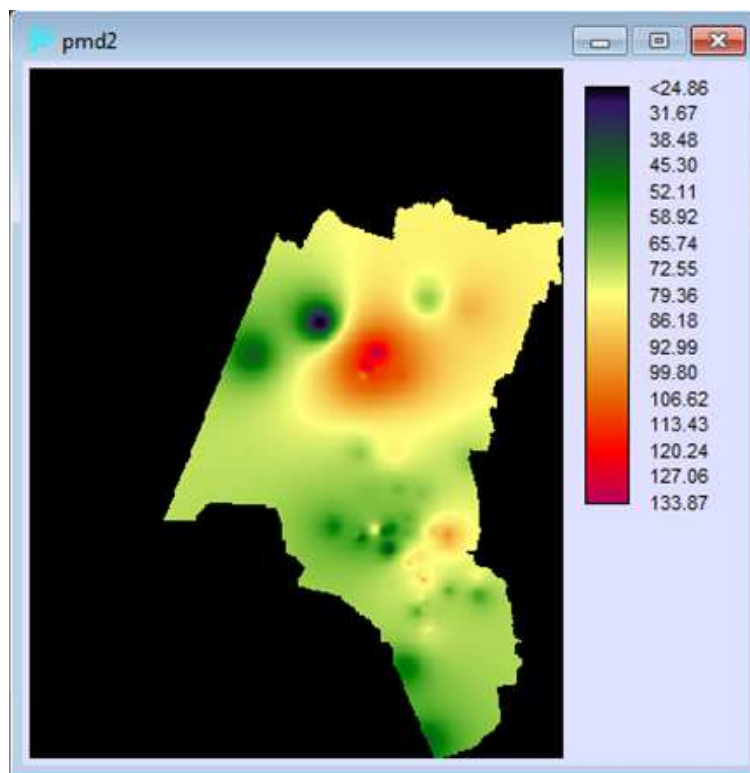


Figura 47: Raster interpolado por el método Kriging para PMD2 (Precipitación media máxima estimada para un período de retorno de dos años)

## 6.6. MÉTODO DE ANÁLISIS TENDENCIAL.

Las superficies tendenciales son usualmente empleadas para determinar las tendencias espaciales existentes en un grupo de datos. Debido a que la superficie resultante es un modelo matemático ideal, es muy suave y está libre de detalles locales.

El método de análisis tendencial "Trend" es un interpolador global ya que calcula una superficie que ofrece el mejor ajuste, principalmente para todo el grupo de puntos de datos conocidos, pero también es un interpolador inexacto. Los valores de los datos en los puntos conocidos se pueden modificar para coincidir con la superficie más adecuada para todo el grupo de datos. Aplica uno de los tres modelos matemáticamente definidos de superficie ideal (lineal, cuadrática o cúbica) al grupo de datos puntuales de entrada.

Para visualizar cómo funciona "Trend", el manual de IDRISI da un ejemplo, el cual adaptaremos a nuestro caso. Se supone datos de precipitación en varias estaciones, el modelo de superficie lineal es chato (plano). Imaginar los datos de precipitación como puntos que flotan por encima de la parte superior de una mesa. La altura de cada punto sobre la mesa depende de su precipitación. Ahora suponer un trozo de papel plano ubicado sobre la mesa.

Sin doblar el papel en absoluto, se ajusta la inclinación y la altura del mismo de manera tal que la suma de las distancias entre éste y cada punto sea minimizada. Algunos puntos se encuentran por encima del plano del papel y algunos por debajo. Es más, es posible

que ningún punto se encuentre en el papel mismo. Sin embargo, la separación general entre el modelo (el plano) y los puntos muestrales es minimizada. A cada píxel en el área de estudio se le puede asignar entonces la precipitación que corresponde con la altura del papel en esa ubicación de píxel.

El mismo ejemplo se puede utilizar para visualizar los modelos de superficie tendencial cuadrática y cúbica. No obstante, en estos casos, está permitido doblar el papel (pero no arrugarlo). La superficie cuadrática permite la presencia de pliegues amplios en el papel, mientras que la cúbica permite pliegues más complejos aún. "Trend" funciona en gran parte como esta analogía exceptuando que una fórmula polinomial que describe el modelo de superficie ideal reemplaza el papel. Esta fórmula se utiliza con el fin de derivar valores para todos los píxeles en la imagen.

### **6.6.1. Creación de Superficies Tendenciales.**

En base a las interpolaciones obtenidas por el método de Kriging de los valores medios de precipitación diaria para distintas recurrencias, se aplicará la función "Trend" para producir una imagen de superficie tendencial. Los pasos a seguir son los siguientes:

1. En el menú GIS Analysis, seleccionar el submenú SurfaceAnalysis, Interpolation y finalmente hacer clic en "Trend" como se observa en la Figura 48: Secuencia para abrir el método de interpolación de Trend.
2. Se abrirá el cuadro de diálogo de la Figura 49. En Input image, se debe ingresar cada uno de los archivos raster, de valores medios para distintas recurrencias, obtenidos por el método Kriging. En "Order of surfaceto be fitted" se especifica los valores 1, 2 y 3, que corresponden a las regresiones lineal, cuadrática y cúbica respectivamente.

Además de la superficie interpolada producida (Ver Figura 50), "Trend" informa (en forma de porcentaje) hasta qué punto el modelo elegido asigna los puntos de entrada. También comunica el cociente-F y los grados de libertad, los cuales pueden ser usados para verificar si la tendencia modelada es significativamente diferente a cero (es decir, ninguna tendencia en absoluto).

3. Función "Overlay". Mediante esta aplicación se busca llevar la imagen tendencial al límite de la región en interés, en nuestro caso la periferia formada por la provincia de Catamarca y Tucumán. Esta función puede aparecer tanto en el menú GIS "Analysis - DatabaseQuery" como en el menú GIS "Analysis - Mathematical Operators". La primera de las formas se muestra en la Figura 51. Y luego los pasos a seguir se muestran en la Figura 52.

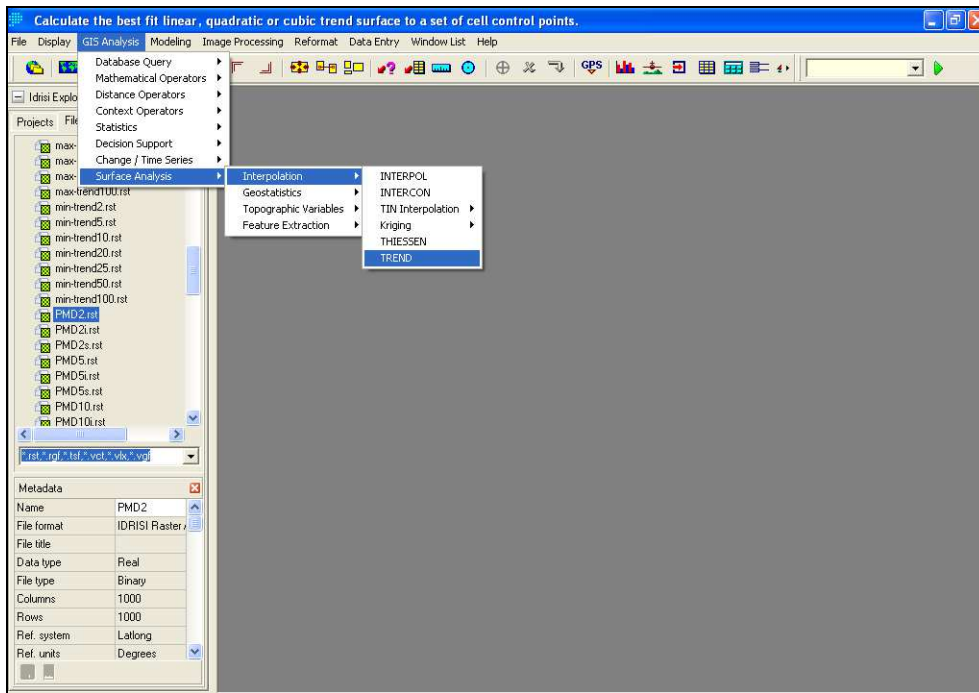


Figura 48: Secuencia para abrir el método de interpolación Trend

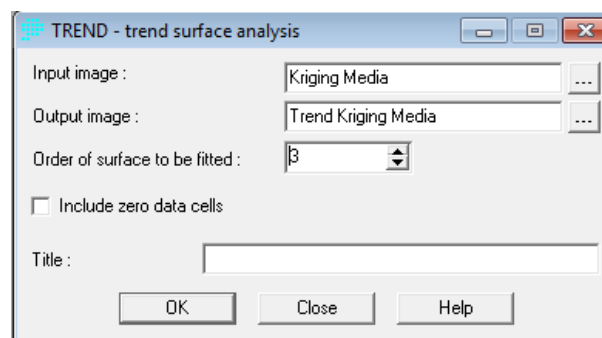


Figura 49: Cuadro de diálogo del método de interpolación Trend

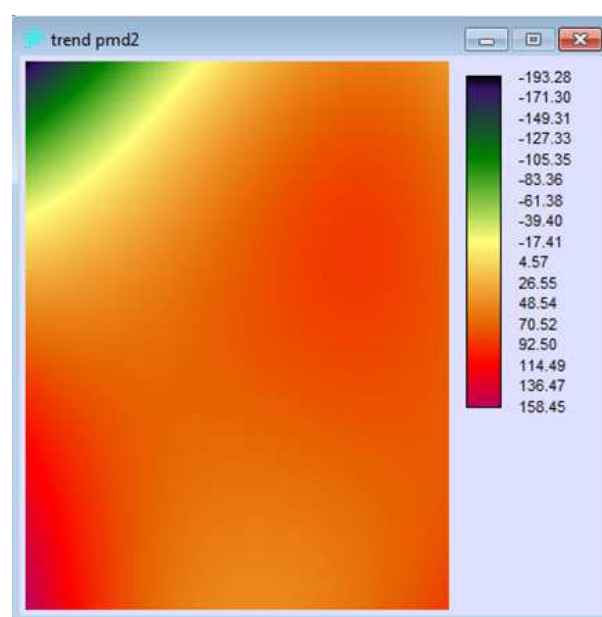


Figura 50: Superficie tendencial. Regresión Lineal. T = 2 Años

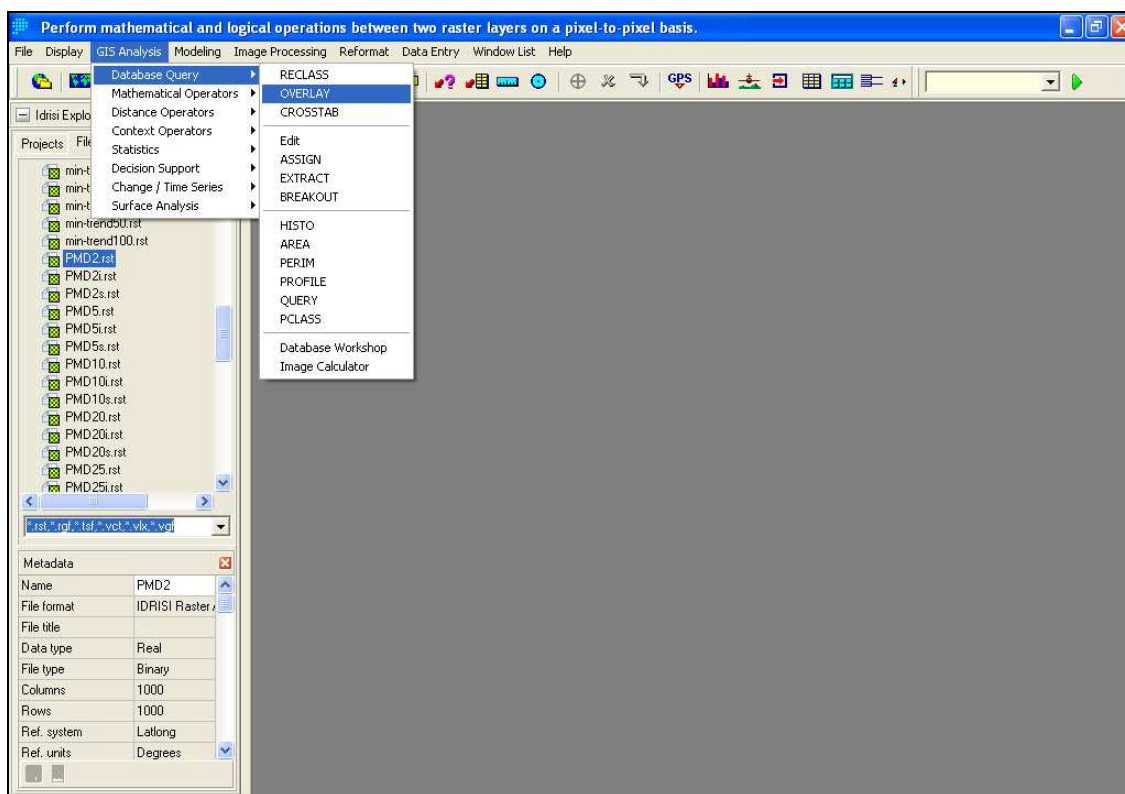


Figura 51: Secuencia para abrir la función "Overlay".

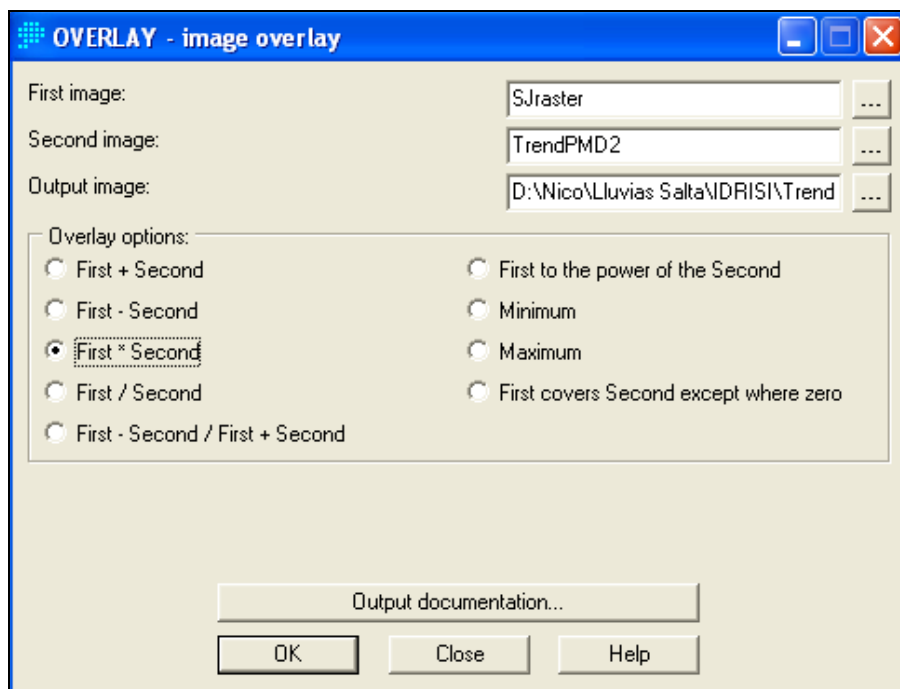


Figura 52: Cuadro de diálogo de la función Overlay

La operación de la Figura 52, se representa mediante el esquema siguiente (Figura 53):



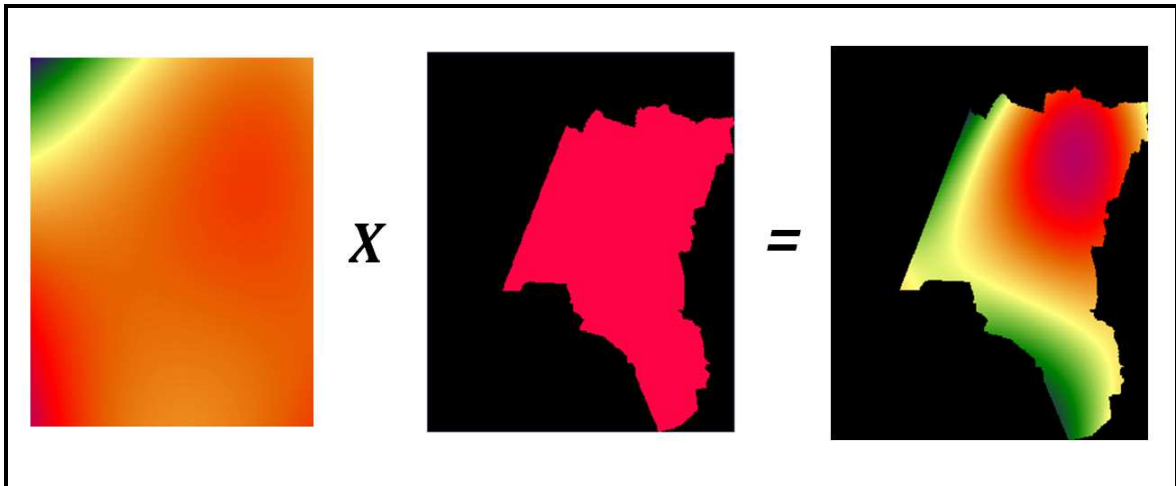


Figura 53: Esquema de la operación OVERLAY (multiplicación).

En la Figura 54 se muestra un ejemplo de las superficies tendenciales para un periodo de retorno de 2 años.

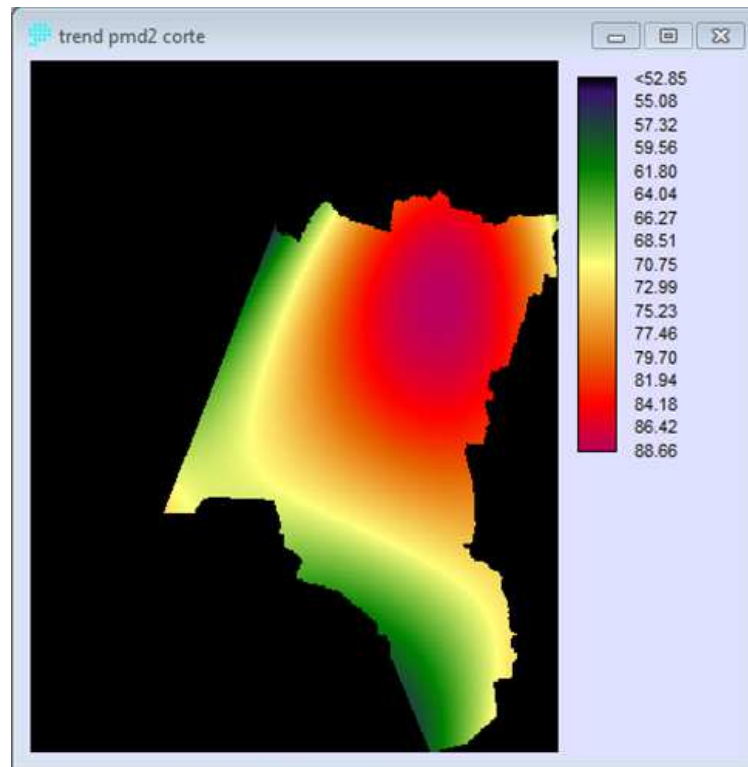


Figura 54: Grilla interpolado por el método Trend. T=2 Años Media de las series históricas de las lluvias máximas diarias anuales

### 6.6.2. Histograma de frecuencias.

Una vez obtenidas las interpolaciones por el método de Kriging para los valores superiores e inferiores de los intervalos de confianza de la lamina de lluvias máximas diarias anuales para distintas recurrencias y las tendencias de los valores medios, se debe verificar que los valores se encuentren comprendidos dentro del intervalo de confianza y si existen

valores localizados fuera de él, el porcentaje sea muy pequeño en el fin de validar el uso del mapa tendencial.

- Valores dentro del intervalo de confianza:

Kriging mínimo - Trend medio  $< 0 \Rightarrow$  Valores mínimos  $<$  Valores medios

Kriging máximo - Trend medio  $> 0 \Rightarrow$  Valores máximos  $>$  Valores medios

Para visualizar esto, se representa en un esquema en la Figura 55, la curva que simboliza al *Trend Medio* queda entre las curvas que simbolizan el *kriging máximo* y *kriging mínimo*.

- Valores fuera del intervalo de confianza:

Kriging mínimo - Trend medio  $> 0 \Rightarrow$  Valores mínimos  $>$  Valores medios

Kriging máximo - Trend medio  $< 0 \Rightarrow$  Valores máximos  $<$  Valores medios

Se muestra también mediante esquemas estas dos opciones, la primera ecuación se representa en la Figura 56y la segunda ecuación en la Figura 57:

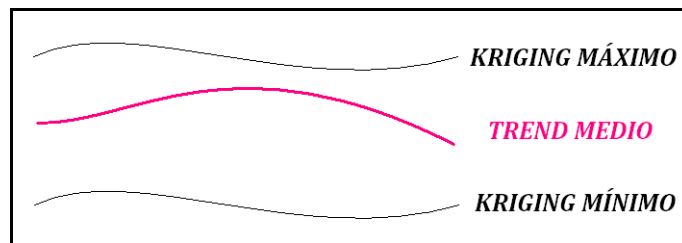


Figura 55: Esquema donde los valores de lluvias diarias máximas medias quedan dentro del intervalo de confianza.

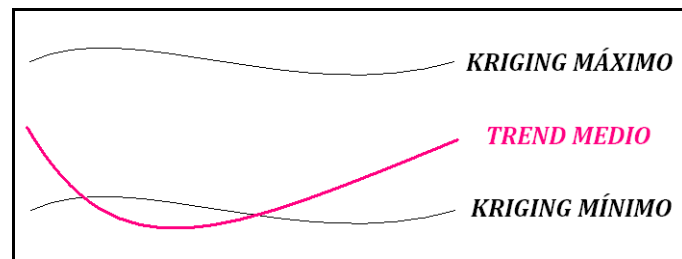


Figura 56: Esquema donde los valores de lluvias diarias máximas medias quedan fuera del intervalo de confianza. (Se presenta subestimación)

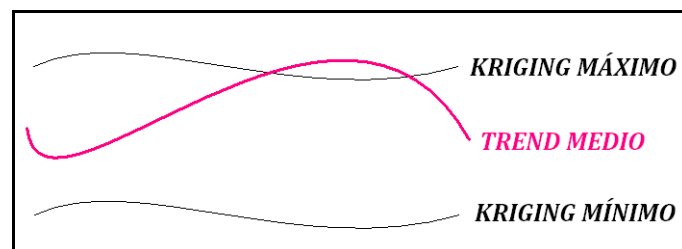


Figura 57: Esquema donde los valores de lluvias diarias máximas medias quedan fuera del intervalo de confianza. (Se presenta sobrestimación)

La diferencia entre las interpolaciones por el método de Kriging para los valores superiores e inferiores de los intervalos de confianza y las tendencias de los valores medios para regresiones lineal, cuadrática y cúbica, se lleva a cabo mediante la función Overlay, en el

menú “GIS Analysis” seleccionando “Mathematical Operators” (Ver Figura 58). Se presenta a modo de ejemplo un archivo raster obtenido (Figura 59).

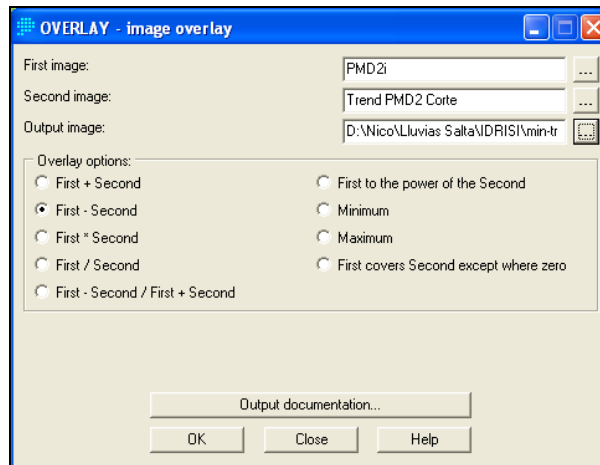


Figura 58: Cuadro de dialogo de la función Overlay

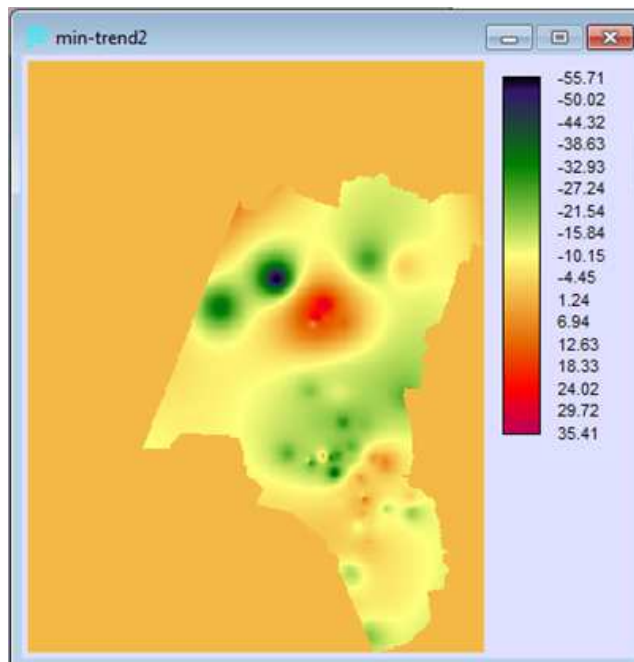


Figura 59: Diferencia entre “Kriging” (valores mínimos) y “Trend” (regresión lineal) [mm]. T = 2 Años

Para poder visualizar la cantidad de valores que se encuentran fuera del intervalo de confianza se recurre a los histogramas de frecuencia. El módulo “Histo” ofrece un histograma de frecuencia de los valores de las celdas dentro de una imagen. Además, calcula la desviación promedio y estándar para toda la imagen y para el rango de datos especificado.

Esta herramienta acepta dos formas de producción: gráfica y numérica. Para el histograma gráfico hay varias opciones, incluyendo gráficos de líneas, barras y áreas, y opciones acumulativas y no acumulativas. La visualización numérica ofrece un resumen de las frecuencias de cada clase junto con frecuencias acumulativas y proporcionales. A partir de

esto, puede determinarse con facilidad la mediana así como también cualquier otro rango porcentual. Para ejecutar la función, desde el menú “GIS Analysis” seleccionar el submenú “Statistics” y elegir la opción “Histo” (Ver Figura 60).

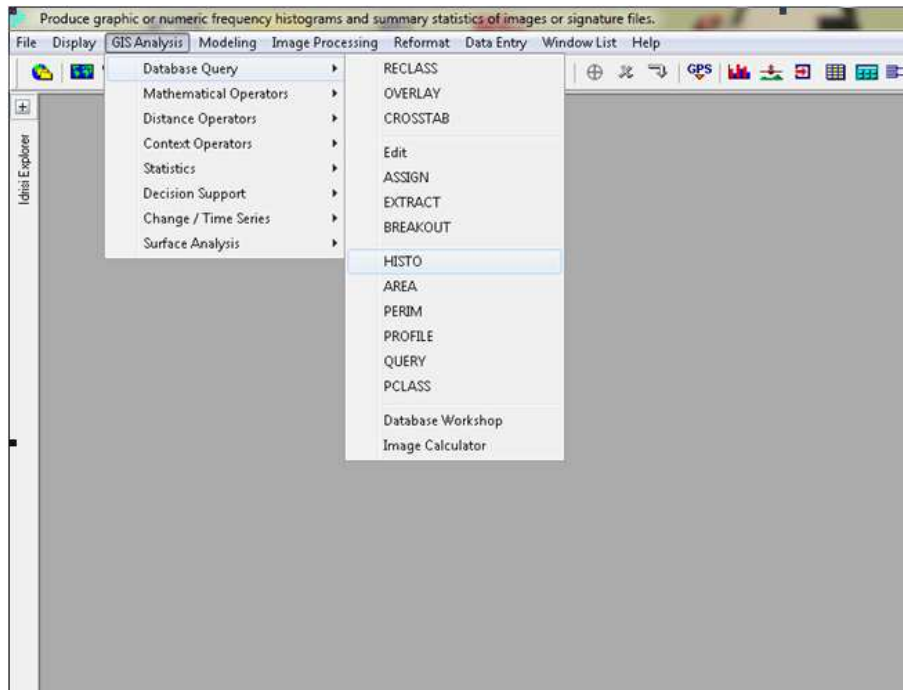


Figura 60: Secuencia para abrir la función Histo.

El cuadro de diálogo de Figura 61 se completa como se muestra. Se realizará un histograma para cada diferencia realizada entre las interpolaciones por el método de Kriging para los valores máximos y mínimos y las tendencias de los valores medios para regresiones lineal, cuadrática y cúbica. El ancho de clase y los valores mínimo y máximo quedan definidos automáticamente al abrir el archivo raster.

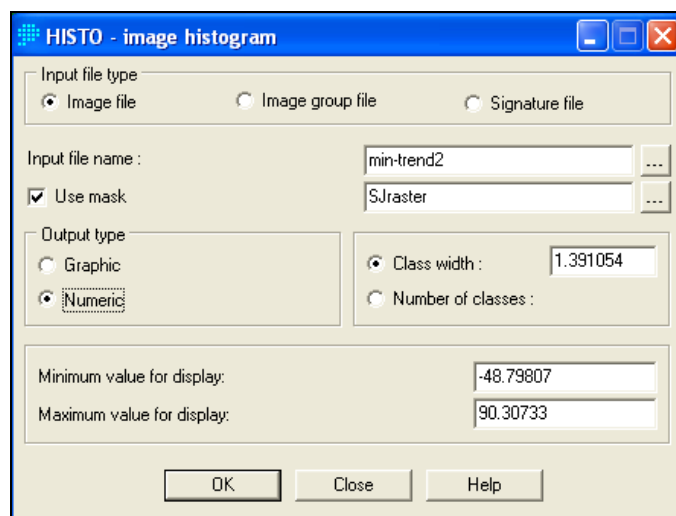


Figura 61: Cuadro de diálogo de la función Histo.

Para cuantificar los valores fuera del intervalo de confianza, es fundamental obtener un histograma numérico, para ello es necesario utilizar una máscara, en nuestro caso 25km<sup>2</sup>, de esta manera solo se obtendrán valores de histograma para la zona de interés obviando lo restante que lleva a un error en los resultados. El archivo de salida (Ver Figura 62) presenta siete columnas, ellas son: Clase, Límite Inferior, Límite Superior, Frecuencia, Proporción, Frecuencia Acumulada y Proporción Acumulada.

Class	Lower Limit	Upper Limit	Frequency	Prop.	Cum. Freq.	Cum. Prop.
0	-48.798	-47.407	57	0.000	57	0.000
1	-47.407	-46.016	61	0.000	118	0.000
2	-46.016	-44.625	67	0.000	185	0.000
3	-44.625	-43.234	78	0.000	263	0.000
4	-43.234	-41.843	86	0.000	349	0.001
5	-41.843	-40.452	144	0.000	493	0.001
6	-40.452	-39.061	249	0.000	742	0.001
7	-39.061	-37.670	337	0.001	1079	0.002
8	-37.670	-36.279	446	0.001	1525	0.002
9	-36.279	-34.888	698	0.001	2223	0.003
10	-34.888	-33.497	955	0.001	3178	0.005
11	-33.496	-32.106	967	0.001	4145	0.006
12	-32.105	-30.714	1424	0.002	5569	0.008
13	-30.714	-29.323	1792	0.003	7361	0.011
14	-29.323	-27.932	2677	0.004	10038	0.015
15	-27.932	-26.541	4158	0.006	14196	0.021
16	-26.541	-25.150	5676	0.009	19872	0.030
17	-25.150	-23.759	6319	0.010	26191	0.039
18	-23.759	-22.368	7793	0.012	33984	0.051
19	-22.368	-20.977	9576	0.014	43560	0.066

Figura 62: Histograma numérico de frecuencias. Producción numérica

El histograma de frecuencias gráfico (Ver Figura 63) obtenido es:

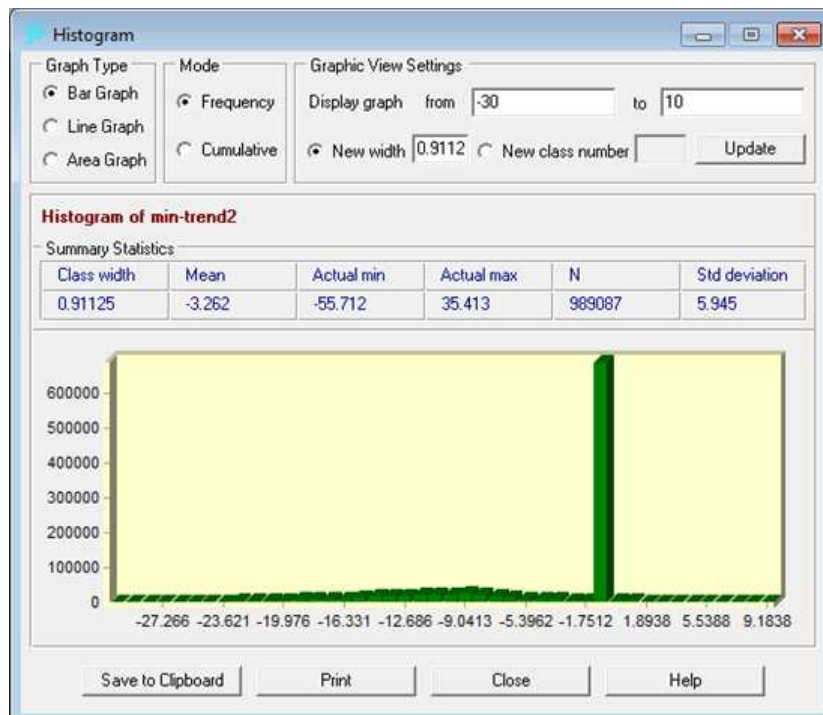


Figura 63: Histograma de frecuencias min-trend para un periodo de retorno de 2 años. Producción gráfica.

Se observa que la mayoría de los valores son negativos, lo que responde a que la mayoría están dentro del intervalo min-trend, tan solo el 1,70% esta fuera del mismo.

También en la Figura 64 observamos el histograma de frecuencias max-trend para un período de retorno de dos años, quedando la mayoría de los valores mayores a cero, indicando que están dentro del intervalo max-trend. El porcentaje fuera de este intervalo es de 2,50%.

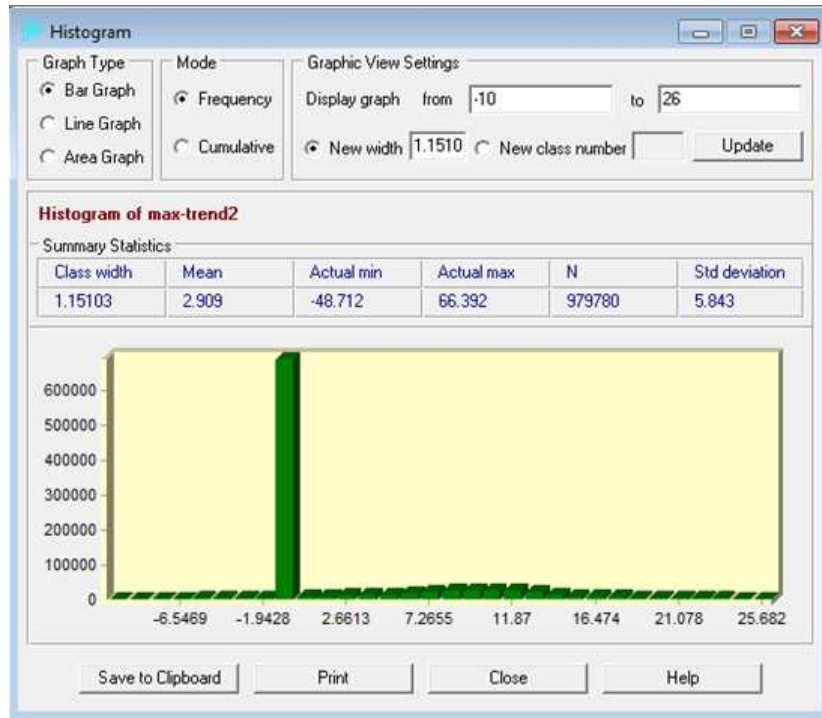


Figura 64: Histograma de frecuencias max-trend para un periodo de retorno de 2 años. Producción gráfica.

En las dos figuras anteriores (63 y 64) se ve con claridad que en 0 aparece la mayor de las columnas, la gran cantidad de valores nulos corresponde a que cuando se realiza la operación de resta entre las dos imágenes (Mínima-Tendencia y Máximo-Tendencia), no solo intervienen las provincias sino también todo el contorno alrededor, es decir, los valores correspondientes a la zona fuera de la mascara de la provincia de Catamarca y Tucumán.

De la Tabla33 a la 39 se muestran los porcentajes de valores fuera del intervalo de confianza para las distintas recurrencias y tipos de regresión de la función "Trend".

	Cúbica
Máximo - Medio	2,50%
Mínimo - Medio	1,70%

Tabla 33: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 2 Años.

	Cúbica
Máximo - Medio	1,60%
Mínimo - Medio	1,20%

Tabla 34: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 5 Años.

	Cúbica
Máximo - Medio	1,40%
Mínimo - Medio	0,70%

Tabla 35: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 10 Años.

	Cúbica
Máximo - Medio	1,10%
Mínimo - Medio	0,40%

Tabla 36: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 20 Años.

	Cúbica
Máximo - Medio	1,10%
Mínimo - Medio	0,30%

Tabla 37: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 25 Años.

	Cúbica
Máximo - Medio	1,00%
Mínimo - Medio	0,20%

Tabla 38: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 50 Años.

	Cúbica
Máximo - Medio	0,80%
Mínimo - Medio	0,10%

Tabla 39: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 100 Años.

A medida que el periodo de retorno aumenta es menor el porcentaje de puntos de la superficie tendencial que quedan fuera del intervalo de confianza, definido por la superficie superior (kriging máximo) e inferior (kriging mínimo). Los porcentajes son bajos (máximo 2,50%), por lo tanto se puede decir que la tendencia adoptada es buena. (Ver Figura 65).

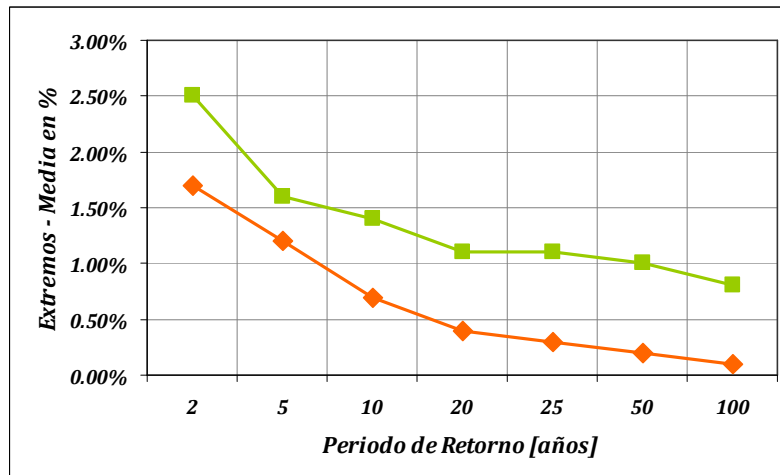


Figura 65: Diferencia porcentual ente valores medios y extremos.

**6.7. MAPAS TENDENCIALES DE LLUVIAS DIARIAS MÁXIMAS ANUALES PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO.**

Por último, como resultado de las operaciones realizadas en las secciones anteriores, se llega al producto final. En las Figuras 66 a 72 se muestran los mapas de lluvia diaria máxima anual asociados a los diferentes períodos de retorno analizados para las provincias de Catamarca y Tucumán.

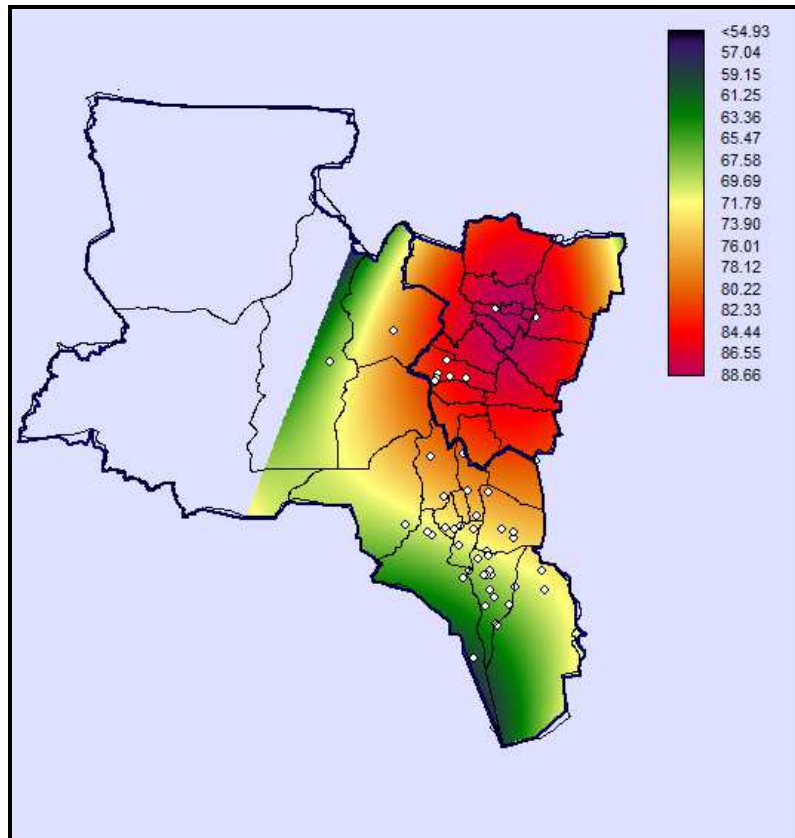


Figura 66: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para las provincias de Catamarca y Tucumán para un Periodo de retorno T= 2 años [mm].



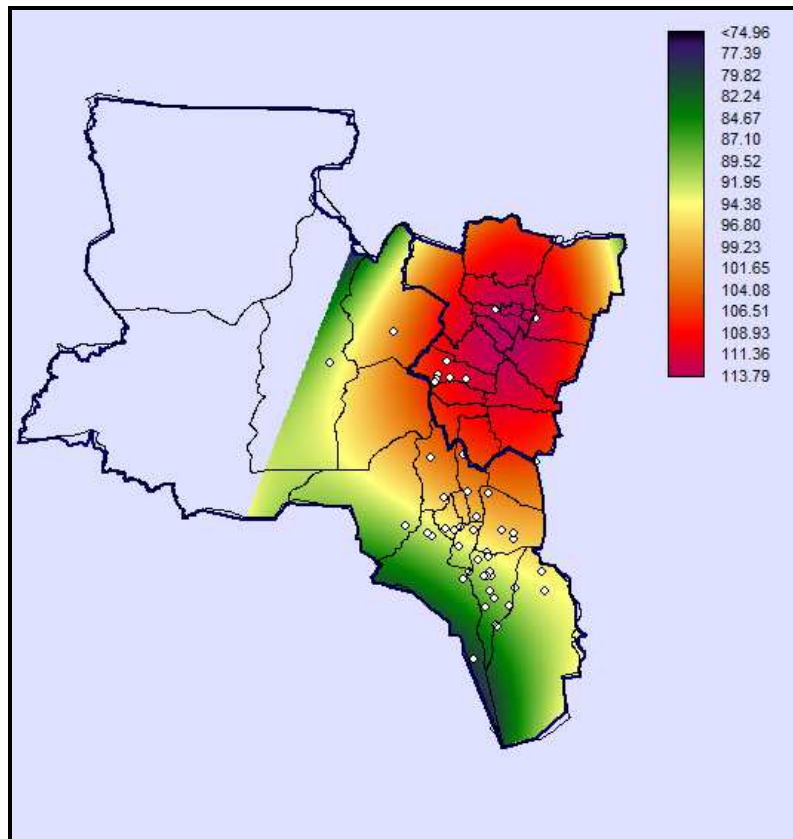


Figura 67: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para las provincias de Catamarca y Tucumán para un Periodo de retorno  $T= 5$  años [mm]

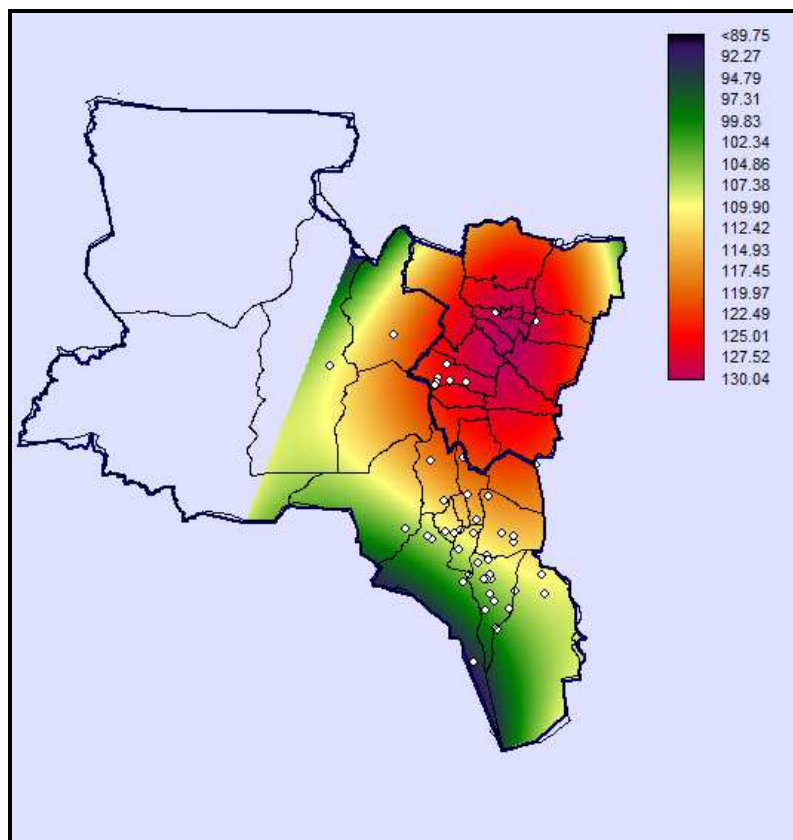


Figura 68: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para las provincias de Catamarca y Tucumán para un Periodo de retorno  $T= 10$  años [mm].

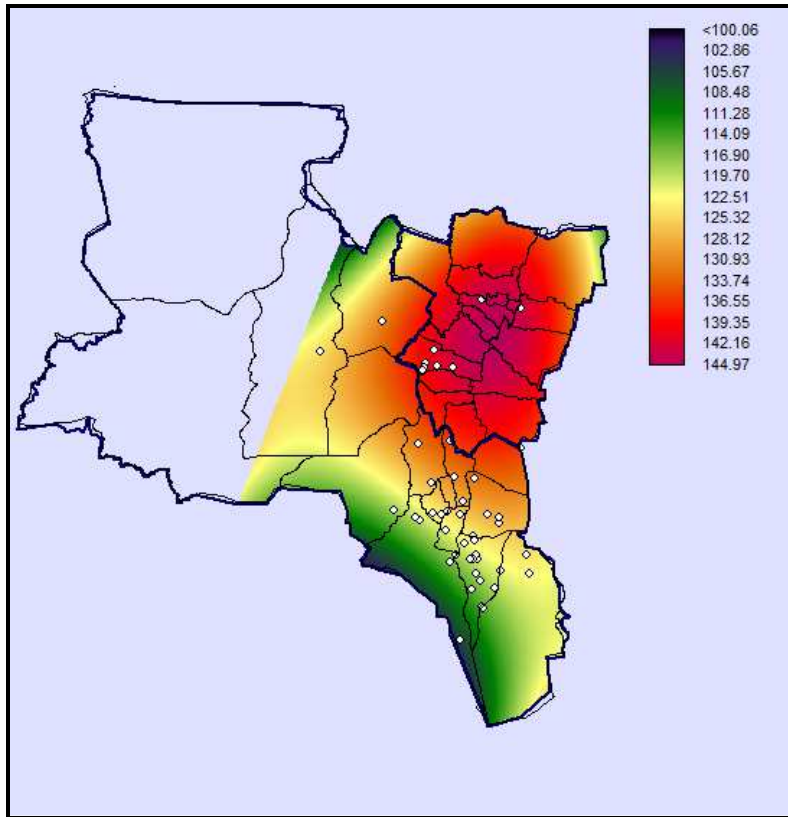


Figura 69: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para las provincias de Catamarca y Tucumán para un Periodo de retorno  $T= 20$  años [mm].

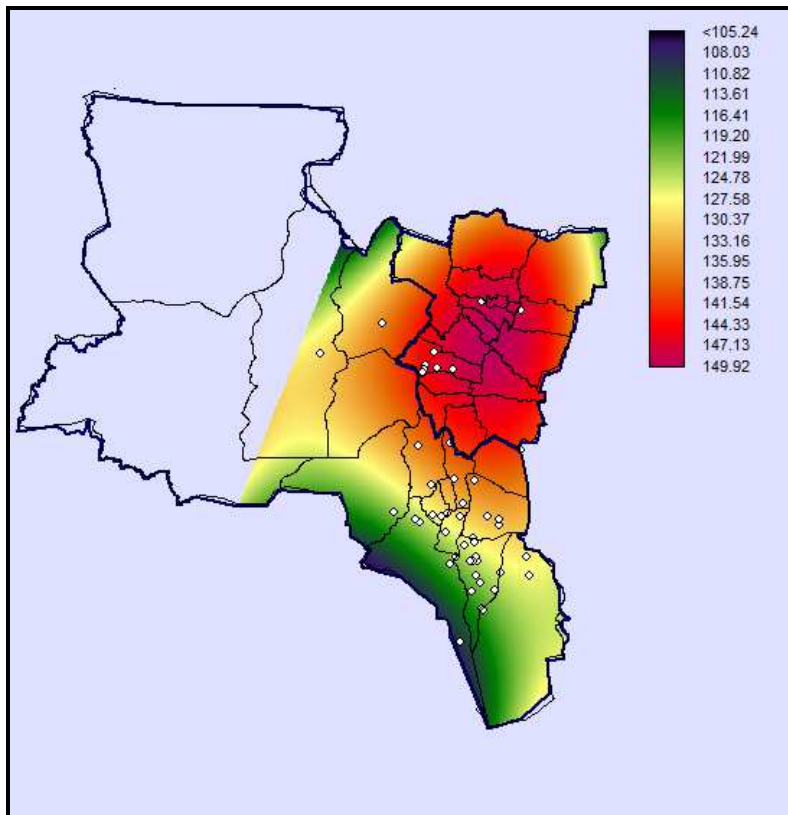


Figura 70: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para las provincias de Catamarca y Tucumán para un Periodo de retorno  $T= 25$  años [mm].

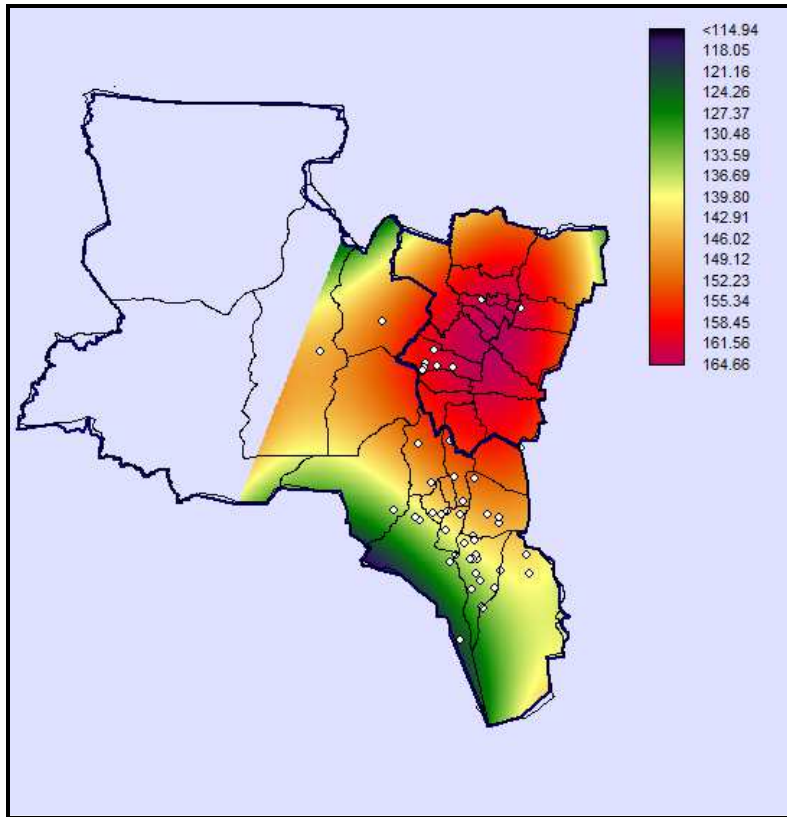


Figura 71: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para las provincias de Catamarca y Tucumán para un Periodo de retorno  $T= 50$  años [mm].

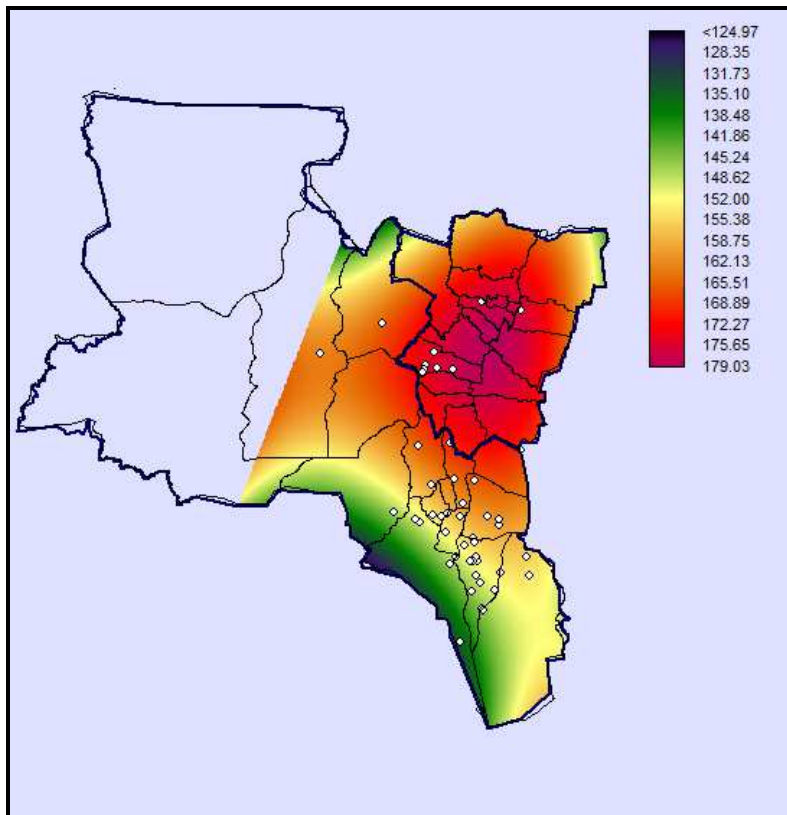


Figura 72: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para las provincias de Catamarca y Tucumán para un Periodo de retorno  $T= 100$  años [mm].



# *Capítulo 7*

## ***ACOPLAMIENTO DE LÁMINAS DE LLUVIA MÁXIMA DIARIA PARA LOS DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO DE PROVINCIAS VECINAS Y ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS BORDES***



## 7. ACOPLAMIENTO DE LÁMINAS DE LLUVIA MÁXIMA DIARIA PARA LOS DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO DE PROVINCIAS VECINAS Y ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS BORDES

### 7.1. INTRODUCCIÓN.

En este estudio se busca regionalizar las lluvias diarias máximas de las provincias de Catamarca y Tucumán, por lo que se quiere demostrar la importancia de considerar las condiciones de borde, es decir, ver cuánto influyen los datos de las provincias limítrofes sobre la región de estudio. En otras palabras, cuantificar las variaciones para ver las magnitudes de los cambios.

Al momento de realizar este trabajo se contaba con información de la lámina de lluvia máxima diaria para diferentes periodos de retorno de las provincias de Salta, Jujuy y Santiago del Estero (Ver Figura 73).



Figura 73: Mapa político de la Republica Argentina.

## 7.2. INFORMACIÓN DE PROVINCIAS VECINAS UTILIZADA EN EL ANALISIS

En esta sección se expone cuál fue la información incorporada al estudio, que corresponde a las provincias de Salta, Jujuy y Santiago del Estero.

### 7.2.1. Información de Salta y Jujuy

La Provincia de Salta junto con Jujuy fue analizada previamente por Matías Javier Lencinas (2014) en su trabajo: "Validación de la tormenta de diseño para la Presa Los Molinos - Jujuy - utilizando técnicas de regionalización", con un análisis análogo al hecho en este estudio. Para Salta y Jujuy se contaba inicialmente con 102 estaciones, pero debido al criterio de longitud de la serie (que debe ser mayor que 14 años), quedaron un total de 67

, y finalmente las que verificaron las distintas pruebas estadísticas (presencia de datos atípicos, independencia, estacionaridad y homogeneidad) fueron 60. La localización de las estaciones finales tomadas para el análisis se observa en la Figura 74.

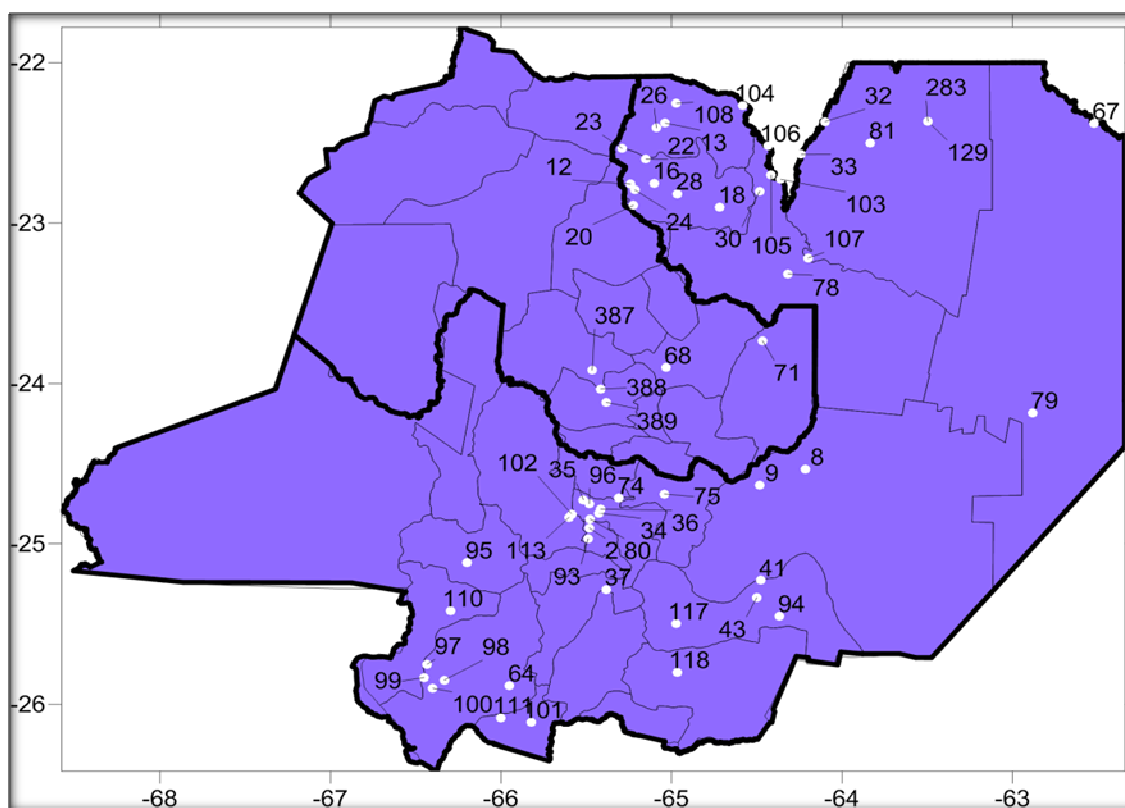


Figura 74: Disposición de las estaciones en las provincias de Salta y Jujuy.

### 7.2.2. Información de Santiago del Estero

La provincia de Santiago del Estero fue analizada por Yael Audagna (2014) de forma análoga, en su trabajo "Regionalización de lluvias máximas diarias en la provincia de Santiago del Estero". En este estudio, en un principio se partió de 91 estaciones; y 78 verificaron las distintas pruebas estadísticas. La Figura 75 muestra la localización de las estaciones.



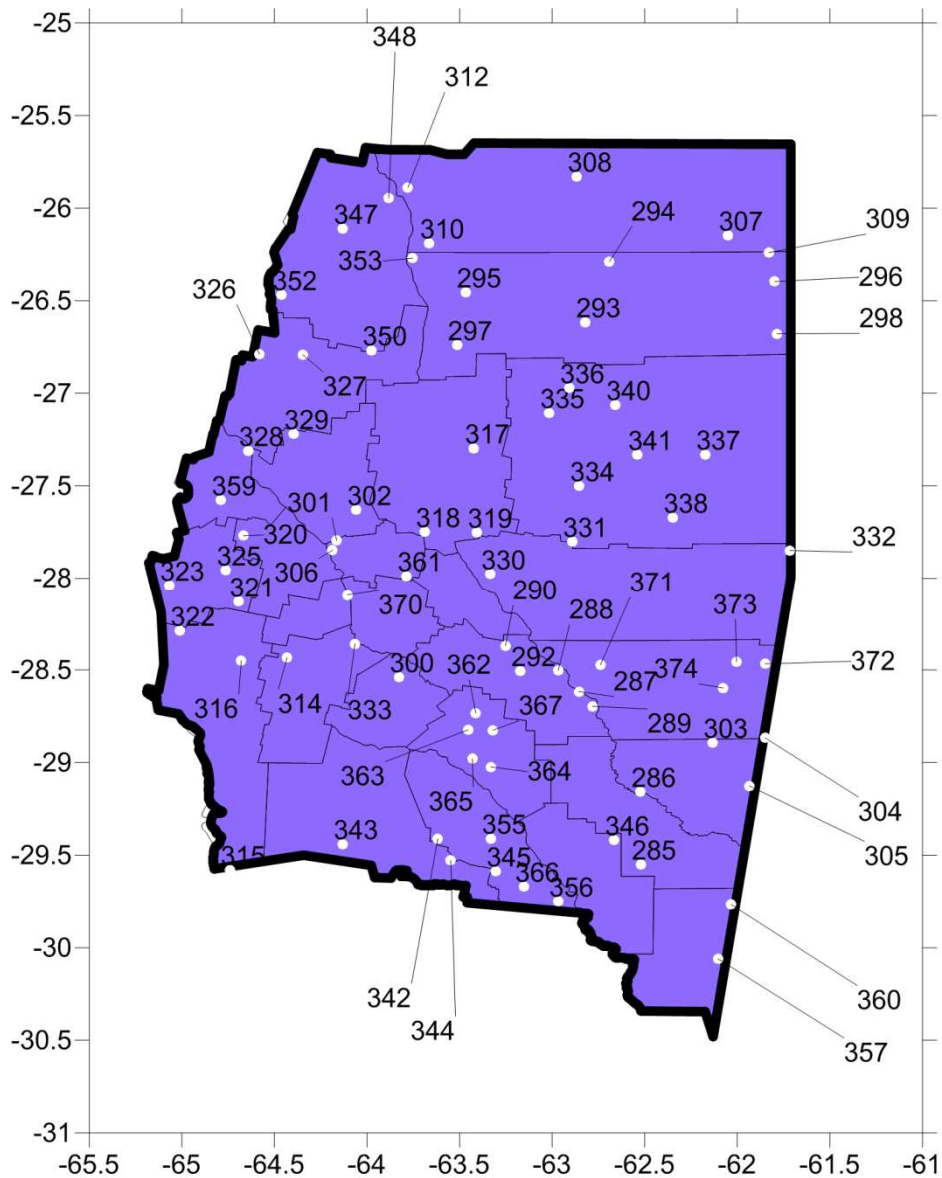


Figura 75: Disposición de las estaciones en la provincia de Santiago del Estero.

### 7.3. CONFECCIÓN DE LOS MAPAS DIGITALES PARA EL ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL BORDE

Lo que aquí se busca, es cuantificar la influencia del borde y como este varía al incluir, o no, las provincias limítrofes a la zona de estudio en el análisis de regionalización de las láminas de lluvia máximas diarias.

Esto se va a comparar mediante un cociente entre:

- Las lluvias máximas diarias para distintos periodos de retorno de las provincias de Catamarca y Tucumán, analizadas en este estudio (CT) y,
- Las lluvias máximas diarias de las provincias de Catamarca y Tucumán, analizadas con la influencia de las provincias vecinas (CTS).

El cociente que utilizamos para analizar la influencia del borde fue:

$$\frac{CT}{CTSJ}$$

Al realizar este análisis, 3 casos podían suceder en la zona de estudio:

- $CT/CTSJ > 1$ , las lluvias máximas diarias en las provincias de Catamarca y Tucumán disminuyen al considerar la condición de borde.
- $CT/CTSJ = 1$ , no hay variación al aplicar la influencia de las provincias vecinas, ya que las lluvias máximas diarias son iguales.
- $CT/CTSJ < 1$ , representa que las lluvias máximas diarias aumentan al considerar las provincias limítrofes.

Para poder desarrollar lo anterior se hace necesario confeccionar los mapas acoplando las provincias limítrofes con los datos de las provincias de Catamarca y Tucumán .

En esta etapa se realizaron dos nuevas series de mapas digitales análogos a los desarrollados en el capítulo VI. Primero se confeccionaron los mapas digitales para los distintos períodos de retorno incluyendo, además de Catamarca y Tucumán, la información de Salta y Jujuy (Figuras 76 a 82). Estos mapas se hicieron para estudiar la influencia sobre el borde norte de Catamarca y Tucumán.

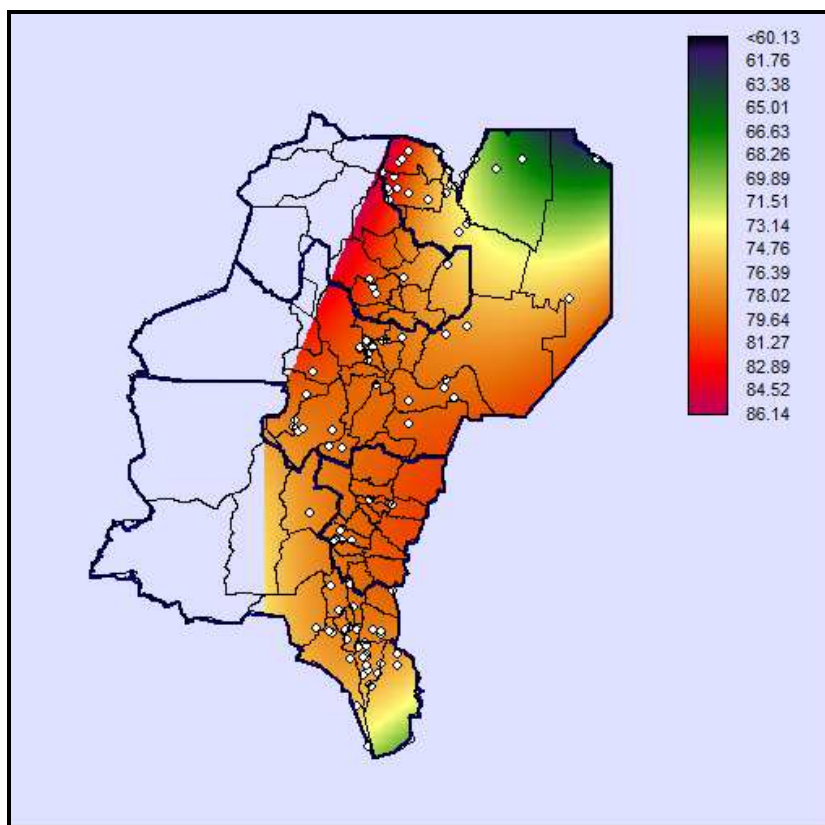


Figura 76: Mapa de lluvias diarias máximas anuales en las provincias de Catamarca, Tucumán, Salta y Jujuy, para un Periodo de retorno T= 2 años [en mm].

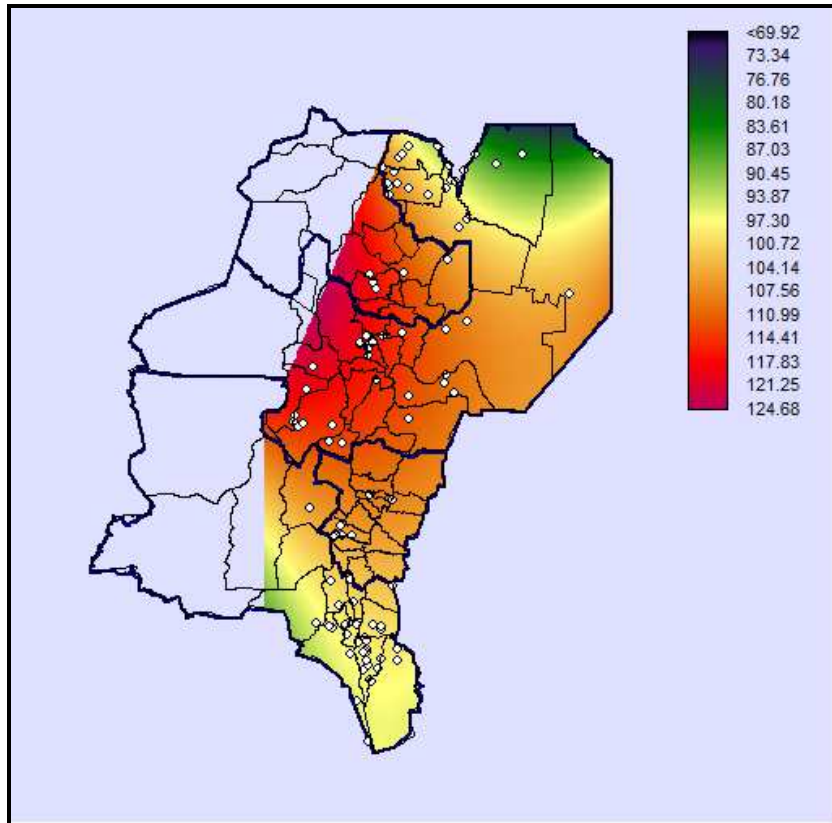


Figura 77: Mapa de lluvias diarias máximas anuales en las provincias de Catamarca, Tucumán, Salta y Jujuy, para un Periodo de retorno  $T= 5$  años [en mm].

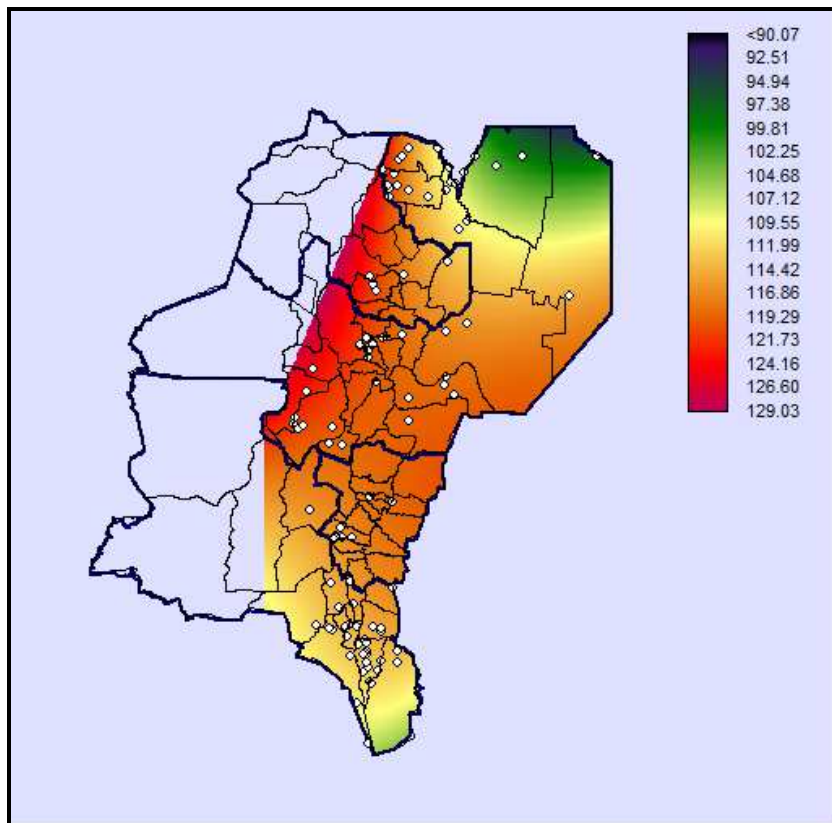


Figura 78: Mapa de lluvias diarias máximas anuales en las provincias de Catamarca, Tucumán, Salta y Jujuy, para un Periodo de retorno  $T= 10$  años [en mm].

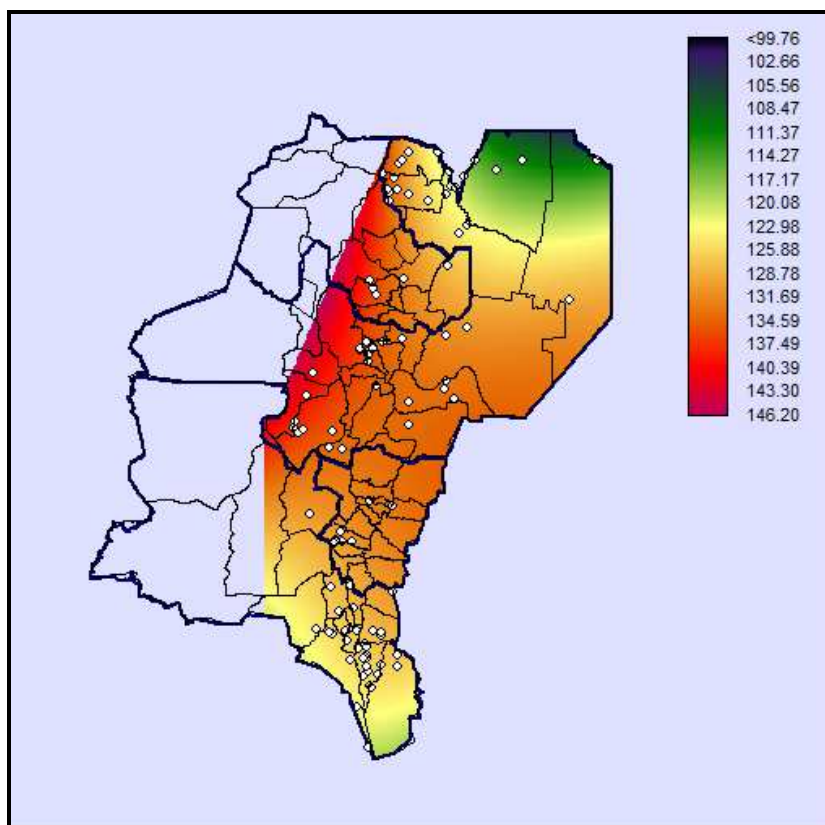


Figura 79: Mapa de lluvias diarias máximas anuales en las provincias de Catamarca, Tucumán, Salta y Jujuy, para un Periodo de retorno  $T= 20$  años [en mm].

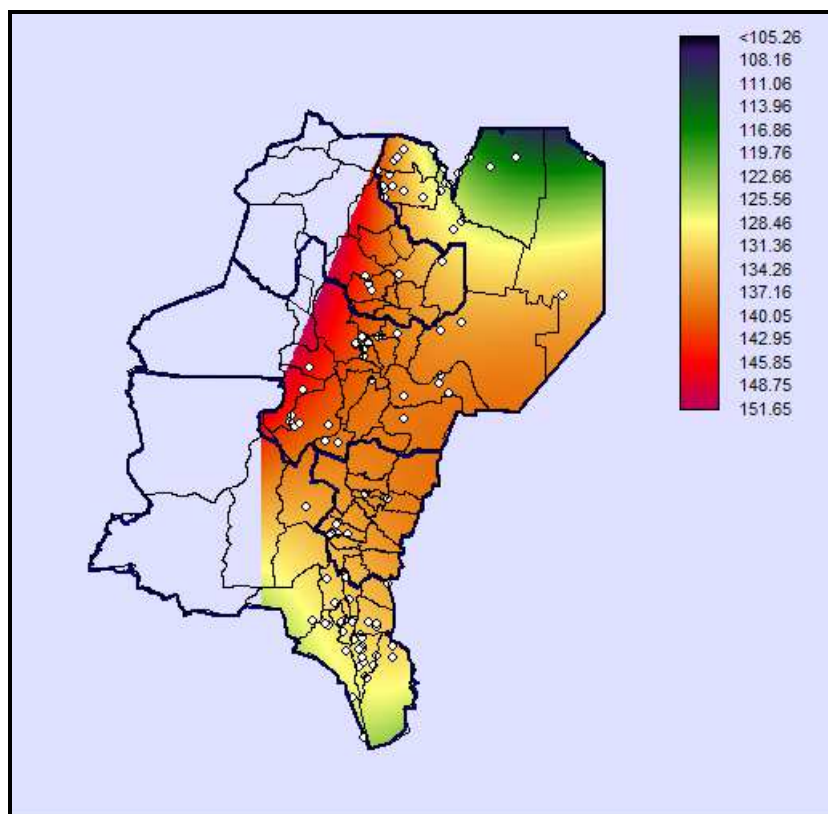


Figura 80: Mapa de lluvias diarias máximas anuales en las provincias de Catamarca, Tucumán, Salta y Jujuy, para un Periodo de retorno  $T= 25$  años [en mm].



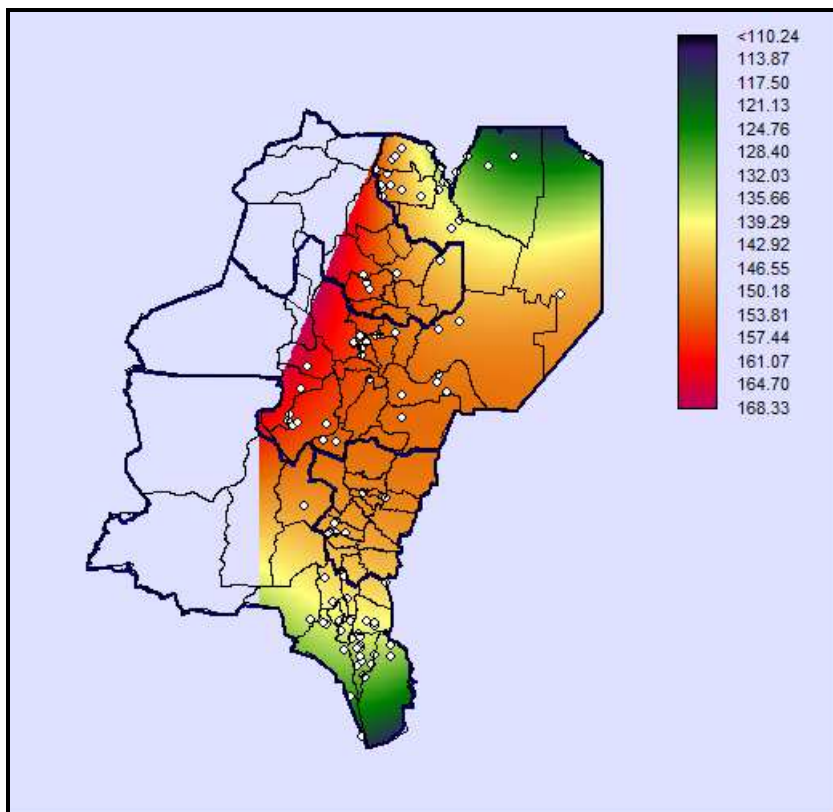


Figura 81: Mapa de lluvias diarias máximas anuales en las provincias de Catamarca, Tucumán, Salta y Jujuy, para un Periodo de retorno  $T= 50$  años [en mm].

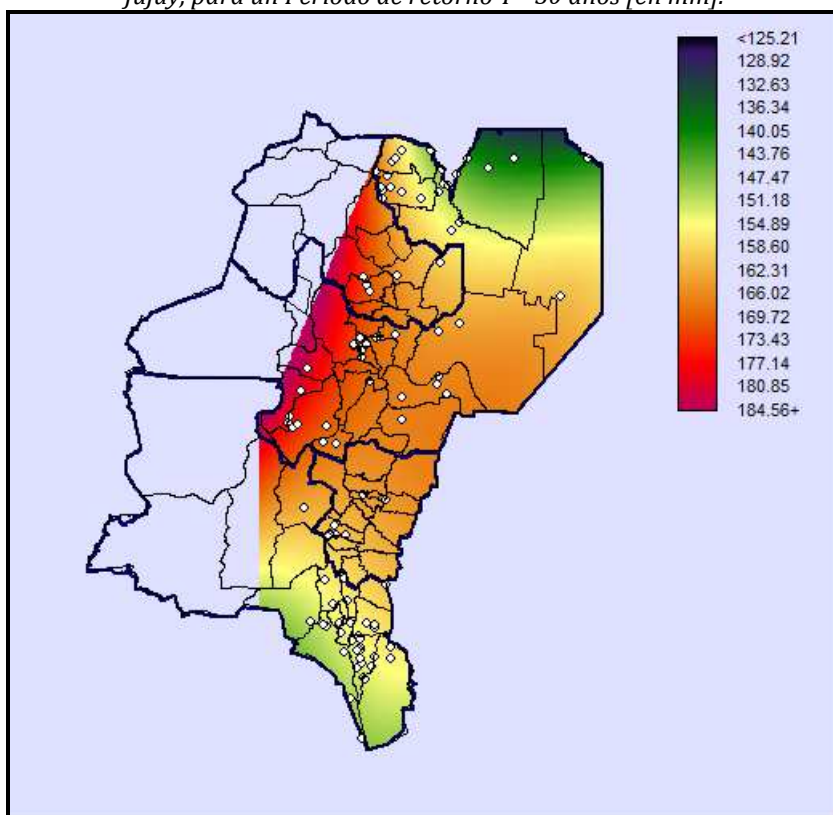


Figura 82: Mapa de lluvias máximas anuales en las provincias de Catamarca, Tucumán, Salta y Jujuy, para un Periodo de retorno  $T= 100$  años [en mm].

Además, se construyeron los mapas digitales para los distintos períodos de retorno, acoplando en el análisis a Santiago del Estero (Figuras 83 a 89). Estos mapas se hicieron para estudiar la influencia sobre el borde Este de Catamarca y Tucumán.

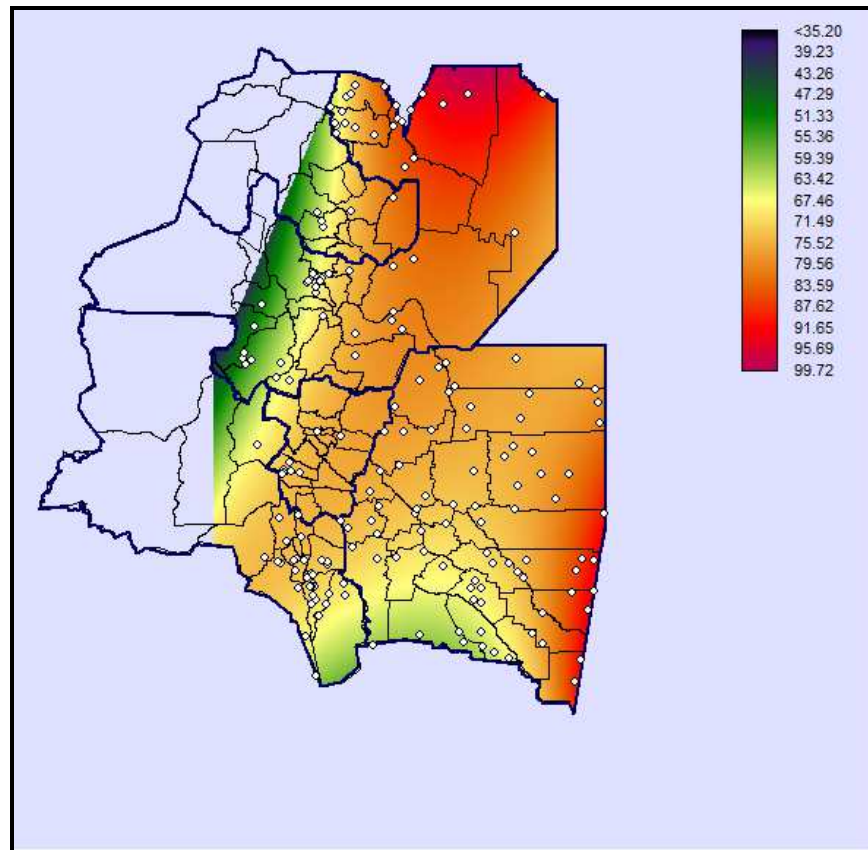


Figura 83: Mapa de lluvias máximas anuales en las provincias de Catamarca, Tucumán, Salta, Jujuy y Santiago del Estero para un Periodo de retorno  $T= 2$  años [en mm].

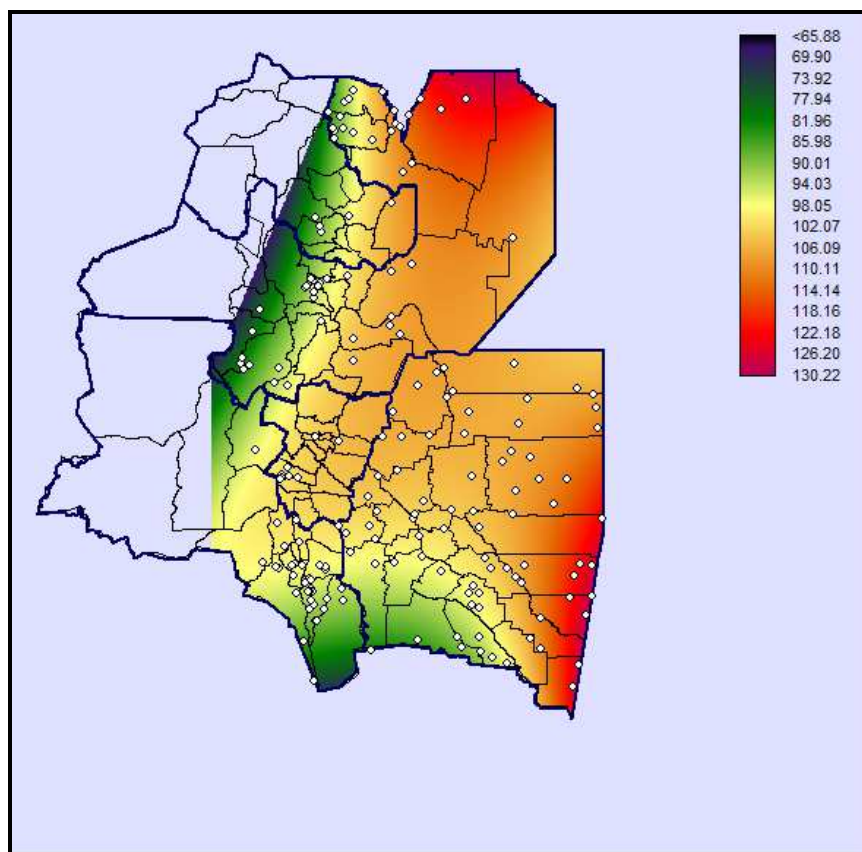


Figura 84: Mapa de lluvias máximas anuales en las provincias de Catamarca, Tucumán, Salta, Jujuy y Santiago del Estero para un Periodo de retorno  $T=5$  años [en mm].

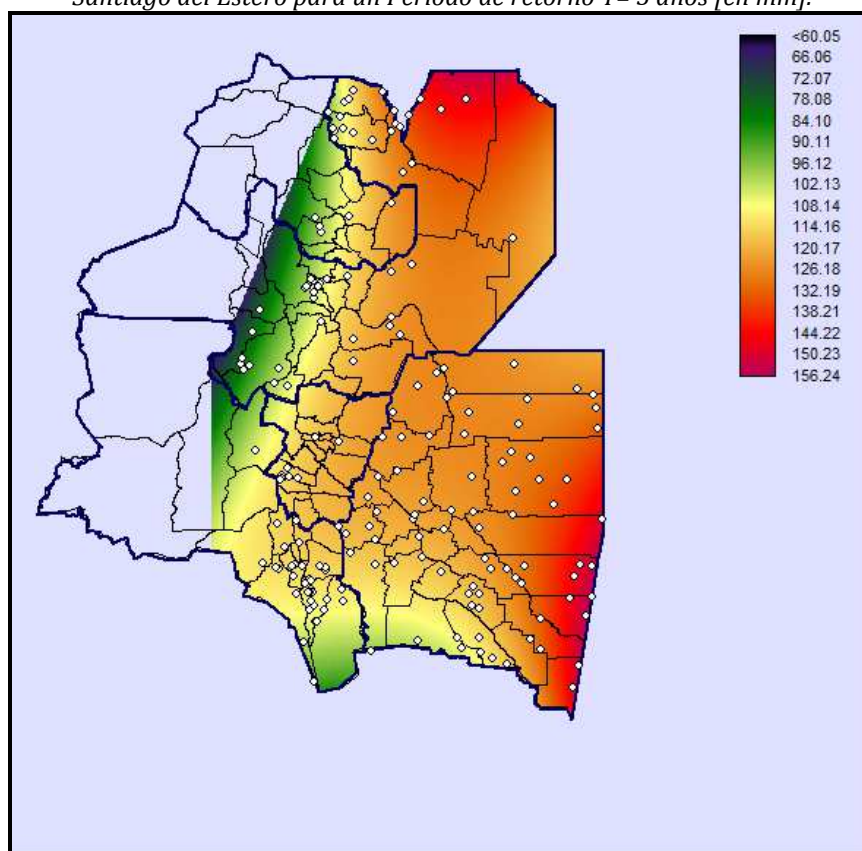


Figura 85: Mapa de lluvias máximas anuales en las provincias de Catamarca, Tucumán, Salta, Jujuy y Santiago del Estero para un Periodo de retorno  $T=10$  años [en mm].

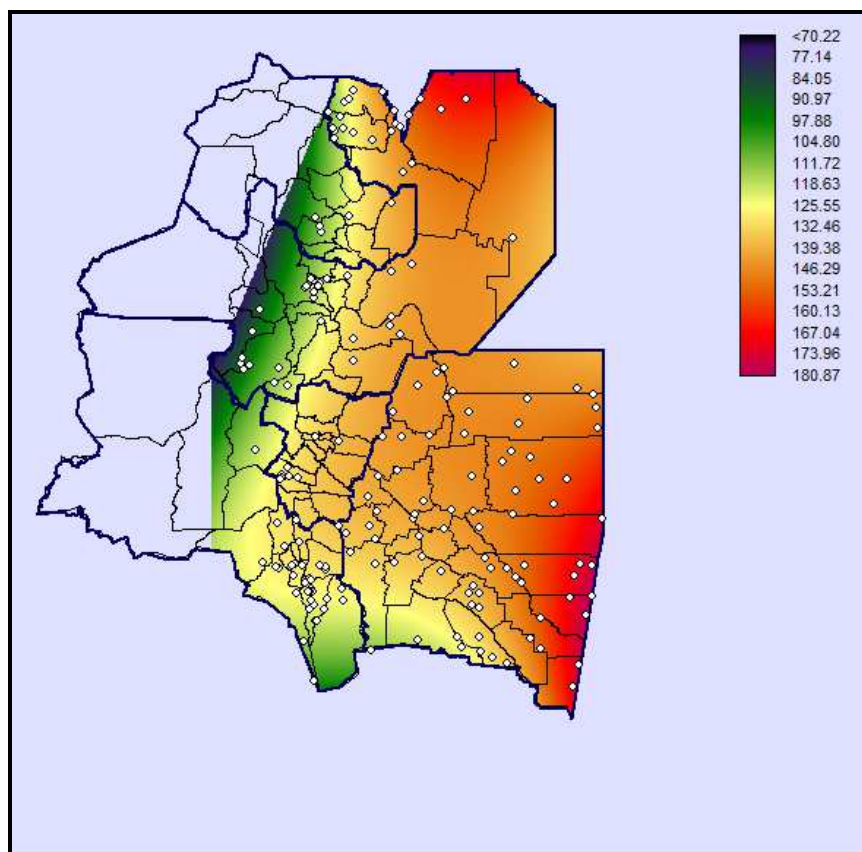


Figura 86: Mapa de lluvias máximas anuales en las provincias de Catamarca, Tucumán, Salta, Jujuy y Santiago del Estero para un Periodo de retorno  $T=20$  años [en mm].

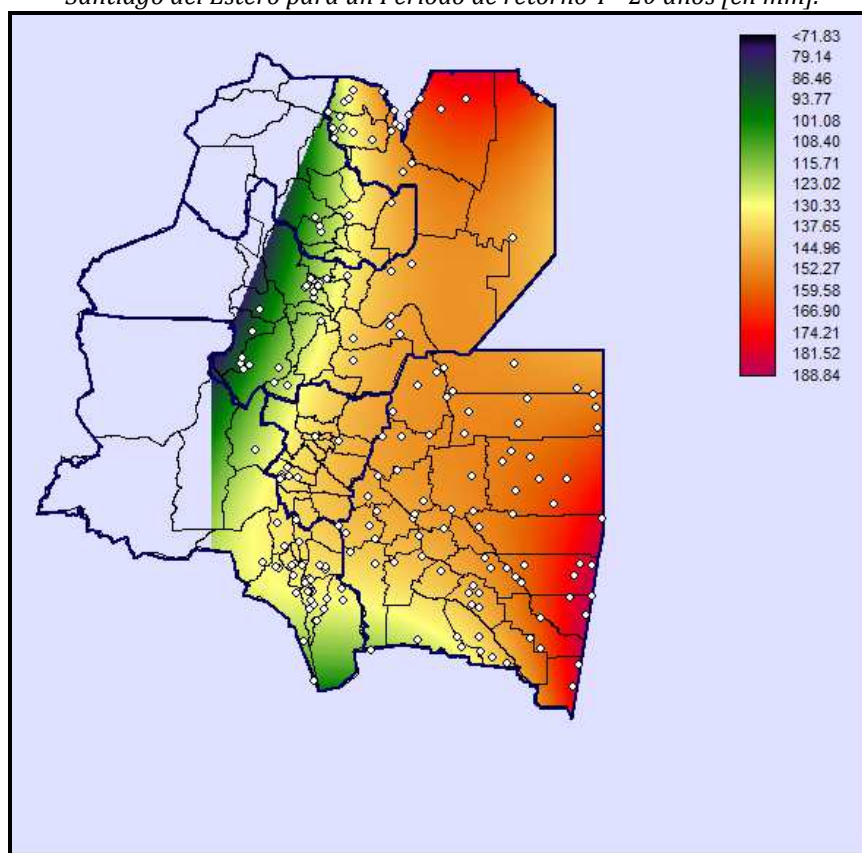


Figura 87: Mapa de lluvias máximas anuales en las provincias de Catamarca, Tucumán, Salta, Jujuy y Santiago del Estero para un Periodo de retorno  $T=25$  años [en mm].



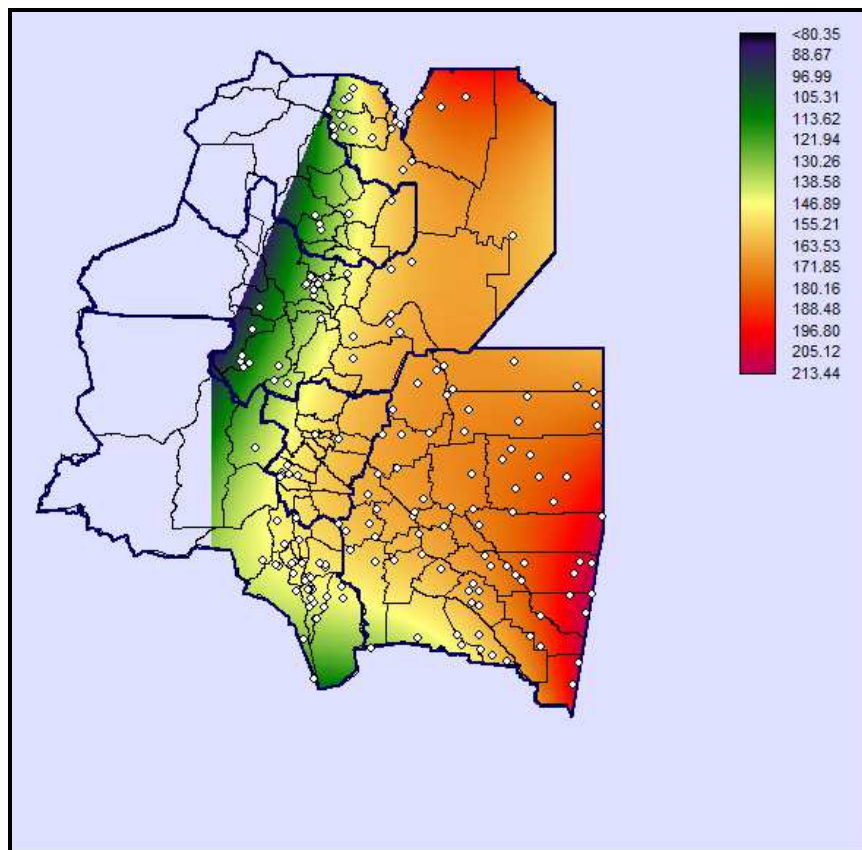


Figura 88: Mapa de lluvias máximas anuales en las provincias de Catamarca, Tucumán, Salta, Jujuy y Santiago del Estero para un Periodo de retorno  $T= 50$  años [en mm].

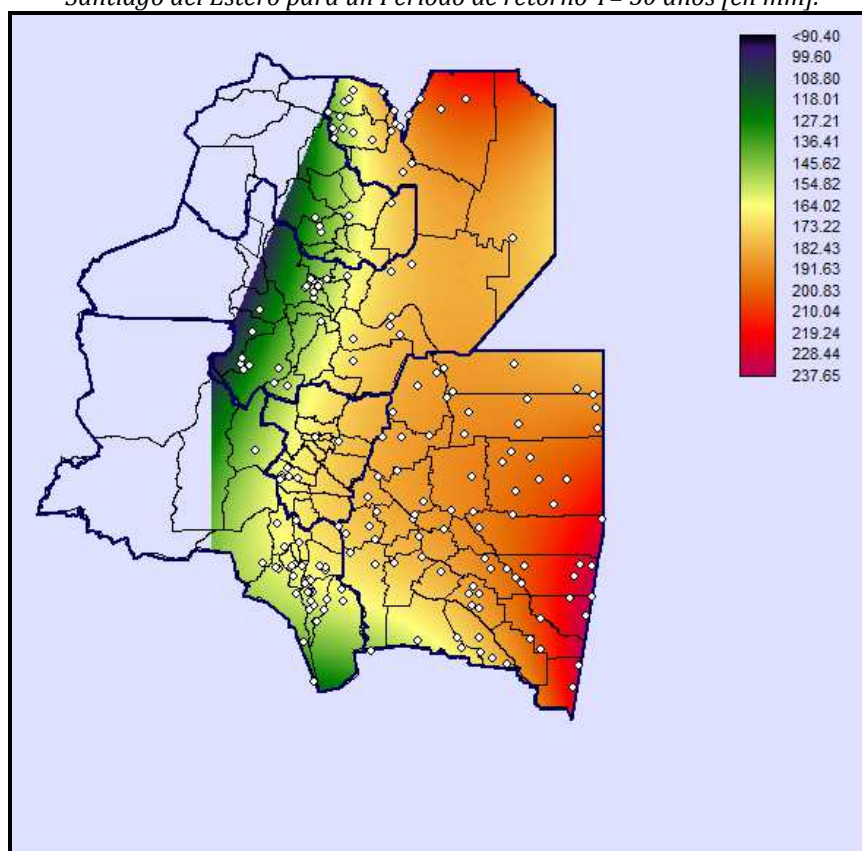


Figura 89: Mapa de lluvias máximas anuales en las provincias de Catamarca, Tucumán, Salta, Jujuy y Santiago del Estero para un Periodo de retorno  $T= 100$  años [en mm].

## **7.4. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL BORDE.**

### **7.4.1. Influencia en el borde Norte de Catamarca y Tucumán al incorporar Salta y Jujuy.**

Antes de realizar la comparación entre los mapas, es necesario realizar un procedimiento adecuado utilizando el sistema de información geográfica, para poder analizar la influencia de los bordes; los mismos se detallan en la siguiente sección.

#### **7.4.1.1. Metodología utilizada**

A continuación, a modo de ejemplo se explicará lo realizado para estudiar la influencia de agregar las provincias de Salta y Jujuy a Catamarca y Tucumán. Análogamente a esto, se hizo lo mismo al agregar en el análisis a Santiago del Estero.

En primer lugar, para poder comparar la influencia del borde, se separa la imagen aislada de la acoplada, es decir, se cortan las provincias de Catamarca y Tucumán de la imagen acoplada de Catamarca, Tucumán, Jujuy y Salta (CTSj)

Para realizar este corte se tienen que ejecutar los siguientes pasos:

- Se parte del mapa de lluvias máximas estimadas para cierto período de retorno, en este caso, de 2 años, PMD2, de las provincias acopladas de CTSj, efectuado en la sección anterior. Lo mismo se realiza para todos los periodos de retornos analizados.
- Se define una máscara de Catamarca-Tucumán, siendo esta la zona de interés en el presente estudio. Esta máscara se importa desde un archivo de Autocad (dxf.) a Idrisi, siendo un archivo tipo vector. Luego al vector se lo transforma en un raster con la función "RasterVector". Se muestra en las Figuras 90 a 95 los pasos que se deben seguir para efectuar este punto.

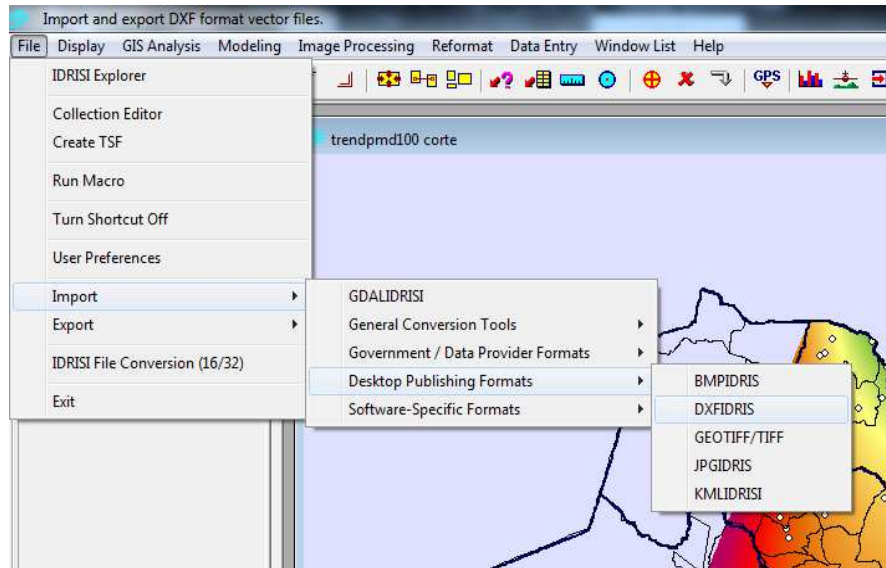


Figura 90: Secuencia para importar archivo dxf.

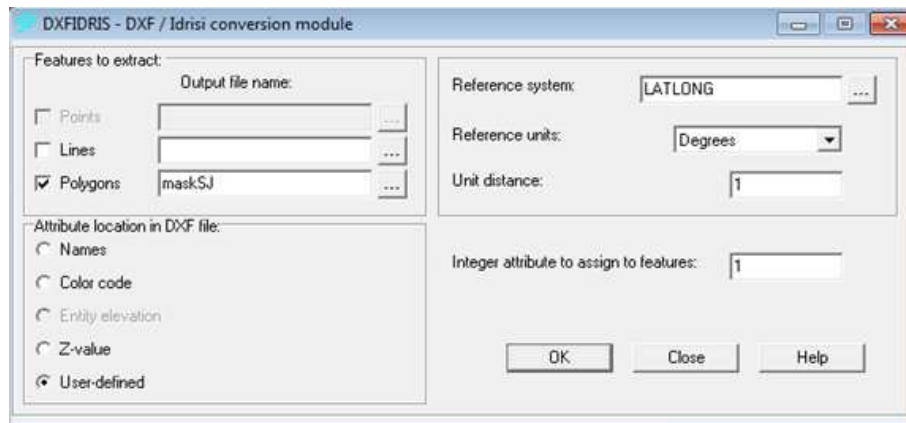


Figura 91: Cuadro para convertirlo en vector dentro de Idrisi.

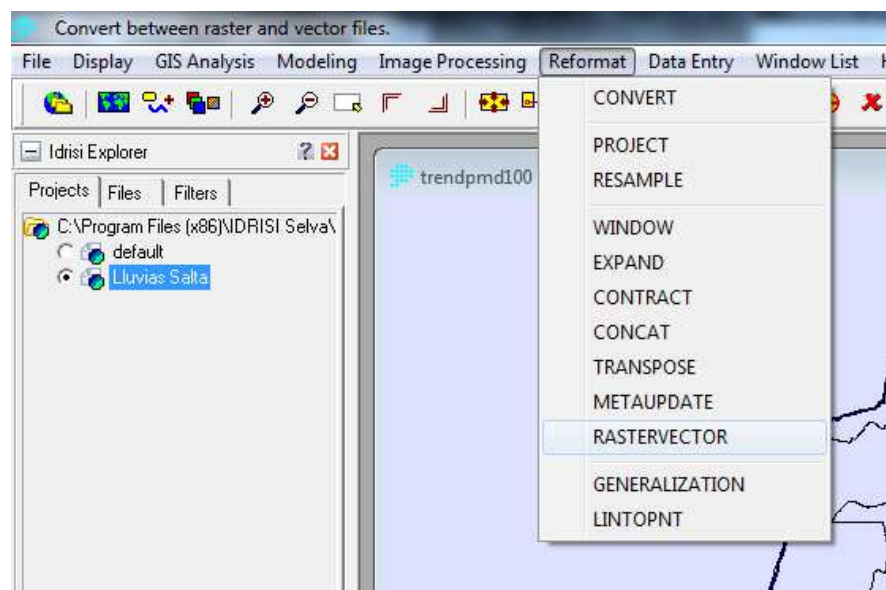


Figura 92: Secuencia para seleccionar la opción de convertir de vecor a raster.

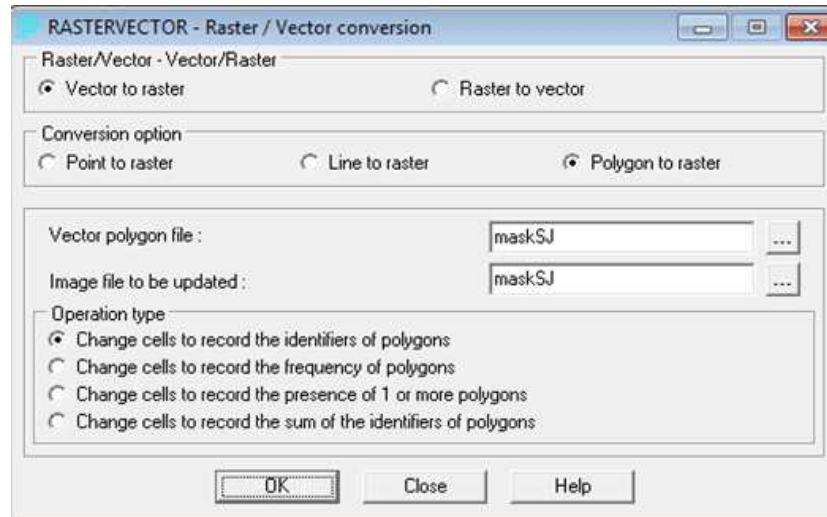


Figura 93: Cuadro de dialogo de la función RasterVector

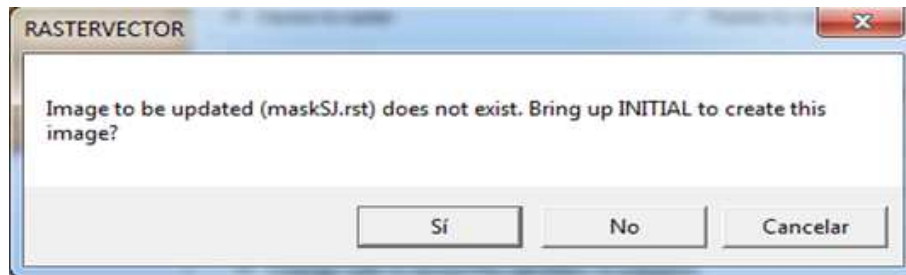


Figura 94: Cuadro de dialogo de la función RasterVector.

Esto se realiza con la finalidad de tener las mismas dimensiones tanto en la mascara de las provincias de Catamarca-Tucuman como también en la mascara de CTSyJ; es necesario para que las operaciones se puedan plasmar de manera correcta.

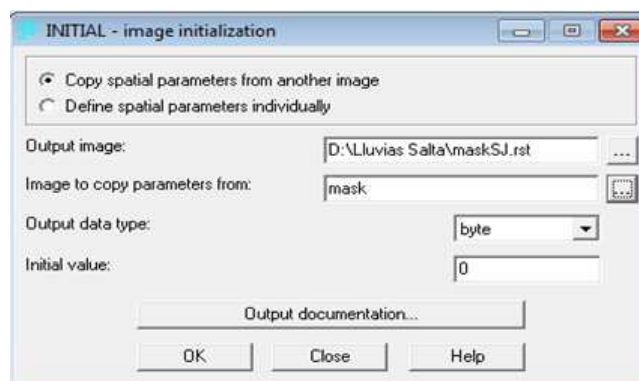


Figura 95: Cuadro de dialogo INITIAL para tener iguales tamaños en las distintas máscaras.

De esta manera se obtiene la máscara de Catamarca-Tucumán con las mismas dimensiones que la máscara de CTSyJ.

- Se usa la función "OVERLAY" (Figura 96). Se multiplica la mascara obtenida en el punto anterior con el mapa de CTSyJ, para finalmente obtener el mapa de Catamarca-Tucumán con la influencia del borde superior (Figura 97).

- Se obtiene el mapa de Catamarca-Tucumán (Figura 98).
- Al mapa inicial de Catamarca-Tucumán (Figura 66) se lo compara con el mapa obtenido en el punto anterior, para ver cual es la magnitud de la influencia de los bordes.

Para ello se necesita que ambos mapas cuenten con la misma resolución.

Por este motivo es que se trabaja con el mapa de la figura 66. Primero a la imagen *Rastertovector* se la convierte en *Rastertopoint*(Figura 99). Luego se opera nuevamente la opción RASTERVECTOR. Se selecciona *Vector to Raster* y se lo convierte a *Point to Raster*(Figura 100).

La Figura 100 muestra el cuadro que surge antes de crearse la nueva raster (imagen). Se pide “*Image to copy parameters from*” (Figura102) y ahí se selecciona el formato de la imagen de CTSy].

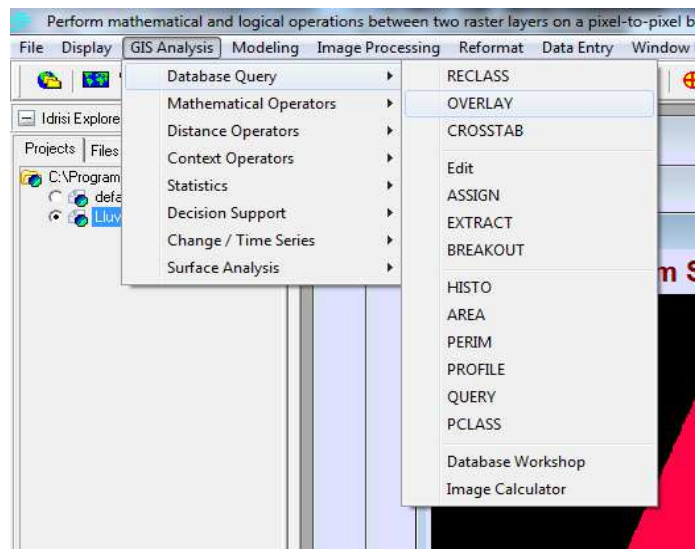


Figura 96: Secuencia para operar OVERLAY.

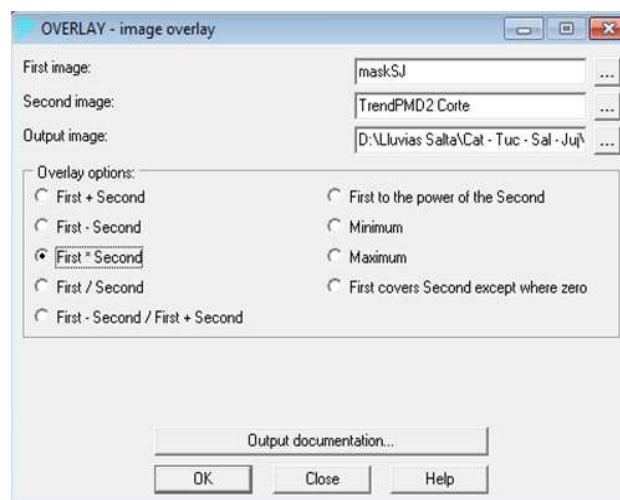


Figura 97: Cuadro de dialogo OVERLAY.

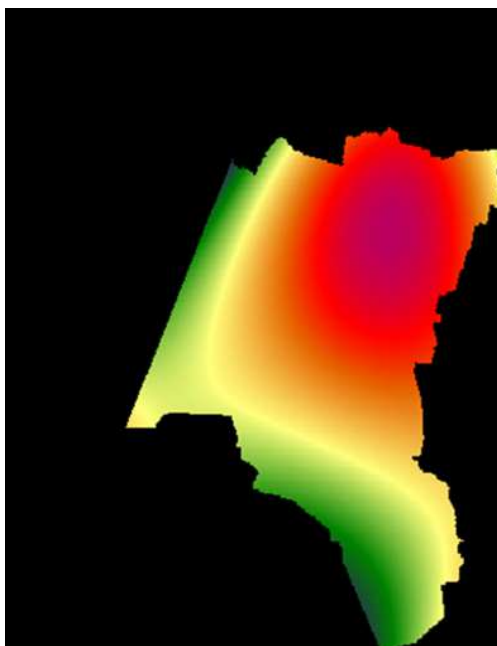


Figura 98: Mapa de Catamarca-Tucumán con influencias en el borde superior de las provincias de Salta y Jujuy.

Finalmente la imagen anterior es la que se usa para poder comparar.

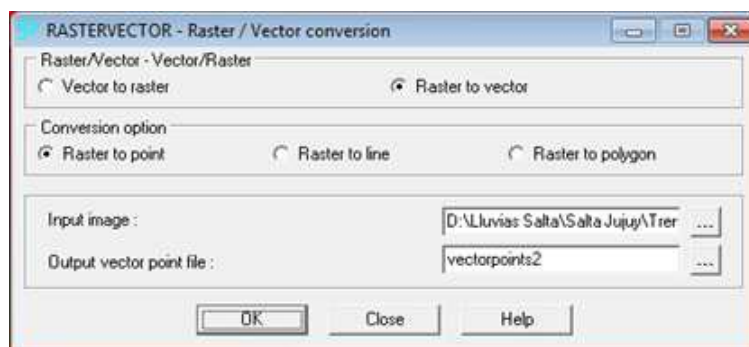


Figura 99: Cuadro de dialogo de RASTERVECTOR.

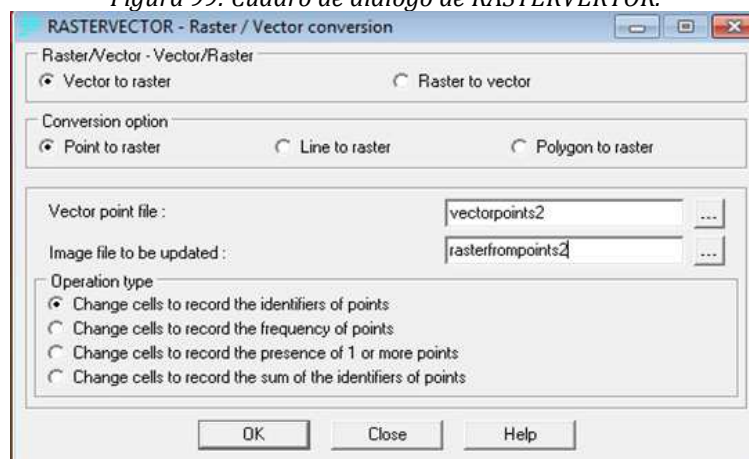


Figura 100: Cuadro de dialogo de RASTERVECTOR.



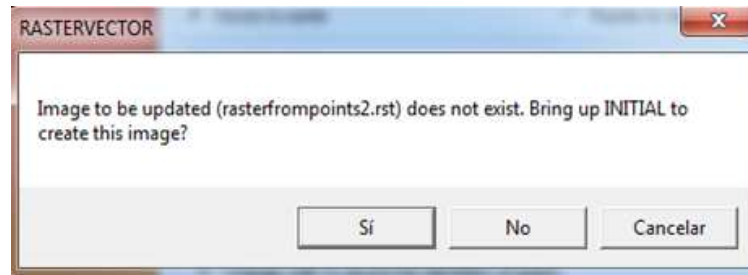


Figura 101: Cuadro de pregunta de RASTERVECTOR.

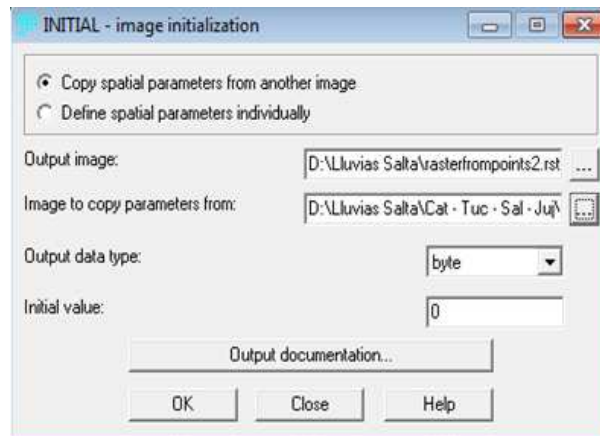


Figura 102: Cuadro de dialogo INITIAL - image initialization.

Por último se utiliza la función “OVERLAY”, y se opera el cociente entre el mapa de lluvias máximas estimadas de las provincias de Catamarca y Tucumán (analizadas en el capítulo VI) y el mapa de Catamarca y Tucumán con influencia en su borde superior. Se obtiene la Figura 103.

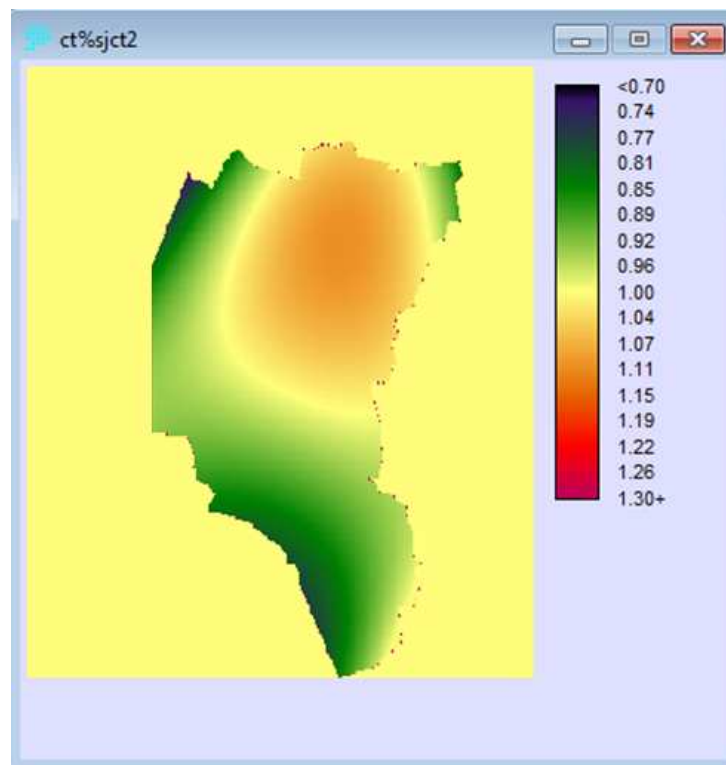


Figura 103: Mapa que resulta de realizar la operación de cociente de OVERLAY.

#### 7.4.1.2. Resultados de la comparación entre los mapas digitales de las provincias de Catamarca y Tucumán sin influencia del borde Norte y con la influencia.

Para cuantificar la influencia, se graficaron los histogramas de frecuencia asociado a cada T de las imágenes raster que muestran la comparación.

Se muestra un ejemplo de un histograma, en la forma de producción numérica (Figura 104), que se obtienen de los mapas generados por la comparación (Figura 103).



Figura 104: Histograma - Producción Numérica

A continuación, se presentan los resultados de la comparación encontrados para los diferentes T. La tabla 40 muestra los porcentajes mayores, iguales o menores a 1 en los mapas que resultan del cociente entre las provincias sin y con la condición de borde, para los distintos períodos de retorno. También se muestran los valores máximos y mínimos resultantes de este cociente.

T [años]	CT<CTSJ	CT=CTSJ	CT>CTSJ	Mínimo	Máximo
	<1	=1	>1		
2	54%	6%	40%	0.72	1.11
5	53%	14%	33%	0.68	1.07
10	46%	9%	45%	0.75	1.10
20	41%	12%	47%	0.76	1.10
25	40%	12%	48%	0.77	1.10
50	21%	8%	71%	0.78	1.23
100	33%	11%	56%	0.78	1.11

Tabla 40: Porcentajes obtenidos del cociente entre los mapas digitales de Catamarca- Tucumán con y sin influencia.

CTSJ refiere al análisis realizado con las cuatro provincias acopladas.

CT refiere a Catamarca-Tucumán analizado por separado.

Cuando el cociente es igual a 1, significa que la lluvia máxima diaria de las provincias de Catamarca y Tucumán, con o sin la incorporación de la condición del borde norte, son iguales; es decir, no hay influencia.

Cuando el cociente es menor a 1 implica que la lluvia diaria máxima es mayor cuando se consideran las condiciones de borde a cuando no se consideran, lo que genera un incremento de las estimaciones.



Cuando es mayor a 1, ocurre lo contrario: las lluvias diarias máximas estimadas son menores en las provincias con la influencia del borde norte, en relación a las que no tienen la influencia.

Viendo los resultados hallados, se observa que la influencia de Salta-Jujuy hace que aumenten las lluvias máximas diarias en toda la parte sur y noroeste en las provincias de Catamarca y Tucumán, resaltado por la zona verde de la Figura 103. Mientras que en la zona noreste, principalmente en la provincia de Tucumán, las lluvias máximas diarias estimadas disminuyen con la influencia del borde norte dado por Salta y Jujuy.

El porcentaje de valores iguales a uno (no supera el 14%), es muy pequeño, y se concentra en un contorno central que divide los valores de cociente superiores e inferiores a uno (Tabla 40).

Si graficamos estos porcentajes versus T, obtenemos lo siguiente:

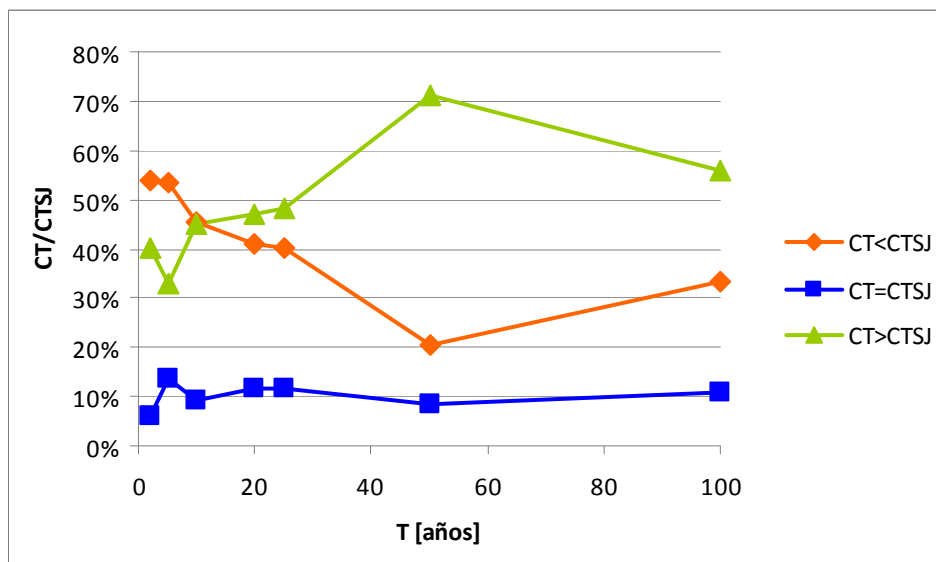


Figura 105: Gráfico en función de los porcentajes mayores, menores e iguales a uno en función de los períodos de retorno.

En la Figura 105 se observa que las lluvias máximas diarias que se mantienen iguales, para ambos casos analizados, están alrededor de un 10% para todos los períodos de retorno.

En el caso de las lluvias máximas diarias que son mayores con la influencia del borde, ( $CT/CTSJ < 1$ ), los porcentajes dentro de la provincia disminuyen junto con el período hasta  $T = 50$  años, y aumentan levemente en  $T = 100$  años.

Ocurre lo contrario con los valores de los porcentajes de lluvias máximas diarias que son mayores sin la influencia del borde ( $CT/CTSJ > 1$ ), los porcentajes aumentan hasta un  $T = 50$  años, y disminuye para  $T = 100$  años.

Al graficar el valor máximo y mínimo de los cocientes que surgen de la comparación asociados a diferentes T, se obtiene lo siguiente:

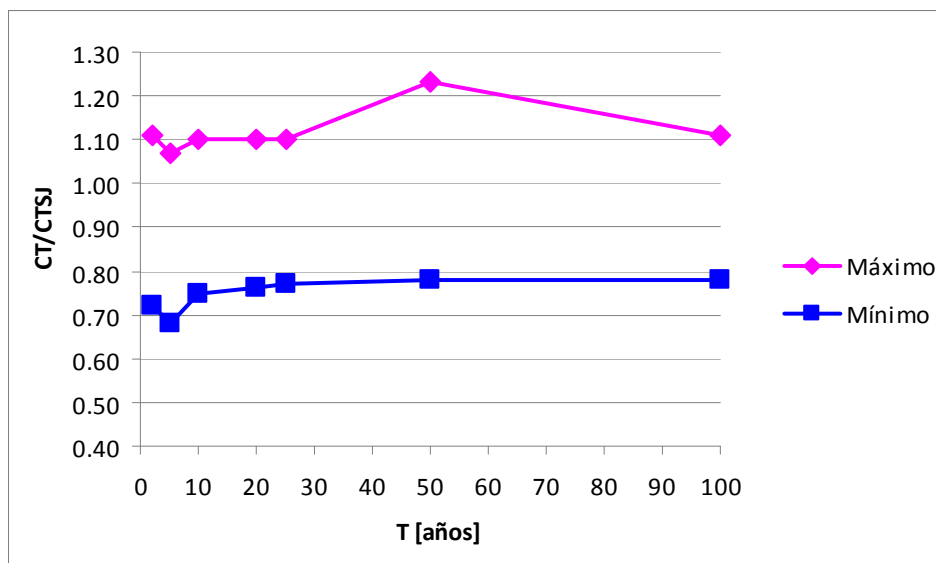


Figura 106: Gráfico de los máximos y mínimos cocientes en función de los períodos de retorno.

En la Figura 106, se ve que los máximos y mínimos se mantienen constantes para todos los T, salvo el máximo para el período T = 50 (que aumenta levemente).

Como el valor mínimo ronda los 0.8 y el máximo 1.1, se ve que la influencia del borde no es tan significativa. En la zona lejana al borde no hay influencia al agregar las provincias vecinas, mientras que en la zona del borde, si bien hay una variación al incluir los datos de lluvia limítrofes, esta diferencia no es tan importante (salvo en T= 50). Las lluvias no aumentan más de un 32% (T= 5 años) ni disminuyen más de 23% (T =50 años) con la influencia de los bordes.

#### 7.4.2. Influencia en el borde Este de Catamarca y Tucumán al incorporar, además de Salta y Jujuy, la provincia de Santiago del Estero.

En esta sección se procede en forma análoga a la sección anterior. Se compara CTSyJ con Catamarca, Tucumán, Salta, Jujuy y Santiago del Estero. Se observa el borde con Santiago del Estero, en la parte Este.

En este caso a diferencia del contraste de la sección anterior, se observa en la Figura 107, que los valores se mantienen iguales a 1 en su mayoría, representados por el color verde claro. Y más acentuado, esto, en el límite de nuestro estudio (Catamarca-Tucumán con Santiago del Estero).

Sobre la condición de borde con Santiago del Estero podemos concluir diciendo que no ocasiona grandes cambios en el límite, pero si en una pequeña zona del noroeste.

Al ajustar una función polinómica, los mejores ajustes se dan en el centro del área de estudio y en la zona externa los ajustes son mas pobres. Aquí se ve que la mayor diferencia se da en el borde oeste.

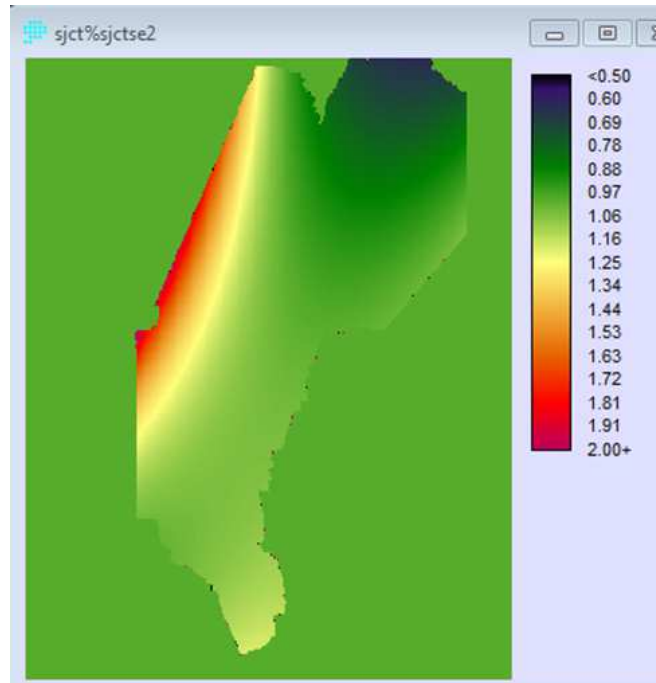


Figura 107: Mapa que resulta de realizar la operación de cociente de OVERLAY.



# *Capítulo 8*

## *CONCLUSIÓN*



## **8. CONCLUSIÓN.**

### **8.1. CONCLUSIONES DEL TRABAJO.**

A continuación se realiza una síntesis de los resultados obtenidos con respecto a los puntos enunciados en la sección 1.3. Los resultados se pueden resumir en los siguientes puntos:

1. Se recopilaron y procesaron registros de 171 estaciones pluviométricas en la región de estudio (Catamarca y Tucumán).
2. Se ubicaron espacialmente las estaciones notando una ausencia de las mismas en la zona noroeste.
3. Se realizó una verificación exhaustiva de las hipótesis estadísticas para todas las estaciones encontradas, dando como resultado que los registros de al menos 60 estaciones verificaron estas pruebas.
4. De las 6 alternativas de función de distribución de probabilidad y de método de ajuste ensayado se adoptó la función LOGNORMAL con parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud como representativo y se verificó que la incertidumbre debido al tamaño de las muestras utilizadas es más significativo que la incertidumbre debido al modelo probabilístico utilizado.
5. Se utilizó un Sistema de información Geográfico (SIG) para representar los resultados obtenidos. El programa utilizado fue IDRISI Selva 17.00.
6. Se realizó la interpolación espacial a través del método de Kriging, el cual evidenció la presencia de importantes fluctuaciones en el espacio.
7. Se crearon mapas tendenciales de isohietas de láminas de lluvias máximas diarias asociadas a diferentes períodos de retorno.
8. Se realizó el contraste con el acoplamiento de otras provincias para ver la variación de los bordes. Se concluyó que no es elemental considerar los registros de datos de las provincias limítrofes de Salta, Jujuy y Santiago del Estero, ya que modifica en general alrededor de un 10% de la lluvia diaria máxima estimada para los distintos períodos de retorno; a excepción de  $T=50$  que si modifica de manera significativa hasta un 32%. Ocurre lo mismo con el acoplamiento de Santiago del Estero, donde no se observa una variación relevante en las lluvias diarias máximas.

## **8.2. CONCLUSIONES PERSONALES.**

Como conclusión de esta actividad, se puede decir que se ha trabajado en un grupo donde prima el trabajo en equipo, en el que todos están dispuestos a enseñar y ayudar. A lo largo del desarrollo se fueron incorporando diferentes técnicas y actividades, algunas desconocidas, que han sido de gran interés y utilidad para la concreción de los objetivos planteados.

## **8.3. TRABAJOS FUTUROS.**

Se conforma una segunda etapa, a realizar hasta Julio de 2014, en donde se busca recopilar nueva información para así poder densificar y ampliar la zona de estudio, incluyendo las provincias de Formosa y Chaco. Completando así la región norte del País.

Al proceso de análisis se le sumará la estimación de la Precipitación Máxima Probable y se realizará una comparación de los resultados con las nuevas condiciones de borde con respecto a los obtenidos en este trabajo. También se creará una plataforma web para poder acceder a toda la información generada.



# *Capítulo 9*

## **REFERENCIAS**



## 9. REFERENCIAS.

- Belli, Virginia Soledad; Cueto, César Agustín; Lovera, Daniela Alejandra; Miguez Ruiz, Martín; Pinasco, Germán Horacio (2012). "Regionalización de lluvias máximas – Aplicación a las provincias de Córdoba y Santa Fe" - Trabajo final de la carrera Ingeniería Civil – Facultad de Ingeniería – Universidad Católica de Córdoba – Córdoba, Argentina.
- Camaño Nelli; Maria Clarita Dasso (2003). "Lluvias de Diseño – Conceptos, Técnicas y Experiencias".
- Carlos G. Catalini, Andrea Maidah, Carlos M. García y Gabriel Caamaño Nelli (2010). "Mapas digitales de isohietas de lluvias máximas diarias para la provincia de Córdoba"
- Carlos G. Catalini, Gabriel E. Caamaño Nelli, Carlos M. García Rodríguez, Virginia Belli, Bernabé Bianchiotti, Agustín Cueto, Gastón Lérída, Daniela Lovera, Germán Pinasco, Ezequiel Sánchez, Martín Miguez Ruiz (2012). "REGIONALIZACIÓN PARAMETRICA DE FUNCIONES I-D-T. APLICACIÓN A LAS PROVINCIAS DE CÓRDOBA Y SANTA FE"
- Audagna Yael (2014). "Regionalización de lluvias máximas diarias en la provincia de Santiago del Estero" - Trabajo final de la carrera de Ingeniería Civil – Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales – UNC – Córdoba, Argentina.
- Lecinas, Matías Javier (2014). "Validación de la tormenta de diseño para la Presa Los Molinos - Jujuy - utilizando técnicas de regionalización" - Trabajo final de la carrera de Ingeniería Civil – Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales – UNC – Córdoba, Argentina.