

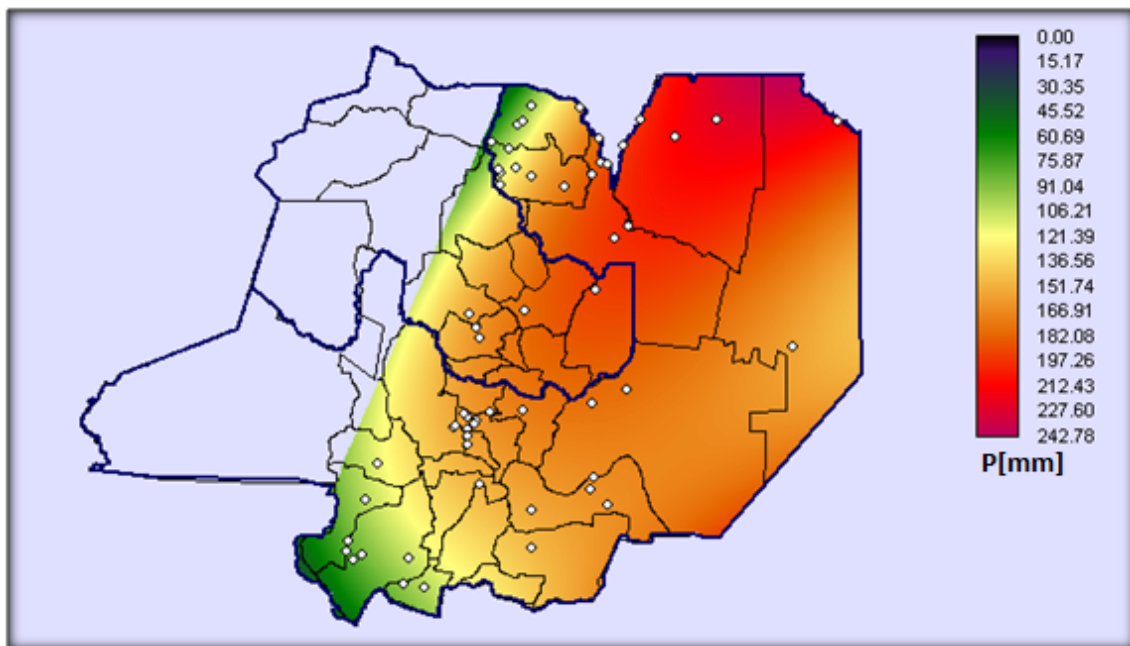
# UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales  
Centro de Estudios y Tecnología del Agua

## PRACTICA SUPERVISADA

Carrera de Ingeniería Civil

**“Validación de la tormenta de diseño para la Presa Los Molinos - Jujuy -  
utilizando técnicas de regionalización”**



Autor: Lencinas, Matías Javier.

Tutor Interno: Ing. García, Carlos Marcelo.

Supervisor Externo: Ing. Guillén, Nicolás Federico.

Año 2013

## **Agradecimientos**

- A mi familia por su apoyo incondicional.
- A mis amigos quienes estuvieron presentes en todo este largo período.
- Al Ing. Nicolás Guillen por su gran predisposición a este trabajo.
- Al Ing. Carlos Marcelo García por su dedicación.

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

---

**TÍTULO: VALIDACION DE LA TORMENTA DE DISEÑO PARA LA PRESA LOS MOLINOS – JUJUY, UTILIZANDO TECNICAS DE REGIONALIZACION.**

**PALABRAS CLAVES:** Precipitación Máxima Diaria Anual, Regionalización, Sistemas de Información Geográfica, Periodo de Retorno.

## **RESUMEN**

La Presa Los Molinos, localizada sobre el Rio Grande en la provincia de Jujuy, Argentina, es una obra hidráulica existente cuyo objetivo es abastecer a la región de agua para riego. Para el diseño de la misma, en el año 1970, se utilizó una lámina de lluvia de diseño obtenido del análisis estadístico de 13 estaciones hidro-meteorológicas con una longitud de registro de 29 años de datos pluviométricos (1927-1955). El objetivo de este trabajo es la validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

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 la fin de estimar el valor de la lámina de lluvia de diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy; a través de un análisis de regionalización, incorporando una mayor cantidad de registros (número de estaciones y longitud de serie) además de registros de la provincia de Salta para completar las condiciones de borde del análisis de regionalización.

Para el análisis estadístico finalmente se seleccionó un registro de 102 estaciones pluviométricas. A partir de esta información se elaboraron las series de máximos diarios anuales. Luego se verificaron las hipótesis estadísticas básicas requeridas para hacer un análisis de estadística inferencial (presencia de datos atípicos, independencia, estacionalidad y homogeneidad).

Se realizaron 6 ajustes de distribución de probabilidad para estimar los valores de máxima lamina de lluvia para los siguientes periodos de retorno,  $T= 5, 10, 20, 25, 50$  y  $100$  años, como así también los valores de los intervalos de confianza. Finalmente se seleccionó la función de distribución Log Normal como óptima para este estudio. Dichos valores de lámina de lluvia diaria se regionalizaron para una parte del territorio de las provincias de Salta y Jujuy mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (Idrisi Selva 17.00), el cual permite generar mapas digitalizados con una resolución espacial de  $25 \text{ km}^2$ .

## INDICE

1.	Marco referencial.....	13
1.1.	Introducción.....	13
1.1.1.	<i>Presa Los Molinos: características y problemática.....</i>	13
1.1.2.	<i>Estudio de antecedentes de estimación de tormenta de diseño para la Presa Los Molinos.....</i>	16
1.2.	Objetivos de la práctica supervisada.....	20
1.2.1.	<i>Objetivos generales.....</i>	20
1.2.2.	<i>Objetivos particulares.....</i>	20
1.3.	Metodología.....	21
2.	Conceptos básicos sobre estadística hidrológica.....	23
2.1.	Verificación de hipótesis estadísticas básicas en las series históricas.....	23
2.1.1.	<i>Detección de datos atípicos en la serie.....</i>	23
2.1.2.	<i>Prueba de Independencia (Wald-Wolfowitz).....</i>	24
2.1.3.	<i>Prueba de Estacionalidad (Kendall).....</i>	25
2.1.4.	<i>Prueba de Homogeneidad a Escala Anual (Wilcoxon).....</i>	26
2.2.	Análisis de estadística descriptiva.....	27
2.3.	Análisis de estadística inferencial.....	28
2.3.1.	<i>Función de distribución de probabilidad empírica.....</i>	28
2.3.2.	<i>Ajuste de función de distribución de probabilidad.....</i>	29
2.3.2.1.	<i>Ajuste por el Método de Momentos.....</i>	29
2.3.2.2.	<i>Ajuste por el Método de Máxima Verosimilitud.....</i>	30
2.3.3.	<i>Estimación de los valores máximos para distintos periodos de retorno.....</i>	30
3.	Información pluviométrica analizada.....	33
3.1.	Recopilación de la información meteorológica histórica.....	33
3.2.	Selección de estaciones pluviométricas.....	33
3.3.	Localización espacial de estaciones pluviométricas seleccionadas en primera instancia.....	83
3.4.	Determinación del año hidrológico para la región de estudio.....	83
3.5.	Generación de la serie hidrológica de lámina de lluvia máximas diarias.....	36
4.	Análisis estadístico completo de los registros de una serie seleccionada.....	38
4.1.	Descripción de los registros a analizar.....	38
4.2.	Verificación de hipótesis estadísticas en las series de máximos hidrológicos.....	39
4.2.1.	<i>Detección de datos atípicos.....</i>	45
4.2.2.	<i>Pruebas de independencia.....</i>	45
4.2.3.	<i>Prueba de Estacionalidad.....</i>	46
4.2.4.	<i>Prueba de Homogeneidad a Escala Anual.....</i>	46

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

---

4.3.	Análisis de estadística descriptiva.....	
4.4.	Análisis de estadística inferencial.....	
4.4.1.	<i>Función de distribución de probabilidad empírica.....</i>	
4.4.2.	<i>Ajuste de función de distribución de probabilidad.....</i>	50
4.4.3.	Contraste entre los valores de lluvia máxima estimadas con distintas funciones de distribución y métodos de ajuste.....	
5.	Análisis de resultados para el conjunto de estaciones seleccionadas.....	
5.1.	Verificación de hipótesis estadísticas en las series de lluvias máximas.....	63
5.1.1.	<i>Detección de presencia de datos atípicos.....</i>	63
5.1.2.	<i>Prueba de Independencia.....</i>	63
5.1.3.	<i>Prueba de estacionalidad.....</i>	63
5.1.4.	<i>Prueba de homogeneidad a escala anual.....</i>	64
5.2.	Análisis de estadística descriptiva.....	66
5.3.	Análisis de estadística inferencial.....	66
6.	Regionalización.....	
6.1.	Introducción.....	70
6.2.	Creación de una base de datos.....	70
6.3.	Creación de un archivo vectorial y de valores.....	72
6.4.	Generación de una máscara para delimitar la zona de interpolación.....	74
6.5.	Método de interpolación de Kriging.....	76
6.6.	Método de análisis tendencial.....	78
6.6.1.	<i>Creación de Superficies Tendenciales.....</i>	
6.6.2.	<i>Histograma de frecuencias.....</i>	
6.7.	<i>Mapas tendenciales de lluvias diarias máximas anuales para distintos periodos de retorno.....</i>	
7.	Comparación de los resultados obtenidos en este trabajo con estudios en la Presa Los Molinos...	
7.1.	Introducción.....	92
7.2.	Caracterización espacial de las lluvias de diseño.....	92
7.3.	Resultados.....	93
8.	Conclusión.....	
8.1.	Conclusiones del trabajo.....	96
8.2.	Conclusiones personales.....	97
8.3.	Trabajos futuros.....	97
9.	Referencias.....	

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: LOCALIZACIÓN DE LA PRESA LOS MOLINOS. EXTRAÍDO DE GOOGLE EARTH.....	13
FIGURA 2: PLANTA ESQUEMÁTICA DE LA PRESA LOS MOLINOS.....	14
FIGURA 3: FOTOGRAFÍA DE LA PRESA E IDENTIFICACIÓN DE SUS ELEMENTOS COMPONENTES	14
FIGURA 4: TARQUINAMIENTO DEL DIQUE FIJO.....	15
FIGURA 5: EROSIÓN GENERALIZADA EN EL LECHO DEL RÍO.....	15
FIGURA 6: ABRASIÓN DEL DIQUE MÓVIL.....	15
FIGURA 7: ABRASIÓN DEL DIQUE FIJO.....	15
FIGURA 8: EROSIÓN LOCALIZADA AL PIE DEL CANAL MODERADOR.....	15
FIGURA 9: CUENCA DEL RIO GRANDE HASTA LA PRESA LOS MOLINOS.....	17
FIGURA 10: ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS CONSIDERADAS PARA ESTIMAR LA LAMINA DE LLUVIA DE DISEÑO EN EL PROYECTO ORIGINAL DE LA PRESA LOS MOLINOS.....	18
FIGURA 11: ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS SELECCIONADAS EN LA CUENCA ACTIVA DE LOS MOLINOS.....	19
FIGURA 12: HIDROGRAMA DE ESTACIÓN PUENTE PÉREZ Y PRECIPITACIÓN ASOCIADA EN LA CUENCA TOTAL Y EN LA CUENCA ACTIVA (UNLP, 1970).....	19
FIGURA 13: LONGITUD DE REGISTRO DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS ENCONTRADAS. ....	36
FIGURA 14: DISPOSICIÓN ESPACIAL DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS ENCONTRADAS....	38
FIGURA 15: PARTE DEL VECTOR HISTÓRICO DE DATOS DE LLUVIA DIARIA DE LA ESTACIÓN POZO SARMIENTO (CÓDIGO INTERNO 107).....	40
FIGURA 16: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS VALORES MÁXIMOS ANUALES DE LLUVIA DIARIA PARA LA ESTACIÓN POZO SARMIENTO.....	43
FIGURA 17: SALIDA DEL PROGRAMA HYFRAN PARA LA PRUEBA DE INDEPENDENCIA DE LA SERIE DE MÁXIMOS ANUALES DE LLUVIA DIARIA DE LA ESTACIÓN POZO SARMIENTO (CÓDIGO INTERNO 107).....	45
FIGURA 18: SALIDA DEL PROGRAMA HYFRAN PARA LA PRUEBA DE ESTACIONALIDAD DE LA SERIE DE MÁXIMOS ANUALES DE LLUVIA DIARIA DE LA ESTACIÓN POZO SARMIENTO (CÓDIGO INTERNO 107).....	46
FIGURA 19: SALIDA DEL PROGRAMA HYFRAN PARA LA PRUEBA DE HOMOGENEIDAD A ESCALA ANUAL DE LA SERIE DE MÁXIMOS ANUALES DE LLUVIA DIARIA DE LA ESTACIÓN POZO SARMIENTO (CÓDIGO INTERNO 107).....	47
FIGURA 20: SALIDA DEL PROGRAMA HYFRAN PARA EL ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LA VARIABLE LLUVIAS MÁXIMAS DIARIAS (UNIDADES EN [MM]).....	47

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

FIGURA 21: SALIDA DEL PROGRAMA HYFRAN PARA DESCRIPCIÓN DE LA ESTACIÓN.....	48
FIGURA 22: DETERMINACIÓN, UTILIZANDO EL PROGRAMA HYFRAN, DE PROBABILIDADES EMPÍRICAS DE CADA DATO DE LLUVIA DIARIA MÁXIMA ANUAL UTILIZANDO LA ECUACIÓN DE WEIBULL PARA LA ESTACIÓN POZO SARMIENTO (CÓDIGO INTERNO 107).....	48
FIGURA 23: CAPTURA DE PANTALLA DONDE SE INDICA LA SELECCIÓN DE LA FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD.....	50
FIGURA 24: CAPTURA DE PANTALLA DONDE SE INDICA LA SELECCIÓN DEL MÉTODO DE AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DE LA FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD.....	51
FIGURA 25: CAPTURA DE PANTALLA DONDE SE INDICA LA INCLUSIÓN DEL PERIODO DE RETORNO T=25 AÑOS.....	51
FIGURA 26: 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 POZO SARMIENTO (CÓDIGO INTERNO 107)..	52
.....	
FIGURA 27: TEST DE ADECUACIÓN PARA LA FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD GEV SOBRE LA BASE DE LA REGIÓN DE ESTUDIO DE LA ESTACIÓN POZO SARMIENTO (CÓDIGO INTERNO 107).....	52
FIGURA 28: COMPARACIÓN ENTRE ESTIMACIONES REALIZADAS CON DISTINTAS FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD Y PARÁMETROS AJUSTADOS CON EL MÉTODO DE MOMENTOS.....	59
FIGURA 29: 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 POZO SARMIENTO (CÓDIGO INTERNO 107).....	59
FIGURA 30: 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.....	
FIGURA 31: 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.....	65
FIGURA 32: ANALISIS DE DISPERSION DEL METODO LOGNORMAL.....	65
FIGURA 33: ESTACIONES FINALMENTE SELECCIONADAS.....	6
FIGURA 34: CUADRO DE DIÁLOGO DATABASEWORKSHOP – IMPORT.....	71
FIGURA 35: CUADRO DE DIÁLOGO DATABASE WORKSHOP - EXPORT.....	72

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

FIGURA 36: CUADRO DE DIÁLOGO EXPORT VECTOR FILE.....	73
FIGURA 37: CUADRO DE DIÁLOGO DE ESTABLISH A DISPLAY LINK .....	73
FIGURA 38: CUADRO DE DIÁLOGO EXPORT VECTOR FILE.....	74
FIGURA 39: CUADRO DE DIALOGO IMPORTDXF IDRISI.....	74
FIGURA 40: CUADRO DE DIALOGO DXF / IDRISI CONVERSIÓN MODULE.....	75
FIGURA 41: CUADRO DE DIALOGO DXF / IDRISI CONVERSIÓN MODULE.....	75
FIGURA 42: CUADRO DE DIAOLOGO RASTERVECTOR.....	75
FIGURA 43: CUADRO DE DIALOGO RASTER / VECTOR CONVERSIÓN.....	76
FIGURA 44: MASCARA UTILIZADA PARA LAS PROVINCIAS DE SALTA Y JUJUY.....	76
FIGURA 45: SECUENCIA PARA ABRIR EL MÉTODO DE INTERPOLACIÓN KRIGING AND SIMULATION.....	78
FIGURA 46: CUADRO DE DIÁLOGO KRIGING AND SIMULATION.....	78
FIGURA 47: RASTER INTERPOLADO POR EL MÉTODO KRIGING.....	79
FIGURA 48: SECUENCIA PARA ABRIR EL MÉTODO DE INTERPOLACIÓN TREND.....	81
FIGURA 49: CUADRO DE DIÁLOGO DEL MÉTODO DE INTERPOLACIÓN TREND.....	81
FIGURA 50: SUPERFICIE TENDENCIAL. REGRESIÓN LINEAL. T = 2 AÑOS.....	81
FIGURA 51: ARCHIVO DE SALIDA DEL MÓDULO “TREND” .....	82
FIGURA 52: SECUENCIA PARA ABRIR LA FUNCIÓN “OVERLAY” .....	82
FIGURA 53: CUADRO DE DIÁLOGO DE LA FUNCIÓN OVERLAY.....	83
FIGURA 54: GRILLA INTERPOLADO POR EL MÉTODO TREND. T = 10 AÑOS MEDIA DE LAS SERIES HISTÓRICAS DE LAS LLUVIAS MÁXIMAS DIARIAS ANUALES.....	83
FIGURA 55: CUADRO DE DIÁLOGO DE LA FUNCIÓN OVERLAY.....	84
FIGURA 56: DIFERENCIA ENTRE “KRIGING” (VALORES MÍNIMOS) Y “TREND” (REGRESIÓN LINEAL). T = 2 AÑOS.....	85
FIGURA 57: SECUENCIA PARA ABRIR LA FUNCIÓN HISTO.....	85
FIGURA58: CUADRO DE DIÁLOGO DE LA FUNCIÓN HISTO.....	86
FIGURA 59: HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS. PRODUCCIÓN NUMÉRICA.....	86
FIGURA 60: HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS. PRODUCCIÓN GRÁFICA.....	87
FIGURA 61: DIFERENCIA PORCENTUAL ENTE VALORES MEDIOS Y EXTREMOS.....	88
FIGURA 62: MAPA DE LLUVIAS MÁXIMAS ANUALES PARA PERIODO DE RETORNO T= 2 AÑOS [EN MM].....	89
FIGURA 63: MAPA DE LLUVIAS MÁXIMAS ANUALES PARA PERIODO DE RETORNO T= 5 AÑOS [EN MM].....	89



Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

FIGURA 64: MAPA DE LLUVIAS MÁXIMAS ANUALES PARA PERIODO DE RETORNO $T= 10$ AÑOS [EN MM].....	89
FIGURA 65: MAPA DE LLUVIAS MÁXIMAS ANUALES PARA PERIODO DE RETORNO $T= 20$ AÑOS [EN MM].....	90
FIGURA 66: MAPA DE LLUVIAS MÁXIMAS ANUALES PARA PERIODO DE RETORNO $T= 50$ AÑOS [EN MM].....	90
FIGURA 67: MAPA DE LLUVIAS MÁXIMAS ANUALES PARA PERIODO DE RETORNO $T= 100$ AÑOS [EN MM].....	90
FIGURA 68: EJEMPLO DE UNA ATENUACIÓN DE VALORES PUNTUALES DE LLUVIAS MÁXIMAS PARA ESTIMAR VALORES AREALES.....	92
FIGURA 69: COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS POR AMBOS MÉTODOS.....	94

## INDICE DE TABLAS

TABLA 1: PRECIPITACIONES ASOCIADAS A DIFERENTES RECURRENCIAS EN LA CUENCA TOTAL Y ACTIVA.....	
TABLA 2: VALORES $KN$ PARA LA PRUEBA DE DATOS ATÍPICOS.....	24
TABLA 3: VALORES DE $KCRI$ PARA EL TEST DE KENDALL.....	27
TABLA 4: PERIODOS DE RETORNO EN AÑOS UTILIZADOS PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONTROL DE AGUA (CHOW, 1994).....	33
TABLA 5: FRECUENCIAS DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS EN FUNCIÓN DE SU LONGITUD DE SERIE.....	36
TABLA 6: ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS SELECCIONADAS (LONGITUD DE REGISTRO MAYOR A 14 AÑOS).....	37
TABLA 7: MATRIZ DE LLUVIAS DE LA ESTACIÓN POZO SARMIENTO.....	42
TABLA 8: PARTE DE LA PLANILLA DE MÁXIMOS MENSUALES ANUALES Y DE LLUVIAS DIARIAS DE LA ESTACIÓN POZO SARMIENTO.....	43
TABLA 9: PLANILLA RESUMEN DE DATOS PLUVIOMÉTRICOS.....	44
TABLA 10: PROBABILIDAD EMPÍRICA DE CADA DATO DE LLUVIA DIARIA MÁXIMA ANUAL PARA LA ESTACIÓN POZO SARMIENTO (CÓDIGO INTERNO 107).....	49
TABLA 11: 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 61 AÑOS DE LA ESTACIÓN POZO SARMIENTO (CÓDIGO INTERNO 107).....	53

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

---

TABLA 12: 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 61 AÑOS DE LA ESTACIÓN POZO SARMIENTO (CÓDIGO INTERNO 107).....	54
TABLA 13: 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 61 AÑOS DE LA ESTACIÓN POZO SARMIENTO (CÓDIGO INTERNO 107).....	55
TABLA 14: 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 61 AÑOS DE LA ESTACIÓN POZO SARMIENTO (CÓDIGO INTERNO 107).....	56
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 GUMBEL (PARÁMETROS ESTIMADOS POR EL MÉTODO DE MÁXIMA VEROSIMILITUD) SOBRE LOS REGISTROS DE 61 AÑOS DE LA ESTACIÓN POZO SARMIENTO (CÓDIGO INTERNO 107).....	57
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 LOGNORMAL (PARÁMETROS ESTIMADOS POR EL MÉTODO DE MÁXIMA VEROSIMILITUD) SOBRE LOS REGISTROS DE 61 AÑOS DE LA ESTACIÓN POZO SARMIENTO (CÓDIGO INTERNO 107).....	58
TABLA 17: CONTRASTE ENTRE LOS VALORES DE LLUVIA MÁXIMA ESTIMADAS CON DISTINTAS FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN Y MÉTODOS DE AJUSTE.....	1
TABLA 18: CONTRASTE RELATIVO DE LOS DISTINTOS VALORES ESTIMADOS CON DISTINTAS FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN (CON RESPECTO A LOS VALORES ESTIMADOS CON LA FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL).....	1
TABLA 19: ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA CON MÁS DE DOS DATOS ATÍPICOS.....	63
TABLA 20: ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA QUE NO VERIFICO LA PRUEBA DE INDEPENDENCIA DE SUS VALORES MÁXIMOS DIARIOS.....	3
TABLA 21: ESTACIONES PLUVIOMETRICAS QUE RECHAZARON LA PRUEBA DE ESTACIONALIDAD. .....	3

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

---

TABLA 22: ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS QUE RECHAZARON LA PRUEBA DE HOMOGENEIDAD.	4
.....	4
TABLA 23: ESTACIÓN QUE MOSTRABA DATOS ATÍPICOS.....	4
TABLA 24: PORCENTAJE DE ESTACIONES QUE VERIFICARON LAS PRUEBAS.....	4
TABLA 25: DATOS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LAS ESTACIONES FINALMENTE SELECCIONADAS.....	7
TABLA 26: VALORES DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD EMPÍRICA PARA LAS ESTACIONES FINALMENTE SELECCIONADAS.....	68
TABLA 27: TABLA PARA IMPORTAR EN EL PROGRAMA IDRISI.....	71
TABLA 28: PORCENTAJE DE VALORES FUERA DEL INTERVALO PARA $T = 2$ AÑOS.....	87
TABLA 29: PORCENTAJE DE VALORES FUERA DEL INTERVALO PARA $T = 5$ AÑOS.....	87
TABLA 30: PORCENTAJE DE VALORES FUERA DEL INTERVALO PARA $T = 10$ AÑOS.....	87
TABLA 31: PORCENTAJE DE VALORES FUERA DEL INTERVALO PARA $T = 20$ AÑOS.....	87
TABLA 32: PORCENTAJE DE VALORES FUERA DEL INTERVALO PARA $T = 25$ AÑOS.....	88
TABLA 33: PORCENTAJE DE VALORES FUERA DEL INTERVALO PARA $T = 50$ AÑOS.....	88
TABLA 34: PORCENTAJE DE VALORES FUERA DEL INTERVALO PARA $T = 100$ AÑOS.....	88
TABLA 35: COEFICIENTES “-K” Y “CDA” ESTIMADOS POR EL MÉTODO DE CATALINI.....	93
TABLA 36: RESUMEN DE LOS VALORES DE TORMENTA DE DISEÑO ESTIMADOS.....	93
TABLA 37: DIFERENCIA PORCENTUAL DE LOS VALORES ESTIMADOS POR EL CETA Y UNLP.....	94

# Capítulo I

## Marco referencial

## **1. Marco referencial**

### **1.1. Introducción.**

#### **1.1.1. Presa Los Molinos: características y problemática.**

La presa derivadora Los Molinos es una obra hidráulica situada en la Provincia de Jujuy, República Argentina. La misma se encuentra un kilómetro río abajo de la confluencia de los ríos Reyes y Grande a pocos kilómetros de la ciudad de San Salvador de Jujuy (Ver Figura 1). El objetivo de esta obra es abastecer de agua para riego a la región.

Figura 1: Localización de la presa Los Molinos. Extraído de Google Earth.

La presa está constituida por los siguientes elementos (ver Figura 2 y Figura 3):

- Terraplén de materiales sueltos de 340 metros de longitud y 13.1 metros de altura.
- Un vertedero fijo que se denomina como dique fijo de 200 metros de longitud.
- Un vertedero controlado por compuertas circulares que se denomina como dique móvil de 70 metros de longitud con vanos cada 15 metros.

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

- Un canal de limpieza de 10 metros de longitud al cual se llama canal moderador.
- Una obra de toma que desvía un caudal máximo 25 m<sup>3</sup>/s para el abastecimiento de agua para riego.
- Terraplén de materiales sueltos de 440 metros de longitud y 12.3 metros de altura.



Figura 2: Planta esquemática de la presa Los Molinos.

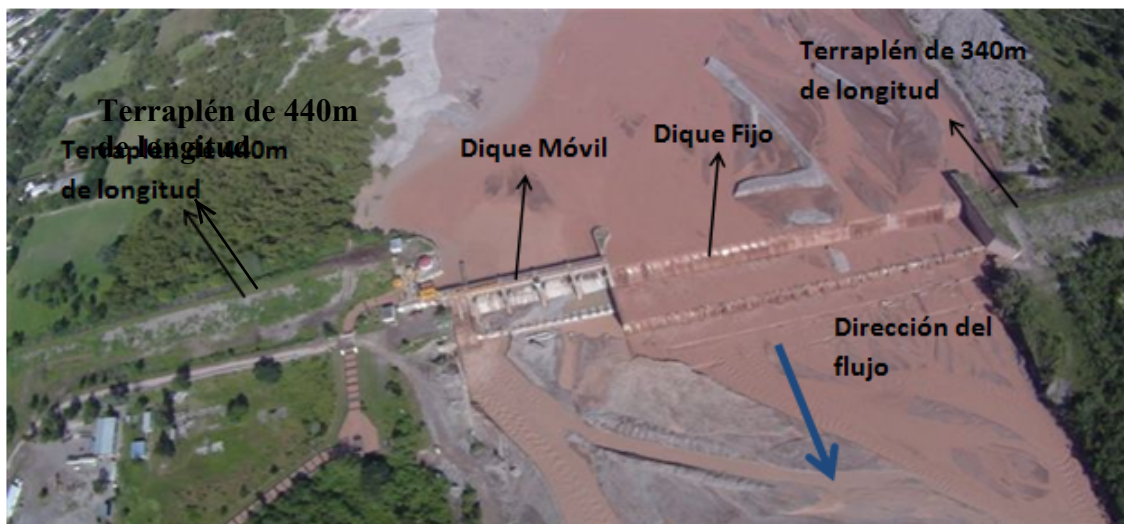


Figura 3: Fotografía de la presa e identificación de sus elementos componentes.

La presa Los Molinos actualmente presenta los siguientes problemas asociado a diversas causas naturales como:

- **Sedimentación y tarquinamiento** aguas arriba de la presa, debido al gran acarreo de materiales transportados por el río (ver Figura 4).
- **Erosión generalizada del lecho** aguas debajo de la presa, lo cual hace que peligre la estabilidad de esta (ver Figura 5).
- Debido a la colmatación de la presa empezó a generarse aporte de material desde aguas arriba hacia aguas abajo, esto genero una gran **abrasión** en el perfil de

vertedero y pileta de aquietamiento del dique fijo, cresta del vertedero del dique móvil y dientes disipadores (ver Figura 6 y Figura 7).

- **Erosiones locales** importantes aguas debajo de las obras de descarga, particularmente aguas abajo del canal moderador. Estas erosiones a pie de presa comprometen la estabilidad de la misma (ver Figura 8).
- **Falta de mantenimiento** en las obras civiles y electromecánicas que no permiten el adecuado manejo de las obras de descarga. En especial las que presentan componentes móviles (por ej. Compuertas).



Figura 4: Tarquinamiento del dique fijo.



Figura 5: Erosión generalizada en el lecho del río.



Figura 6: Abrasión del dique móvil.



Figura 7: Abrasión del dique fijo.



Figura 8: Erosión localizada al pie del canal moderador.

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

---

Las modificaciones experimentadas durante los más de 30 años de operación de las obras, tal como se han descripto, evidencian la necesidad de ejecutar un nuevo estudio a fin de contar con una herramienta para verificar y optimizar:

A - Intervenciones en la obra para controlar los riesgos de descalce que pudieran existir.

B - La tipología de maniobras a realizar con las compuertas del dique móvil y el canal moderador en los distintos eventos, para mejorar la seguridad y operatividad de las obras.

Estas acciones tienen como objetivos principales aumentar la seguridad actual de la presa y restituir la capacidad operativa del dique y generar, a partir de una mejora sustantiva en la operatividad de las compuertas, condiciones de derivación adecuadas para la toma del canal del Río Grande.

En ese marco se realizó el estudio de esta práctica supervisada con el objetivo de validar la lámina de lluvia de diseño utilizada en el estudio de proyecto original (Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de la Plata – Año 1970); para su utilización en el diseño de las propuestas mencionadas anteriormente.

### **1.1.2. Estudio de antecedentes de estimación de tormenta de diseño para la Presa Los Molinos.**

En el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de la Plata, en el año 1970, se realizó un estudio sobre las crecientes de diseño en la cuenca del río Grande de la provincia de Jujuy, lugar de emplazamiento de la Presa Los Molinos.

La cuenca del Río Grande nace en Tres Cruces y se dirige de Norte a Sur hasta su unión con el río Perico, donde cambia de rumbo hacia el nordeste, formando luego el río San Francisco junto con el río Lavayén y descargando sus aguas en el río Bermejo.

Sus principales afluentes, aguas arriba de la obra de derivación son los ríos: Reyes, Yala, León, Yacoraite y Calete. El sistema hidrográfico tiene un régimen periódico que coincide con las lluvias (verano), con lo cual muchos afluentes pierden su caudal en la época de estiaje (invierno).

El río Grande recorre íntegramente la quebrada de Humahuaca con un desnivel de 17 m/Km, que explica la velocidad de la corriente y la erosión en el cauce, además cuenta con una cuenca del orden de 6500 Km<sup>2</sup> hasta la obra de Los Molinos (Ver Figura 9). La cuenca se origina al sureste de la sierra de Santa Victoria, presentando una forma aproximadamente rectangular, de 190 km de longitud y 45 km de ancho medio.



Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

Debido a la ausencia de registros históricos continuos de caudales escurridos superficialmente en el lugar de emplazamiento de la Presa Los Molinos, la crecida de diseño se estimó a partir de información de lluvias y de un modelo de transformación lluvia-caudal.



Figura 9: Cuenca del Río Grande hasta la Presa Los Molinos.

Para estimar la lluvia de diseño en la cuenca del río Grande hasta su confluencia con el río Reyes se ha contado con los datos de lluvias diarias de once pluviómetros emplazados en la cuenca y uno externo a la misma. Las estaciones pluviométricas consideradas de sur a norte son (Ver Figura 10):

1. Yala
2. León
3. Volcán
4. Purmamarca
5. Maimará
6. Tilcara
7. Huacalera
8. Senador Pérez
9. Humahuaca

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

10. Iturbe
11. Tres Cruces
12. Abra Pampa

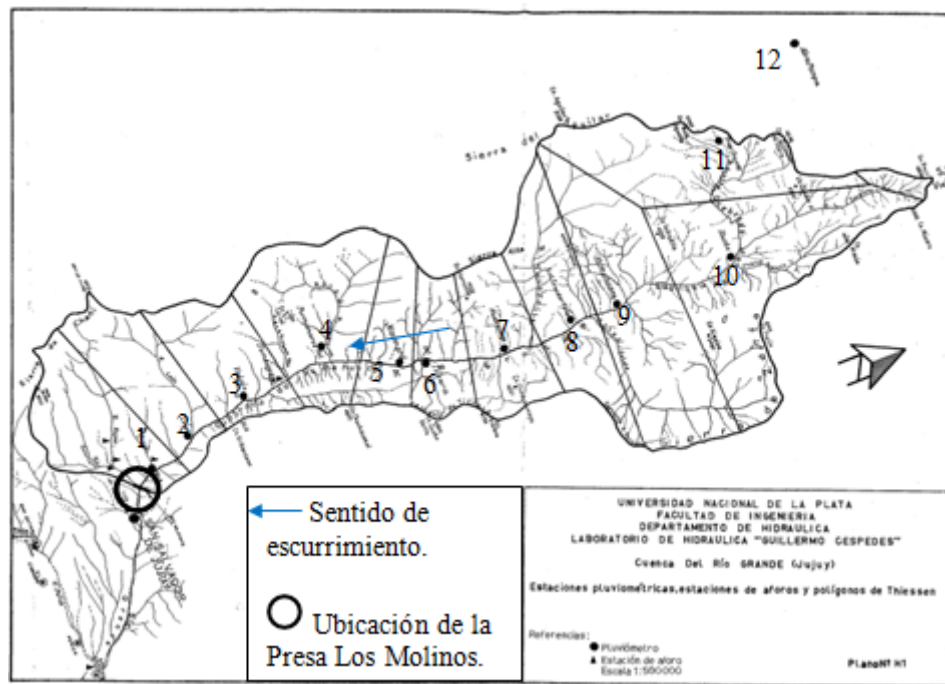


Figura 10: Estaciones pluviométricas consideradas para estimar la lámina de lluvia de diseño en el proyecto original de la Presa Los Molinos.

La Figura 10 también incluye los polígonos de Thiessen que indican el área de cobertura de cada pluviómetro. Del análisis de los registros de estas estaciones para el proyecto original se utilizó el periodo de datos de lluvias a considerar: 1927 – 1955 inclusive.

Una serie de alternativas evaluadas durante el análisis de los hidrogramas observados en Puente Pérez dieron origen a un estudio particular de las lluvias máximas anuales como promedios areales de lo que se ha dado en llamar cuenca “activa”. Esta cuenca fue definida por el área integrada prácticamente por los últimos 3 polígonos ubicados inmediatamente aguas arriba de la confluencia del río Grande con el río Reyes (Ver Figura 11). Al observar los hidrogramas que se habían medido en la estación Puente Pérez, se percataron de la existencia de 2 picos ante la avenida de una precipitación determinada (Ver Figura 12).

Analizando este fenómeno, surgió la idea de la presencia de una cuenca “activa” dentro de la cuenca total en estudio. Esta cuenca “activa” está constituida por las estaciones Yala, Volcán y León, que totalizan una superficie de 1497 Km<sup>2</sup>. Luego de realizar un análisis del régimen de crecidas en la estación Puente Pérez, se pudo establecer que aguas abajo de Tumbaya hay un sistema hidrometeorológico que opera en forma distinta al sistema de aguas

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

arriba. Las estaciones ubicadas fuera de la cuenca “activa” muestran pobre correlaciones con las ubicadas dentro de ella.

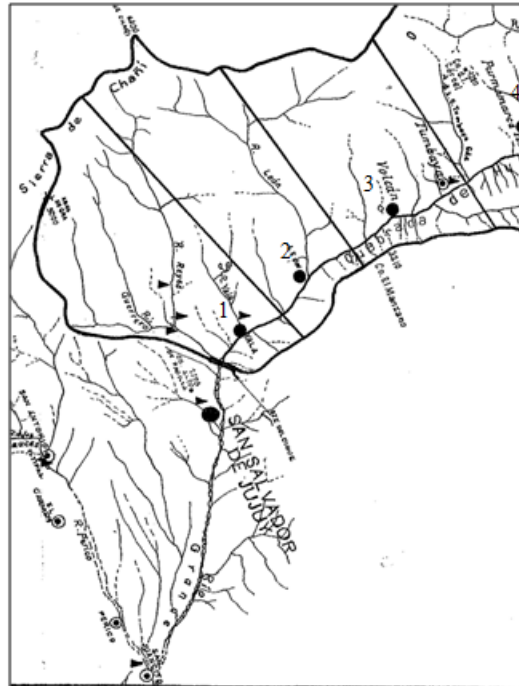


Figura 11: Estaciones pluviométricas seleccionadas en la cuenca activa de Los Molinos.

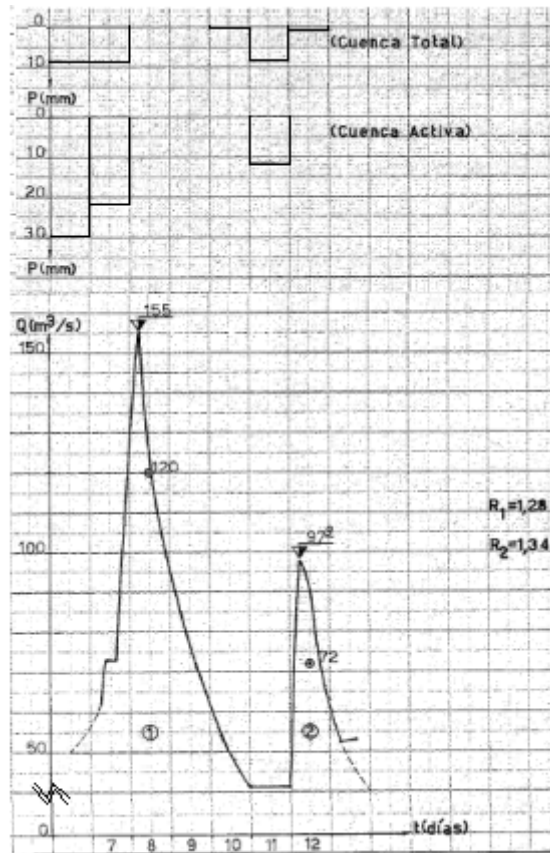


Figura 12: Hidrograma de estación Puente Pérez y precipitación asociada en la cuenca total y en la cuenca activa (UNLP, 1970).

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

La parte de la cuenca ubicada aguas arriba de Tumbaya está mucho menos provista de lluvias intensas y duraderas y como consecuencia presenta crecientes de poca relevancia y mayor espaciamiento entre ellas. Así, puede observarse que las precipitaciones medias diarias de la cuenca “activa” son normalmente el doble que en la cuenca total.

Por las razones mencionadas anteriormente se pudo inferir en el estudio original (UNLP, 1970) que solo la parte inferior de la cuenca incide directamente en la concreción de los picos de crecidas importantes. Es así que apartándose de la idea académica de cuenca y en forma convencional, se define una cuenca “activa” integrada por los tres últimos polígonos de Thiessen establecidos según la disposición de las estaciones pluviométricas.

A las series de precipitaciones máximas medias areales determinada para la cuenca activa (UNLP, 1970), se les efectuó un análisis de frecuencia de valores extremos, arrojando los siguientes resultados en función de la distribución GEV (Ver Tabla 1):

Recurrencia (años)	Precipitaciones (mm)	
	Cuenca total	Cuenca activa
2	20	51
10	30	80
50	37	112
100	41	127

Tabla 1: Precipitaciones asociadas a diferentes recurrencias en la cuenca total y activa.

Este análisis muestra claramente que la cuenca completa presenta menores precipitaciones medias areales debido tanto a que corresponde a un área de mayor tamaño, como así también debido a la disminución que experimentan las precipitaciones hacia el norte del área de aportes.

## 1.2. Objetivos de la práctica supervisada.

### 1.2.1. Objetivos generales.

- Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.
- Fomentar e incentivar al alumno para su desempeño en el área de recursos hídricos.
- Lograr una participación activa del alumno en todas las tareas a realizar para el cumplimiento de las labores concernientes a esta práctica.
- Fomentar el trabajo en equipo.

### 1.2.2. Objetivos particulares.

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

- Realizar la búsqueda, depuración, esquematización y análisis de los datos pluviométricos existentes en las provincias de Jujuy y Salta.
- Participar en la recopilación y depuración de información pluviométrica.
- Utilización de programa específico para el análisis estadístico (descriptivo e inferencial) de datos.
- Generación de un Sistema de Información Geográfica (SIG) utilizando el programa Idrisi Selva 17.00.
- Generación de mapas de “isohietas”, de resolución espacial 25 km<sup>2</sup> utilizando el Sistema de Información Geográfico (SIG).
- Contraste de valores de láminas de lluvia de diseño estimados en este trabajo y en estudios previos.

### **1.3. 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 la provincia de Jujuy y Salta. Las estaciones pluviométricas de la provincia de Salta fueron incorporadas al estudio para evaluar los efectos de borde en el análisis de regionalización.
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. Contraste con láminas de lluvia de diseño.

# Capítulo II

## Conceptos básicos sobre estadística hidrológica

## 2. Conceptos básicos sobre estadística hidrológica.

### 2.1. Verificación de hipótesis estadísticas básicas en las series históricas.

#### 2.1.1. Verificación de la presencia 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 es el desvío estándar. La siguiente ecuación (aplicando la metodología propuesta por Chow -1959) de frecuencia puede utilizarse para detectar datos atípicos:

#### Ecuación 2-1

Donde  $K_n$  es el umbral de dato atípico alto o bajo, en unidades logarítmicas,  $n$  es un valor que depende del tamaño de la muestra (Ver Tabla 2). Si los logaritmos de los valores en una muestra son mayores que  $K_n$  (límite superior) entonces se consideran como datos atípicos altos, análogamente en el caso de ser menores que  $K_n$  (límite inferior) serán tomados como datos atípicos bajos.

Tamaño de muestra $n$	$K_n$	Tamaño de muestra $n$	$K_n$	Tamaño de muestra $n$	$K_n$	Tamaño de muestra $n$	$K_n$
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	2,7	80	2,94
15	2,247	29	2,549	43	2,71	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
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 2: Valores  $K_n$  para la prueba de datos atípicos.

### **2.1.2. 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:

: Número de secuencias;

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

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

: Número de datos en la muestra

En la prueba se utiliza el valor estadístico para una prueba de dos extremos. Si 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 se encuentra entre estos límites, la hipótesis nula de aleatoriedad puede aceptarse. El valor estadístico se determina de la siguiente manera:

**Ecuación 2-2**

Dónde:

**Ecuación 2-3**

**Ecuación 2-4**

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



### 2.1.3. 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. En esta prueba, para cada dato de la serie, la cual se encuentra ordenada cronológicamente, se calcula cuantos datos posteriores son superiores. De esta forma:

#### Ecuación 2-5

En donde 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. Los mismos se determinan de la siguiente manera:

#### Ecuación 2-6

En donde 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  $I = \frac{S - T}{n(n-1)}$ , 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 en el índice  $Z$ , definido como:

#### Ecuación 2-7

Los valores de  $K_{cri}$  son obtenidos de una distribución Normal, los cuales son presentados en la Tabla3.

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

Tabla3: Valores de  $K_{cri}$  para el test de Kendall.

#### 2.1.4. 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 alta y así sucesivamente, 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:

#### 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:

#### Ecuación 2-9

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

**Ecuación 2-10**

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

**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.

**2.2. 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**

## **2.3. Análisis de estadística inferencial.**

### **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:

**Ecuación 2-18**

Donde  $n$  corresponde al número total de datos de una serie (años de registro) y  $k$  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 alrededor del origen es el producto de su brazo de momento  $x$  y de su masa  $1/n$ , y la suma de estos momentos para toda la información es la media de la muestra.

#### **Ecuación 2-19**

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

#### **Ecuación 2-20**

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 requiriera.

### 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 o probabilidad conjunta de ocurrencia de la muestra observada. Si se supone que el espacio muestral se divide en intervalos de longitud  $\Delta x$  y se toma una muestra de observaciones independientes e idénticamente distribuidas. El valor de la densidad de probabilidad para  $x_i$  es  $f(x_i)$ , y la probabilidad de que la variable aleatoria ocurra en el intervalo que incluye  $x_i$  es  $f(x_i)\Delta x$ . 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:

#### Ecuación 2-21

y puesto que el tamaño del intervalo  $\Delta x$  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 2-22

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 2-23

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

#### Ecuación 2-24

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 de que en  $n_p$  años de predicción futuros se alcance o se supere la magnitud del evento crítico, de duración  $n_d$  años, medido en  $n_o$  años de observación precedentes.

#### Ecuación 2-25

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

#### Ecuación 2-26

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 4 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	5 - 10
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 4: Periodos de retorno en años utilizados para el diseño de estructuras de control de agua (Chow, 1994).

# Capítulo III

## Información pluviométrica analizada



### 3. Información pluviométrica analizada.

#### 3.1. Recopilación de la información meteorológica histórica.

Se recopiló información acerca de la lámina de lluvia diaria, la misma se obtuvo de las estaciones pluviométricas instaladas en las provincias de Jujuy y Salta. Luego fue necesario confeccionar 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 como:

- Páginas web, en su mayoría pertenecientes a entidades gubernamentales, donde se encuentran datos históricos de lluvia diaria:

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

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

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

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

- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) – Salta.
- Secretaría de Recursos Hídricos – Salta.
- Aeropuerto “Gral. Martín Miguel de Güemes” de la ciudad de Salta Capital.

En total se analizaron 102 estaciones pluviométricas dentro del territorio. Los mismos se basan en vectores, en formato txt., que muestran la fecha y los milímetros precipitados durante veinticuatro horas, establecidas por convención desde las nueve de la mañana a las nueve de la mañana del día subsiguiente.

#### 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, implica rechazar 51 de los 102 puestos pluviométricos disponibles, lo que equivale a un 50% 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 5 y Figura 13 permite visualizar la cantidad de estaciones que pertenecen a cada intervalo de longitud de serie, es decir, entre uno y catorce años, mayores o igual a catorce años y mayor o igual de veinte. Por otra parte, existen 67 estaciones con más de catorce años de registro, conformando el 66% del total. Este porcentaje de estaciones son las que continuaron las verificaciones subsiguientes.

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

Longitud de serie		
Estaciones con datos	102	Porcentaje
1 < Longitud de serie < 14	35	34%
Longitud de serie >= 14	67	66%
Longitud de serie >= 20	51	50%

Tabla 5: Frecuencias de las estaciones pluviométricas en función de su longitud de serie.

Figura 13: Longitud de registro de las estaciones pluviométricas encontradas.

### 3.3. Localización espacial de las estaciones pluviométricas seleccionadas.

En la Tabla 6 se describen las estaciones seleccionadas en primera instancia y en la Figura 14 puede apreciarse la disposición espacial de las mismas. Puede observarse una concentración mucho mayor en la provincia de Salta y no así en la de Jujuy, ubicándose, para Salta, en la faja central y en la zona Este para la provincia de Jujuy. En esta instancia del desarrollo del trabajo no se incluyeron estaciones en el sector de la Puna.

Como se mencionó anteriormente, se denota la presencia de estaciones pluviométricas en la faja central de ambas provincias combinadas, esto es debido a que los vientos procedentes del Atlántico, cargados de humedad, pasan por encima de la llanura chaqueña hasta encontrar las primeras elevaciones de las sierras subandinas. Al contacto con ellas, se produce la descarga de las nubes con abundantes lluvias, lo cual genera en las laderas orientales el crecimiento de una vegetación selvática. Sin embargo, la humedad no pasa al otro lado de las sierras, es decir, a las laderas occidentales, donde el clima, por el contrario, es muy seco. La escasez de lluvias justifica la no disposición de estaciones pluviométricas en estos lugares.



Tabla 6: Estaciones pluviométricas seleccionadas (longitud de registro mayor a 14 años).

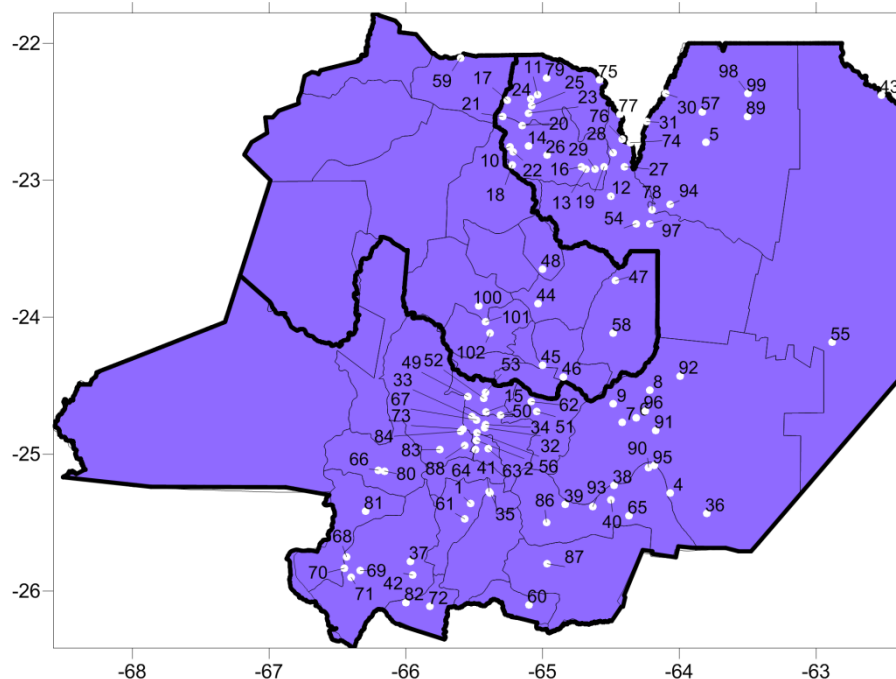


Figura 14: Disposición espacial de las estaciones pluviométricas encontradas.

### 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.

### 3.5. Generación de la serie hidrológica de lámina de lluvia máximas diarias.

Luego de fijar el año hidrológico se pudo determinar los meses que contenían los datos de precipitación máxima para los distintos años para determinar los meses más relevantes para este estudio. 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 es probable que se dé la precipitación máxima anual, ya que podría ocasionar problemas significativos en los análisis estadísticos que se realizaran sobre ellas.

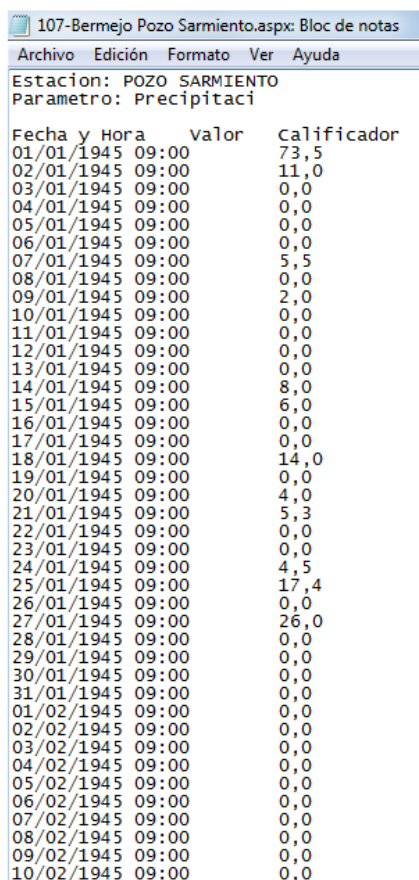
# Capítulo IV

Análisis estadístico completo de los registros de una estación pluviométrica seleccionada

## 4. Análisis estadístico completo de los registros de una estación pluviométrica seleccionada.

### 4.1. Descripción de los registros a analizar.

A continuación, y a modo de ejemplo, se presenta el análisis estadístico completo de los registros de lluvia diaria de la estación Pozo Sarmiento (código interno 107) localizada en la provincia de Salta. En forma similar se analizan las otras estaciones seleccionadas. En la Figura 15 se puede apreciar el vector histórico de datos de lluvia diaria perteneciente a la estación Pozo Sarmiento.



Fecha y Hora	valor	Calificador
01/01/1945 09:00	73,5	
02/01/1945 09:00	11,0	
03/01/1945 09:00	0,0	
04/01/1945 09:00	0,0	
05/01/1945 09:00	0,0	
06/01/1945 09:00	0,0	
07/01/1945 09:00	5,5	
08/01/1945 09:00	0,0	
09/01/1945 09:00	2,0	
10/01/1945 09:00	0,0	
11/01/1945 09:00	0,0	
12/01/1945 09:00	0,0	
13/01/1945 09:00	0,0	
14/01/1945 09:00	8,0	
15/01/1945 09:00	6,0	
16/01/1945 09:00	0,0	
17/01/1945 09:00	0,0	
18/01/1945 09:00	14,0	
19/01/1945 09:00	0,0	
20/01/1945 09:00	4,0	
21/01/1945 09:00	5,3	
22/01/1945 09:00	0,0	
23/01/1945 09:00	0,0	
24/01/1945 09:00	4,5	
25/01/1945 09:00	17,4	
26/01/1945 09:00	0,0	
27/01/1945 09:00	26,0	
28/01/1945 09:00	0,0	
29/01/1945 09:00	0,0	
30/01/1945 09:00	0,0	
31/01/1945 09:00	0,0	
01/02/1945 09:00	0,0	
02/02/1945 09:00	0,0	
03/02/1945 09:00	0,0	
04/02/1945 09:00	0,0	
05/02/1945 09:00	0,0	
06/02/1945 09:00	0,0	
07/02/1945 09:00	0,0	
08/02/1945 09:00	0,0	
09/02/1945 09:00	0,0	
10/02/1945 09:00	0,0	

Figura 15: Parte del vector histórico de datos de lluvia diaria de la estación Pozo Sarmiento (código interno 107). Para el análisis de estos 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 a

sentados los datos de

- El año de inicio de la recolección de dichos datos.
- Nombre, coordenadas, ubicación y código interno asignado a la estación.

Estos datos de lluvia diaria, que se encontraban como vector originalmente, debieron ser reprocesados para que los mismos quedaran ordenados en forma de matriz (en una matriz de  $N \times 12 \times 31$ , 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

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

por día y mes. En la Tabla 7 se observa una porción de la planilla de datos perteneciente a la estación Pozo Sarmiento. 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 misma pestaña (“Datos Basicos”), una planilla (Ver Tabla 8) 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.

Para la estación analizada en la Tabla 8, los máximos anuales (resaltados en la tabla) ocurrieron entre los meses de Noviembre y Marzo. Del análisis de todas las estaciones se concluyó que si entre los meses de Octubre y Abril, inclusive, no se contaba con al menos un 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, ocasionando una distorsión significativa en los análisis estadísticos que se realizaran sobre ellas.

En la Figura 16 se representa la evolución temporal de los máximos valores anuales de lluvia diaria en función del año en que se registró el evento para la estación Pozo Sarmiento. Los registros de la estación Pozo Sarmiento cuentan con 61 años de longitud, siendo el más extenso de todas las series registradas.

## **4.2. Verificación de hipótesis estadísticas en las series de máximos hidrológicos.**

### **4.2.1. Detección de datos atípicos.**

Los datos atípicos en la serie se detectan utilizando la metodología presentada en la sección 2.1.1. En la Tabla 9 se observa el test realizado implementando el uso de las herramientas de Excel en la serie de la estación pluviométrica Pozo Sarmiento. En este caso no se detectó ningún dato atípico, por lo cual en todos los datos aparece la palabra “VERIFICA” en la quinta columna.

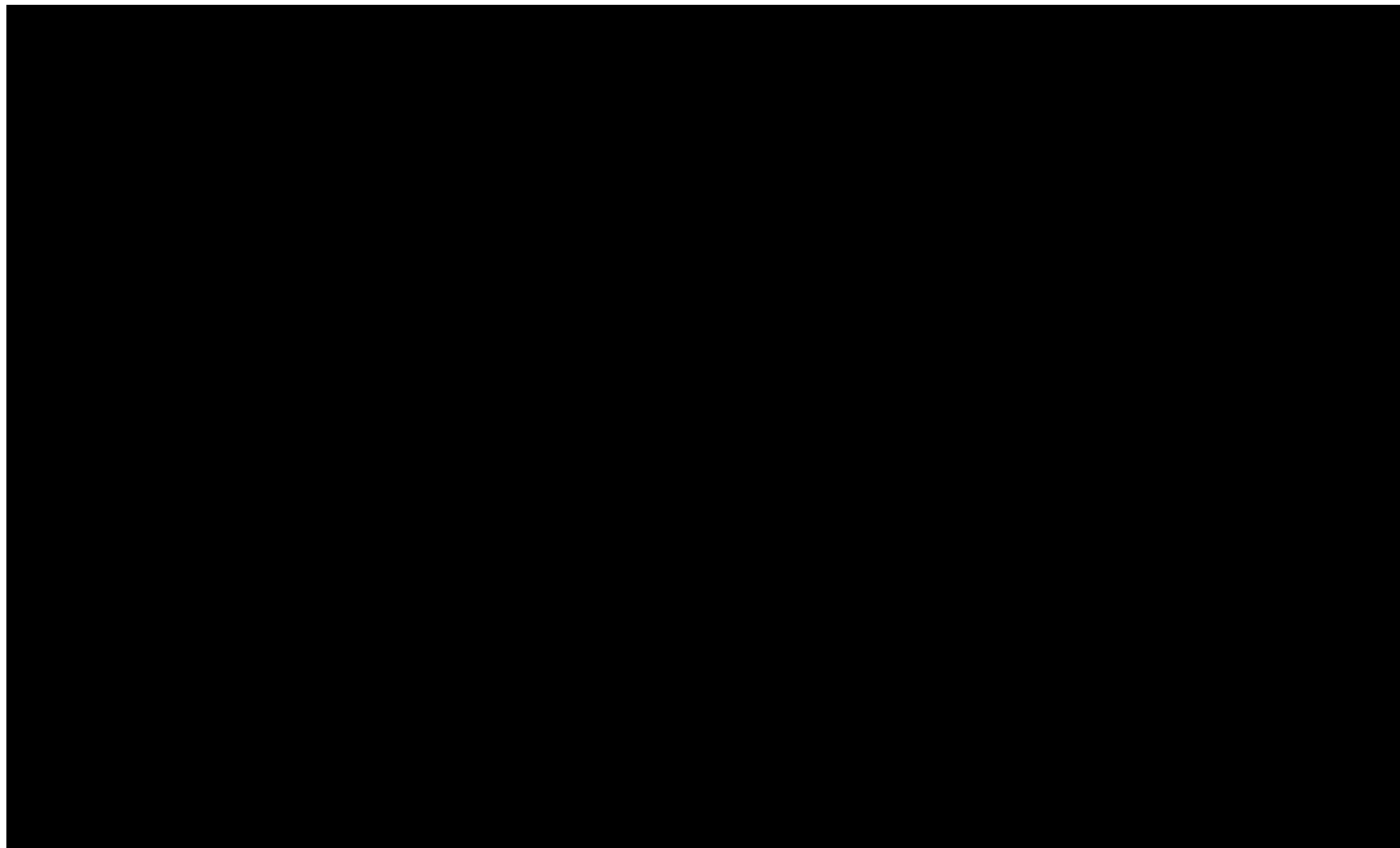


Tabla7: Matriz de lluvias de la estación Pozo Sarmiento.



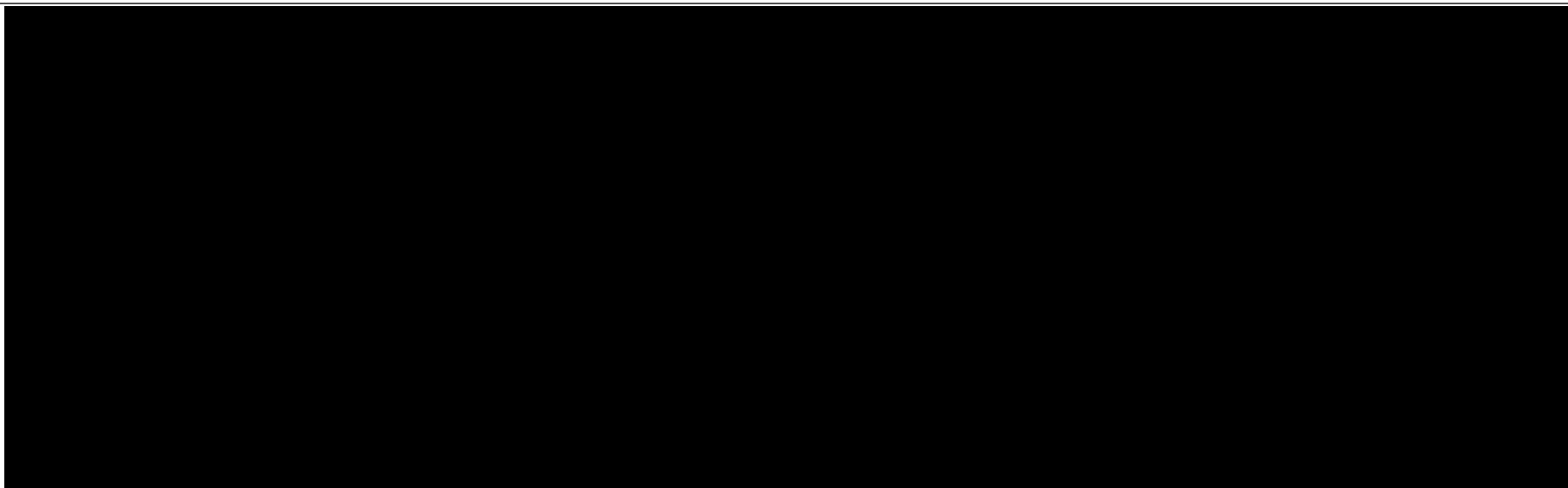


Tabla8: Parte de la planilla de máximos mensuales anuales y de lluvias diarias de la estación Pozo Sarmiento.

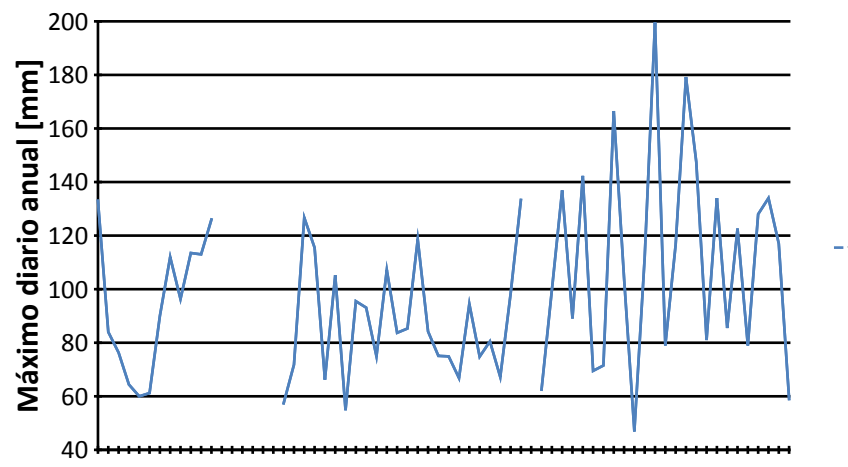


Figura 16: Evolución temporal de los valores maximos anuales de Lluvia diaria para la estación Pozo Sarmiento.

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

---

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.

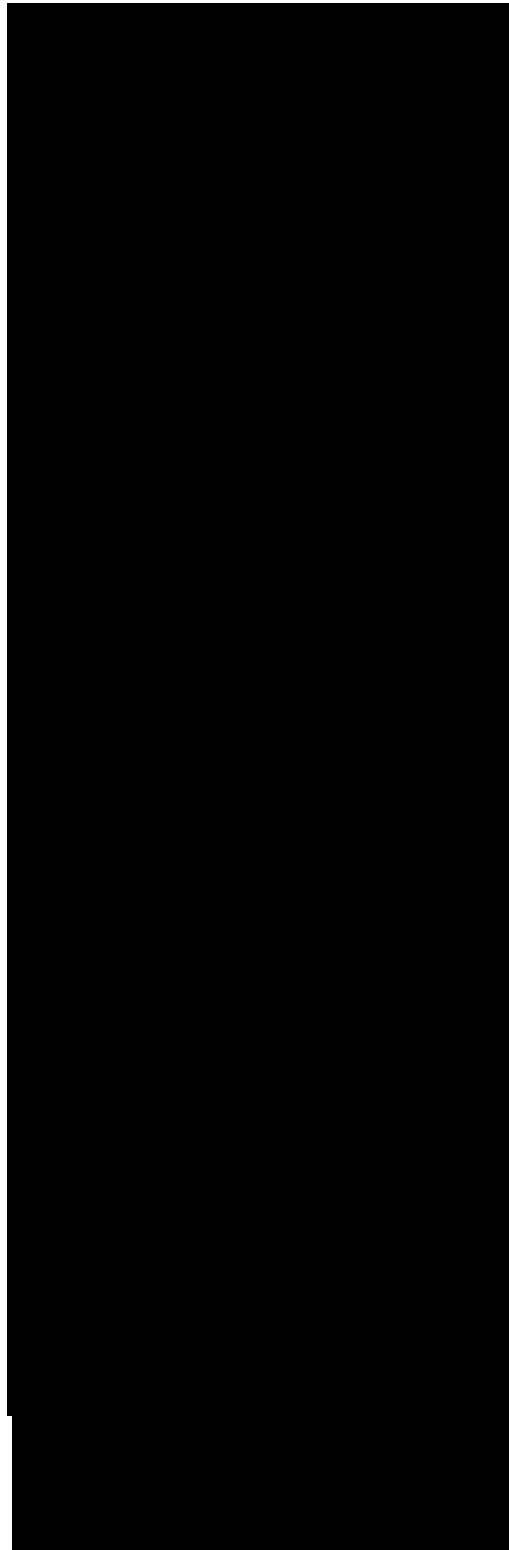


Tabla 9: Planilla resumen de datos pluviométricos.

#### 4.2.2. Prueba 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 2.1.2., permite verificar la existencia de una auto-correlación significativa de primer orden entre las observaciones. En la Figura 17 se muestra el análisis realizado para la estación en cuestión.

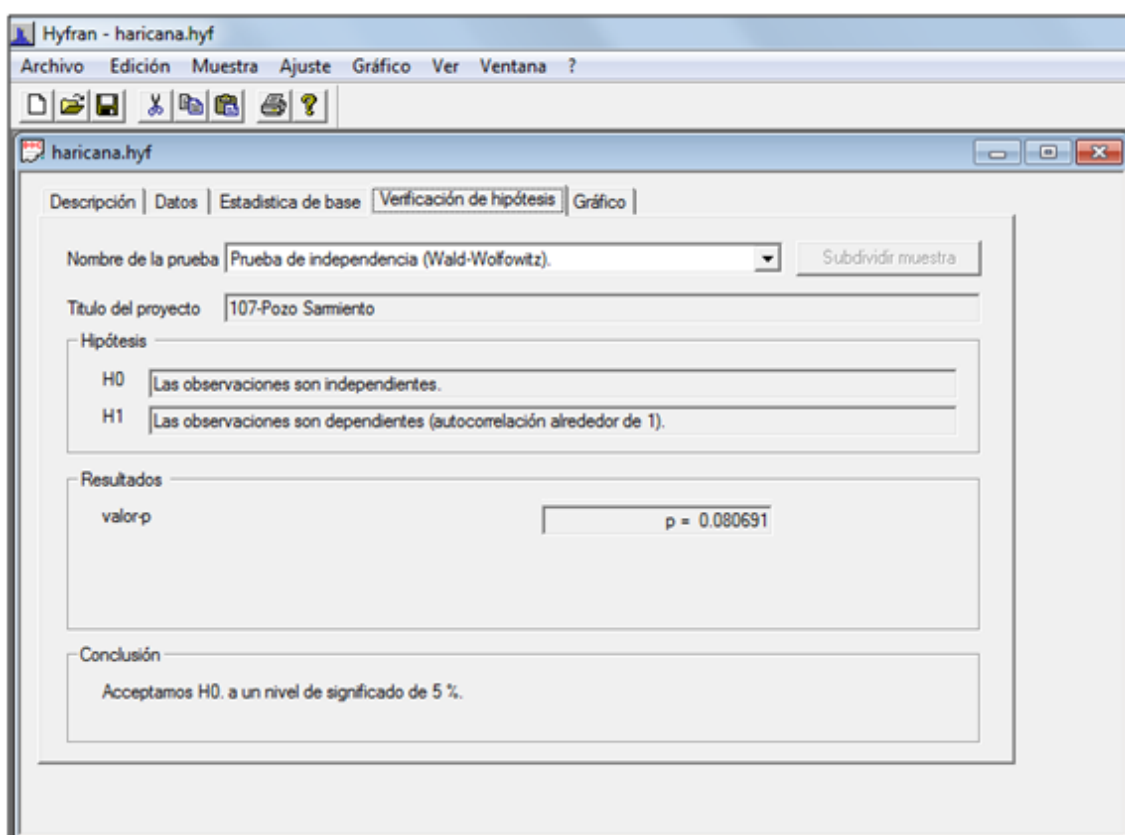


Figura 17: Salida del programa Hyfran para la prueba de independencia de la serie de máximos anuales de lluvia diaria de la estación pozo Sarmiento (código interno 107).

Se puede observar que verifica la prueba de Independencia con un nivel de significancia del 8 %. 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

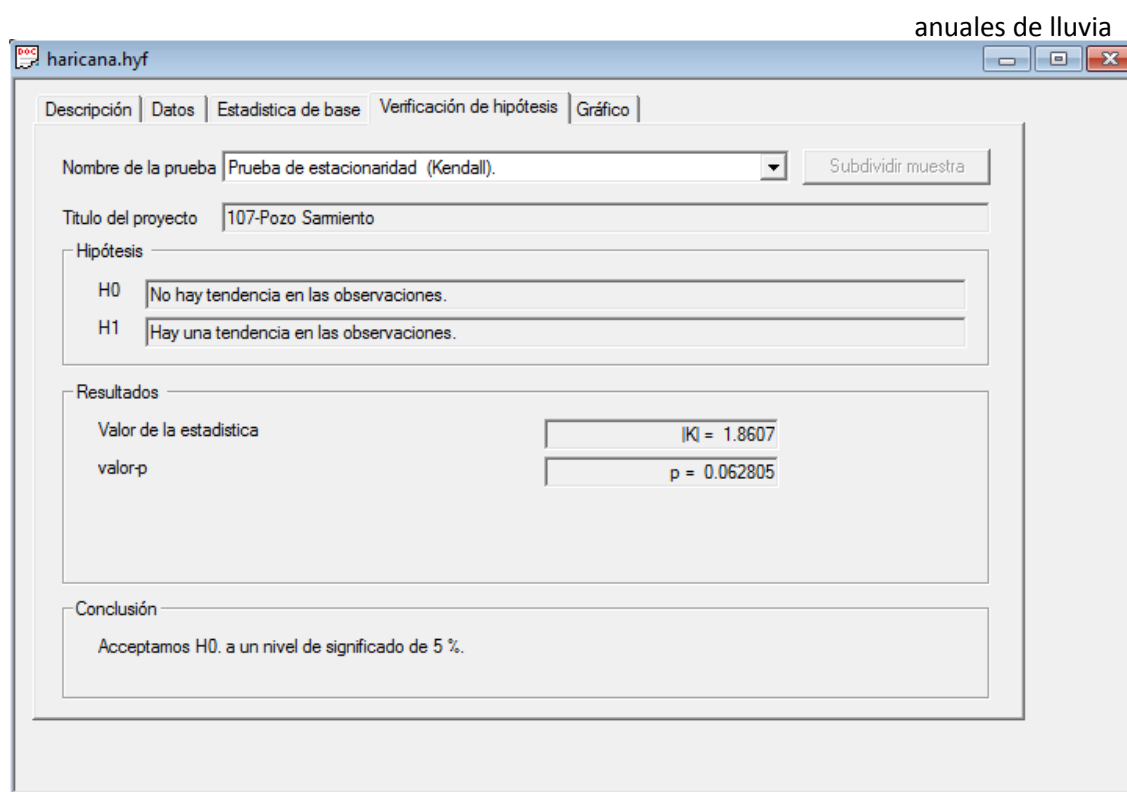
Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

menor sea el valor P, más significativo será el resultado.

### 4.2.3. Prueba de Estacionalidad.

La prueba de estacionalidad de Kendall (detallada en la sección 2.1.3) permite verificar si existe una tendencia importante en la serie. En la Figura 18 se muestra el análisis realizado para la estación en cuestión. Se puede observar que verifica la prueba de Estacionalidad con un nivel de significancia del 6%.

Figura 18: Salida del programa Hyfran para la prueba de estacionalidad de la serie de máximos



sección 2.1.4.) 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 2005 a partir del análisis de la Figura 16.

El primer subgrupo se compone de las observaciones que comienzan con el primer año y terminan con un año de corte, el segundo subgrupo está integrado a partir del año siguiente al año de corte hasta las observaciones finales. Para ejecutar esta prueba, para cada observación se debe especificar el año de corte; en la Figura 19 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 43%.

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

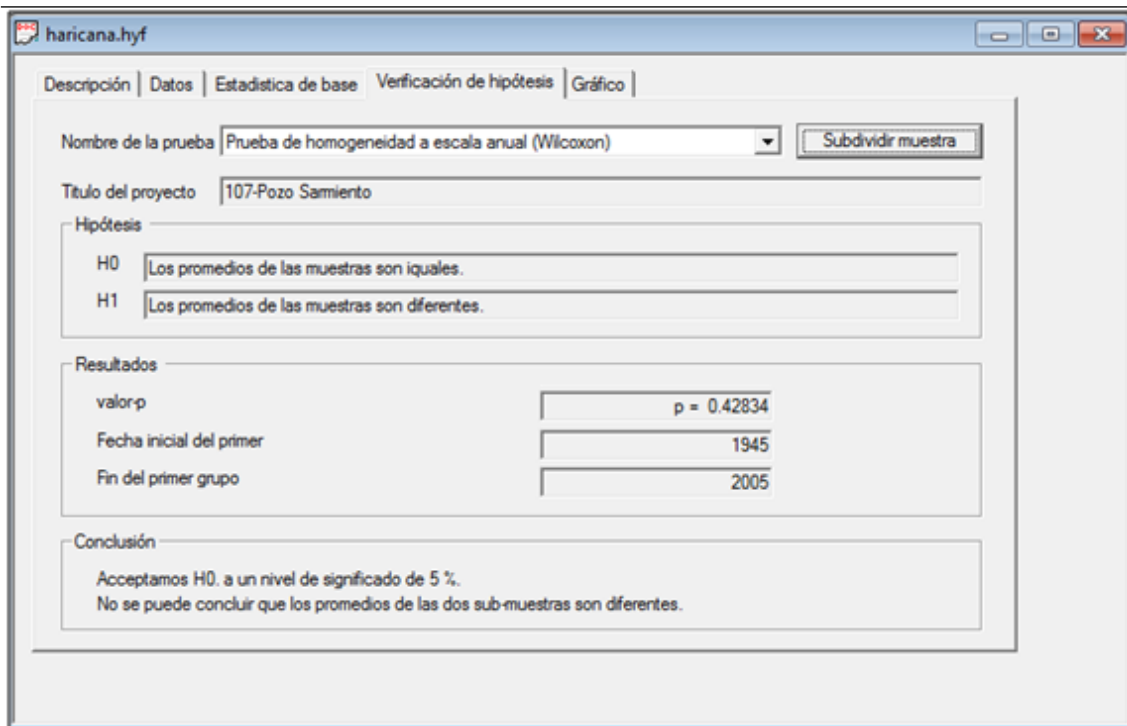


Figura 19: Salida del programa Hyfran para la prueba de homogeneidad a escala anual de la serie de máximos anuales de lluvia diaria de la estación pozo Sarmiento (código interno 107).

### 4.3. Análisis de estadística descriptiva.

Se selecciona la pestaña “Estadística de Base”, la cual no proporciona los datos estadísticos correspondientes a los valores mínimos, máximos, mediana, desvío estándar y coeficientes de asimetría, variación y curtosis (Ver Figura 20).

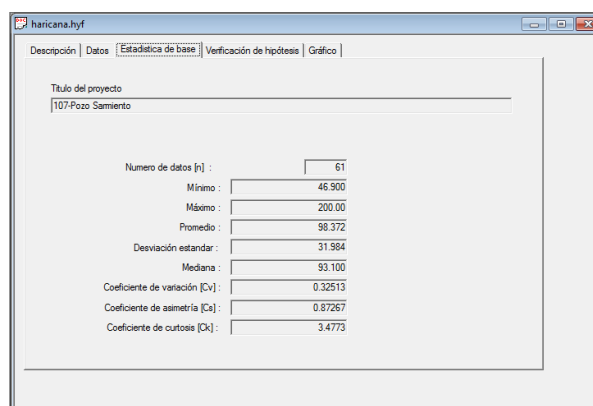


Figura 20: Salida del programa Hyfran para el análisis de estadística descriptiva de la variable Lluvias máximas diarias (Unidades en [mm]).

### 4.4. Análisis de estadística inferencial.

#### 4.4.1. Función de distribución de probabilidad empírica.

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

- a) La pestaña “Descripción” (Ver Figura 21) 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 la unidad y “5” en los números significativos. 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, Probabilidad empírica) se copian y se pegan en la segunda pestaña de la Planilla Modelo construida en Excel, siendo esta, “Hyfran Muestra” (Figura 22 y Tabla 10).

Observación	Identificador	Probabilidad Empírica
133	1945	0.8507
84	1946	0.4328
76.3	1947	0.3433
64.4	1948	0.1642
60	1949	0.1194
61.2	1950	0.1343
90	1951	0.5075
112	1952	0.6866
96.3	1953	0.5821
139.5	1954	0.9164
113	1955	0.7015
220	1956	0.8006
68.4	1957	0.2239
5	1958	0.0748
5.1	1960	0.0149
57.4	1963	0.0896
126.7	1965	0.8209
66.2	1967	0.1791
105.2	1968	0.6418
54.8	1969	0.0597
95.5	1970	0.5672
93.1	1971	0.5373
74.9	1972	0.2985
107.2	1973	0.6567
83.7	1974	0.4179
85.2	1975	0.4627
118.6	1976	0.7761
84.2	1977	0.4478
75.1	1978	0.3284
74.9	1979	0.3134
66.8	1980	0.1940
94.5	1981	0.5522
74.8	1982	0.2836
80.5	1983	0.3881
67.2	1984	0.2090
98.2	1985	0.5970
133.3	1986	0.8657
91.3	1987	0.5224
62.5	1988	0.1493
99.6	1989	0.6119
136.9	1990	0.9104
89.1	1991	0.4925
142.3	1992	0.9254
69.5	1993	0.2388
23	1945	0.8507
84	1946	0.4328
6.3	1947	0.3433
4.4	1948	0.1642
60	1949	0.1194
61.2	1950	0.1343
90	1951	0.5075
112	1952	0.6866
96.3	1953	0.5821
139.5	1954	0.9164
113	1955	0.7015
220	1956	0.8006
68.4	1957	0.2239
5	1958	0.0748
5.1	1960	0.0149
57.4	1963	0.0896
126.7	1965	0.8209
66.2	1967	0.1791
105.2	1968	0.6418
54.8	1969	0.0597
95.5	1970	0.5672
93.1	1971	0.5373
74.9	1972	0.2985
107.2	1973	0.6567
83.7	1974	0.4179
85.2	1975	0.4627
118.6	1976	0.7761
84.2	1977	0.4478
75.1	1978	0.3284
74.9	1979	0.3134
66.8	1980	0.1940
94.5	1981	0.5522
74.8	1982	0.2836
80.5	1983	0.3881
67.2	1984	0.2090
98.2	1985	0.5970
133.3	1986	0.8657
91.3	1987	0.5224
62.5	1988	0.1493
99.6	1989	0.6119
136.9	1990	0.9104
89.1	1991	0.4925
142.3	1992	0.9254
69.5	1993	0.2388
23	1945	0.8507
84	1946	0.4328
6.3	1947	0.3433
4.4	1948	0.1642
60	1949	0.1194
61.2	1950	0.1343
90	1951	0.5075
112	1952	0.6866
96.3	1953	0.5821
139.5	1954	0.9164
113	1955	0.7015
220	1956	0.8006
68.4	1957	0.2239
5	1958	0.0748
5.1	1960	0.0149
57.4	1963	0.0896
126.7	1965	0.8209
66.2	1967	0.1791
105.2	1968	0.6418
54.8	1969	0.0597
95.5	1970	0.5672
93.1	1971	0.5373
74.9	1972	0.2985
107.2	1973	0.6567
83.7	1974	0.4179
85.2	1975	0.4627
118.6	1976	0.7761
84.2	1977	0.4478
75.1	1978	0.3284
74.9	1979	0.3134
66.8	1980	0.1940
94.5	1981	0.5522
74.8	1982	0.2836
80.5	1983	0.3881
67.2	1984	0.2090
98.2	1985	0.5970
133.3	1986	0.8657
91.3	1987	0.5224
62.5	1988	0.1493
99.6	1989	0.6119
136.9	1990	0.9104
89.1	1991	0.4925
142.3	1992	0.9254
69.5	1993	0.2388
23	1945	0.8507
84	1946	0.4328
6.3	1947	0.3433
4.4	1948	0.1642
60	1949	0.1194
61.2	1950	0.1343
90	1951	0.5075
112	1952	0.6866
96.3	1953	0.5821
139.5	1954	0.9164
113	1955	0.7015
220	1956	0.8006
68.4	1957	0.2239
5	1958	0.0748
5.1	1960	0.0149
57.4	1963	0.0896
126.7	1965	0.8209
66.2	1967	0.1791
105.2	1968	0.6418
54.8	1969	0.0597
95.5	1970	0.5672
93.1	1971	0.5373
74.9	1972	0.2985
107.2	1973	0.6567
83.7	1974	0.4179
85.2	1975	0.4627
118.6	1976	0.7761
84.2	1977	0.4478
75.1	1978	0.3284
74.9	1979	0.3134
66.8	1980	0.1940
94.5	1981	0.5522
74.8	1982	0.2836
80.5	1983	0.3881
67.2	1984	0.2090
98.2	1985	0.5970
133.3	1986	0.8657
91.3	1987	0.5224
62.5	1988	0.1493
99.6	1989	0.6119
136.9	1990	0.9104
89.1	1991	0.4925
142.3	1992	0.9254
69.5	1993	0.2388
23	1945	0.8507
84	1946	0.4328
6.3	1947	0.3433
4.4	1948	0.1642
60	1949	0.1194
61.2	1950	0.1343
90	1951	0.5075
112	1952	0.6866
96.3	1953	0.5821
139.5	1954	0.9164
113	1955	0.7015
220	1956	0.8006
68.4	1957	0.2239
5	1958	0.0748
5.1	1960	0.0149
57.4	1963	0.0896
126.7	1965	0.8209
66.2	1967	0.1791
105.2	1968	0.6418
54.8	1969	0.0597
95.5	1970	0.5672
93.1	1971	0.5373
74.9	1972	0.2985
107.2	1973	0.6567
83.7	1974	0.4179
85.2	1975	0.4627
118.6	1976	0.7761
84.2	1977	0.4478
75.1	1978	0.3284
74.9	1979	0.3134
66.8	1980	0.1940
94.5	1981	0.5522
74.8	1982	0.2836
80.5	1983	0.3881
67.2	1984	0.2090
98.2	1985	0.5970
133.3	1986	0.8657
91.3	1987	0.5224
62.5	1988	0.1493
99.6	1989	0.6119
136.9	1990	0.9104
89.1	1991	0.4925
142.3	1992	0.9254
69.5	1993	0.2388
23	1945	0.8507
84	1946	0.4328
6.3	1947	0.3433
4.4	1948	0.1642
60	1949	0.1194
61.2	1950	0.1343
90	1951	0.5075
112	1952	0.6866
96.3	1953	0.5821
139.5	1954	0.9164
113	1955	0.7015
220	1956	0.8006
68.4	1957	0.2239
5	1958	0.0748
5.1	1960	0.0149
57.4	1963	0.0896
126.7	1965	0.8209
66.2	1967	0.1791
105.2	1968	0.6418
54.8	1969	0.0597
95.5	1970	0.5672
93.1	1971	0.5373
74.9	1972	0.2985
107.2	1973	0.6567
83.7	1974	0.4179
85.2	1975	0.4627
118.6	1976	0.7761
84.2	1977	0.4478
75.1	1978	0.3284
74.9	1979	0.3134
66.8	1980	0.1940
94.5	1981	0.5522
74.8	1982	0.2836
80.5	1983	0.3881
67.2	1984	0.2090
98.2	1985	0.5970
133.3	1986	0.8657
91.3	1987	0.5224
62.5	1988	0.1493
99.6	1989	0.6119
136.9	1990	0.9104
89.1	1991	0.4925
142.3	1992	0.9254
69.5	1993	0.2388
23	1945	0.8507
84	1946	0.4328
6.3	1947	0.3433
4.4	1948	0.1642
60	1949	0.1194
61.2	1950	0.1343
90	1951	0.5075
112	1952	0.6866
96.3	1953	0.5821
139.5	1954	0.9164
113	1955	0.7015
220	1956	0.8006
68.4	1957	0.2239
5	1958	0.0748
5.1	1960	0.0149
57.4	1963	0.0896
126.7	1965	0.8209
66.2	1967	0.1791
105.2	1968	0.6418
54.8	1969	0.0597
95.5	1970	0.5672
93.1	1971	0.5373
74.9	1972	0.2985
107.2	1973	0.6567
83.7	1974	0.4179
85.2	1975	0.4627
118.6	1976	0.7761
84.2	1977	0.4478
75.1	1978	0.3284
74.9	1979	0.3134
66.8	1980	0.1940
94.5	1981	0.5522
74.8	1982	0.2836
80.5	1983	0.3881
67.2	1984	0.2090
98.2	1985	0.5970
133.3	1986	0.8657
91.3	1987	0.5224
62.5	1988	0.1493
99.6	1989	0.6119
136.9	1990	0.9104
89.1	1991	0.4925
142.3	1992	0.9254
69.5	1993	0.2388
23	1945	0.8507
84	1946	0.4328
6.3	1947	0.3433
4.4	1948	0.1642
60	1949	0.1194
61.2	1950	0.1343
90	1951	0.5075
112	1952	0.6866
96.3	1953	0.5821
139.5	1954	0.9164
113	1955	0.7015
220	1956	0.8006
68.4	1957	0.2239
5	1958	0.0748
5.1	1960	0.0149
57.4	1963	0.0896
126.7	1965	0.8209
66.2	1967	0.1791
105.2	1968	0.6418
54.8	1969	0.0597
95.5	1970	0.5672
93.1	1971	0.5373
74.9	1972	0.2985
107.2	1973	0.6567
83.7	1974	0.4179
85.2	1975	0.4627
118.6	1976	0.7761
84.2	1977	0.4478
75.1	1978	0.3284
74.9	1979	0.3134
66.8	1980	0.1940
94.5	1981	0.5522
74.8	1982	0.2836
80.5	1983	0.3881
67.2	1984	0.2090
98.2	1985	0.5970
133.3	1986	0.8657
91.3	1987	0.5224
62.5	1988	0.1493
99.6	1989	0.6119
136.9	1990	0.9104
89.1	1991	0.4925
142.3	1992	0.9254
69.5	1993	0.2388
23	1945	0.8507
84	1946	0.4328
6.3	1947	0.3433
4.4	1948	0.1

Las funciones de distribución (y métodos de ajuste ensayados) fueron:

- a) GEV (Método de Max. Verosimilitud).
- b) Gumbel (Método de Max. Verosimilitud).
- c) LogNormal (Método de Max. Verosimilitud).
- d) GEV(Método de Momentos).
- e) Gumbel (Método de Momentos).
- f) 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 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.

Los ajustes 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 Figura23 y Figura24 se demuestra el procedimiento descripto.

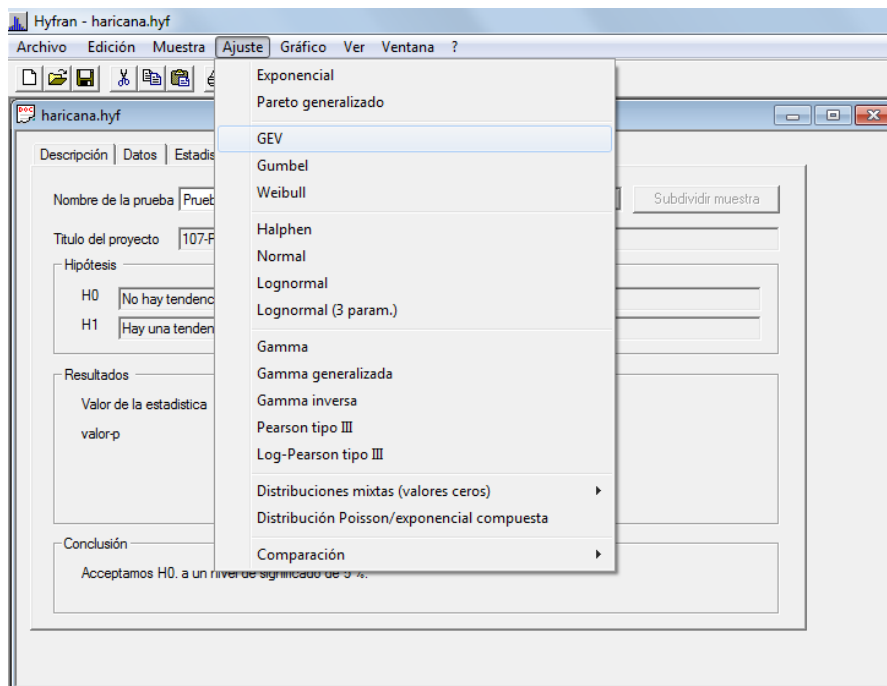


Figura 23: Captura de pantalla donde se indica la selección de la función de distribución de probabilidad.

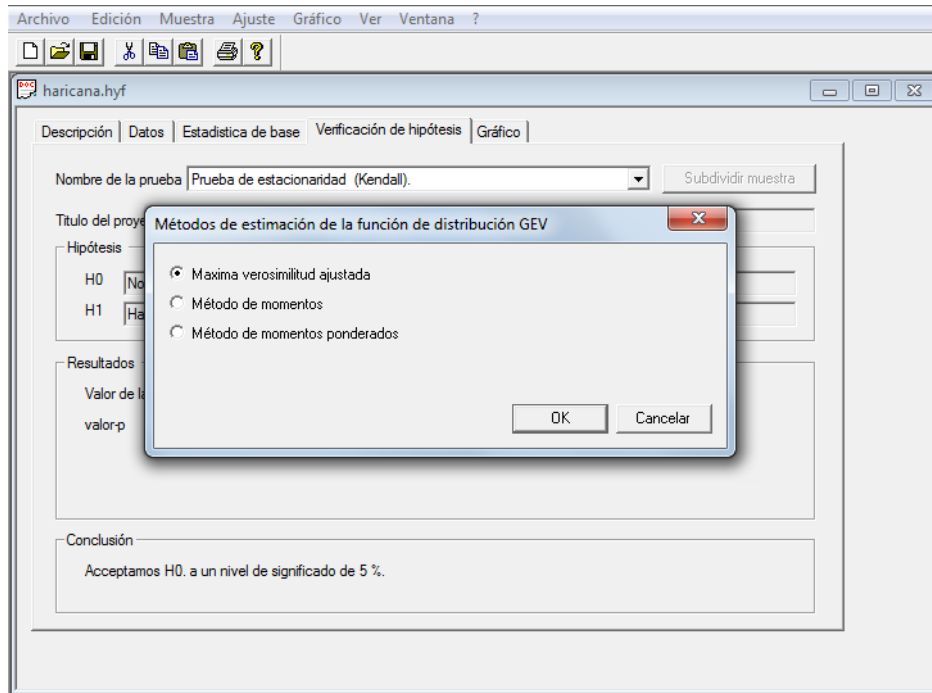


Figura24: Captura de pantalla donde se indica la selección del método de ajuste de los parámetros de la función de distribución de probabilidad.

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 asignó manualmente el periodo de retorno de veinticinco años. Esto se llevaba a cabo seleccionando la pestaña “Otro periodo de regreso” y tipeando el valor a asignar (Figura 25).

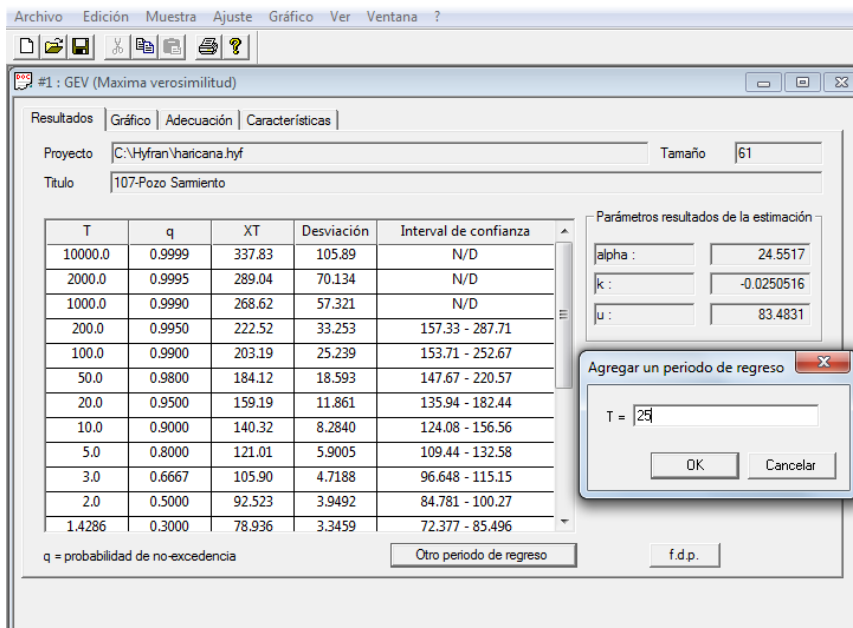


Figura 25: Captura de pantalla donde se indica la inclusión del periodo de retorno T=25 años.



Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

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 26 y Figura 27).

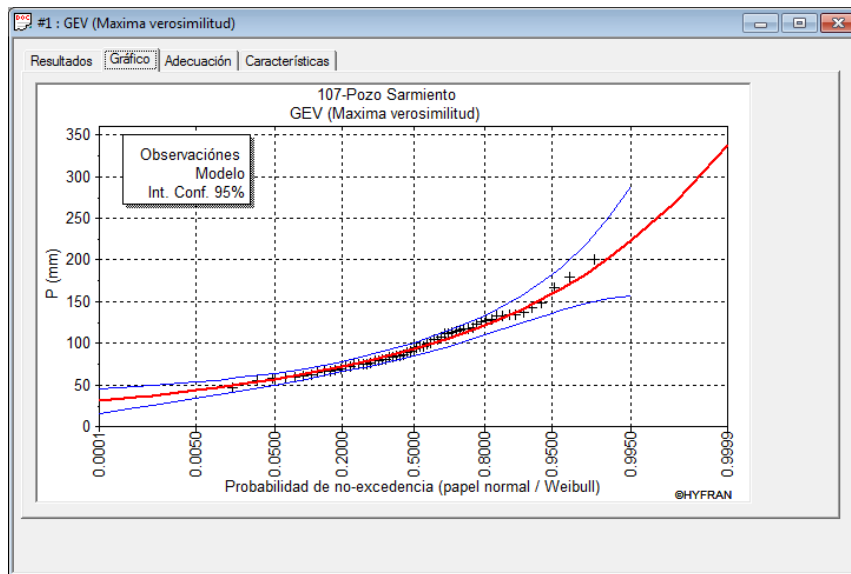


Figura 26: P (mm) vs Probabilidad de no-excedencia (incluyendo intervalos de confianza) estimada con la función de distribución de probabilidad GEV sobre la base de la región de estudio de la estación pozo Sarmiento (código interno 107).

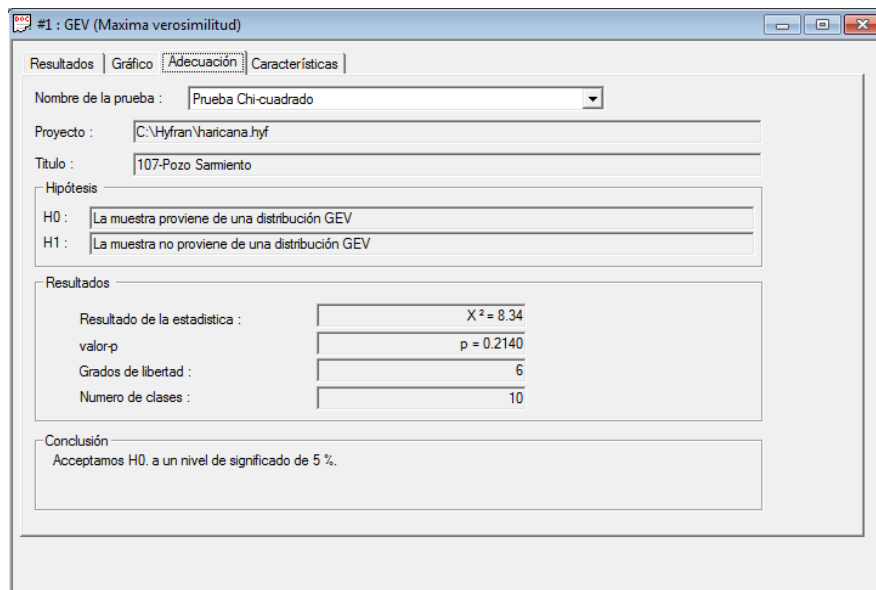


Figura 27: Test de adecuación para la función de distribución de probabilidad GEV sobre la base de la región de estudio de la estación pozo Sarmiento (código interno 107).

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

De la tabla 11 a la 16 se muestran los resultados del análisis inferencial realizado sobre los registros de la estación Pozo Sarmiento con las distintas distribuciones de probabilidades y métodos de estimación de parámetros.

T (años)	q	P (mm)	Desviación estándar (mm)	Intervalo de confianza (95%)	
				Inferior (mm)	Superior (mm)
10000	0,9999	280	72,6	N/D	N/D
2000	0,9995	252	51,2	N/D	N/D
1000	0,999	239	42,9	N/D	N/D
200	0,995	208	26,2	156	259
100	0,99	193	20,3	153	233
50	0,98	178	15,2	148	208
25	0,96	163	11	141	184
20	0,95	157	10	138	177
10	0,9	141	8	126	155
5	0,8	123	6	111	134
3	0,6667	108	5	97,9	117
2	0,5	93,9	4	85,6	102
1	0,3	79,4	4	72,2	86,5
1	0,2	71,6	4	64,6	78,5
1	0,1	61,8	4	54,1	69,4
1	0,05	54,5	5	45,5	63,5
1	0,02	47	6	35,9	58,1
1	0,01	42,4	7	29,6	55,1
1	0,005	38,4	7	24	52,7
1	0,001	30,7	9	13	48,4
1	0,0005	27,9	9,72	9	47
1	0,0001	22	11,2	0,311	44,2
Parámetros					
alpha=	25	k=	0,049279	u=	83
Quintiles					
q = F(X) : probabilidad de no-excedencia					
T = 1/(1-q)					

Tabla11: Estimación de láminas 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 61 años de la estación Pozo Sarmiento (código interno 107).

				Intervalo de confianza (95%)

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

T (años)	q	P (mm)	Desviación estándar (mm)	Inferior (mm)	Superior (mm)
10000	0,9999	313	31,3	252	375
2000	0,9995	273	25,9	222	324
1000	0,999	256	23,6	210	302
200	0,995	216	18,3	180	252
100	0,99	198	16	167	230
50	0,98	181	13,8	154	208
25	0,96	164	11,5	141	186
20	0,95	158	10,8	137	179
10	0,9	140	9	123	157
5	0,8	121	6	109	134
3	0,6667	106	5	97,1	116
2	0,5	93,1	4	85,7	100
1	0,3	79,3	3	72,6	86,1
1	0,2	72,1	4	64,9	79,3
1	0,1	63,2	4	54,9	71,5
1	0,05	56,6	5	47,2	66,1
1	0,02	50	5	39,3	60,7
1	0,01	45,9	6	34,4	57,5
1	0,005	42,5	6	30,1	54,8
1	0,001	35,8	7	22	49,7
1	0,0005	33,5	7	19,1	47,9
1	0,0001	28,7	8	13	44,2
Parámetros					
alpha=	25	u=	83		
Quintiles					
q = F(X) : probabilidad de no-excedencia					
T = 1/(1-q)					

Tabla12: Estimación de láminas 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 61 años de la estación Pozo Sarmiento (código interno 107).

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

T (años)	q	P (mm)	Desviación estándar (mm)	Intervalo de confianza (95%)	
				Inferior (mm)	Superior (mm)
10000	0,9999	283	81,5	N/D	N/D
2000	0,9995	252	55,6	N/D	N/D
1000	0,999	238	45,9	N/D	N/D
200	0,995	206	26,9	153	258
100	0,99	191	20,4	151	231
50	0,98	177	15,1	147	206
25	0,96	161	11	140	183
20	0,95	156	10	137	176
10	0,9	140	7	126	155
5	0,8	123	6	111	134
3	0,6667	108	5	98,4	118
2	0,5	94,1	4	85,7	102
1	0,3	79,4	4	72,2	86,6
1	0,2	71,5	4	64,6	78,5
1	0,1	61,8	4	54,1	69,5
1	0,05	54,6	5	45,6	63,6
1	0,02	47,4	6	36,5	58,3
1	0,01	43,1	6	30,9	55,3
1	0,005	39,5	7	26,1	52,8
1	0,001	32,8	8	17,3	48,3
1	0,0005	30,5	8	14	46,8
1	0,0001	26,1	9	9	43,6
Parámetros					
alpha=	-116	lambda=	262	m=	4
Quintiles					
q = F(X) : probabilidad de no-excedencia					
T = 1/(1-q)					

Tabla 13: Estimación de láminas 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 61 años de la estación Pozo Sarmiento (código interno 107).

				Intervalo de confianza (95%)
--	--	--	--	------------------------------

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

T (años)	q	P (mm)	Desviación estándar (mm)	Inferior (mm)	Superior (mm)
10000	0,9999	336	105	N/D	N/D
2000	0,9995	288	69,7	N/D	N/D
1000	0,999	268	57	N/D	N/D
200	0,995	222	33,1	157	287
100	0,99	203	25,1	154	252
50	0,98	184	18,5	148	220
25	0,96	165	13	139	191
20	0,95	159	12	136	182
10	0,9	140	8	124	156
5	0,8	121	6	109	132
3	0,6667	106	5	96,6	115
2	0,5	92,5	4	84,8	100
1	0,3	78,9	3	72,4	85,5
1	0,2	71,9	3	65,7	78,1
1	0,1	63,2	3	56,9	69,6
1	0,05	56,9	4	50	63,9
1	0,02	50,6	4	42,4	58,7
1	0,01	46,7	5	37,6	55,8
1	0,005	43,4	5	33	53,4
1	0,001	37,2	6	25	49,3
1	0,0005	35	6,61	22	47,9
1	0,0001	31	7,54	15,7	45,2
Parámetros					
alpha=	25	k=	-0,024175	u=	83
Quintiles					
q = F(X) : probabilidad de no-excedencia					
T = 1/(1-q)					

Tabla 14: Estimación de láminas 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 61 años de la estación Pozo Sarmiento (código interno 107).

T (años)	q	P (mm)	Desviación estándar (mm)	Intervalo de confianza (95%)	
				Inferior (mm)	Superior (mm)

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

10000	0,9999	315	24,6	266	363
2000	0,9995	274	20,6	234	315
1000	0,999	257	18,8	220	294
200	0,995	217	14,8	187	246
100	0,99	199	13,1	173	225
50	0,98	182	11,4	159	204
25	0,96	164	9,7	145	183
20	0,95	158	9,15	140	176
10	0,9	140	7	125	155
5	0,8	121	6	110	133
3	0,6667	106	5	97,2	115
2	0,5	92,8	4	85,5	100
1	0,3	79	3	72,6	85,4
1	0,2	71,7	3	65,4	78
1	0,1	62,7	3	56,1	69,4
1	0,05	56,1	4	48,9	63,3
1	0,02	49,4	4	41,5	57,3
1	0,01	45,3	4	36,9	53,7
1	0,005	41,8	5	32,9	50,7
1	0,001	35,2	5	25	45
1	0,0005	32,8	5	23	43
1	0,0001	28	6	17	38,9
Parámetros					
alpha=	25	u=	83		
Quintiles					
q = F(X) : probabilidad de no-excedencia					
T = 1/(1-q)					

Tabla 15: Estimación de láminas 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 61 años de la estación Pozo Sarmiento (código interno 107).

T (años)	q	P (mm)	Desviación estándar (mm)	Intervalo de confianza (95%)	
				Inferior (mm)	Superior (mm)

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

10000	0,9999	302	34,6	235	370
2000	0,9995	264	27,2	211	317
1000	0,999	248	24,2	201	296
200	0,995	211	17,8	176	246
100	0,99	195	15,2	165	225
50	0,98	179	12,8	154	204
25	0,96	163	10,5	142	183
20	0,95	157	9,78	138	176
10	0,9	140	7,67	125	155
5	0,8	122	6	111	133
3	0,6667	107	5	98,3	116
2	0,5	93,6	4	86,2	101
1	0,3	79,3	3	72,6	86
1	0,2	71,8	3	65,2	78,4
1	0,1	62,5	3	55,8	69,2
1	0,05	55,7	3	48,9	62,5
1	0,02	49	4	42,1	55,8
1	0,01	44,9	4	38	51,8
1	0,005	41,5	4	34,7	48,4
1	0,001	35,3	3	28,6	42,1
1	0,0005	33,2	3	26,5	39,9
1	0,0001	29	3	23	35,5
Parámetros					
sigma=	0	m=	4		
Quintiles					
q = F(X) : probabilidad de no-excedencia					
T = 1/(1-q)					

Tabla 16: Estimación de láminas 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 61 años de la estación Pozo Sarmiento (código interno 107).

Para concluir con estas pruebas se realizó un gráfico (Ver Figura 28 y Figura 29) comparativo entre los distintos métodos descritos.

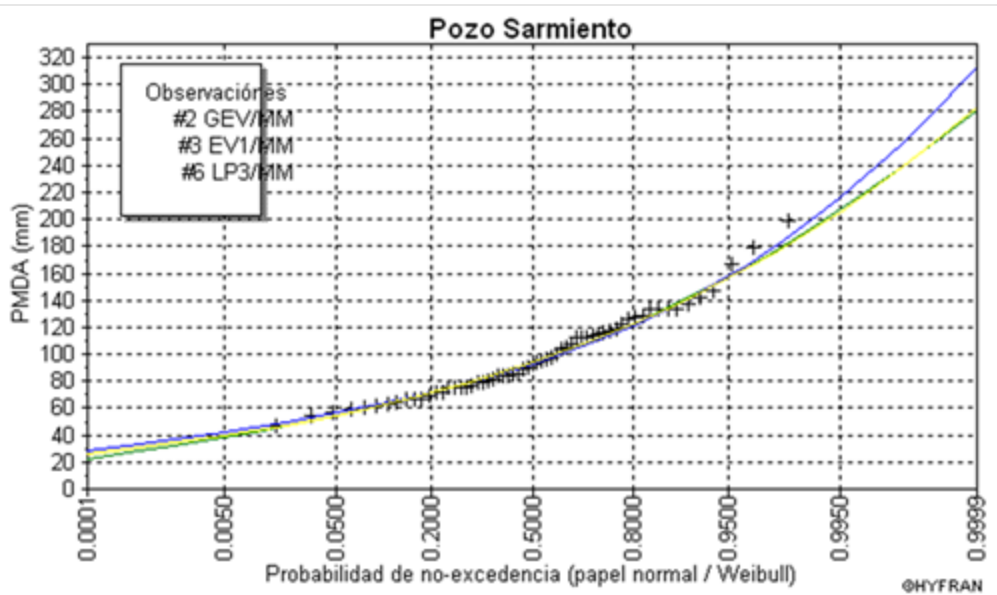


Figura 28: Comparación entre estimaciones realizadas con distintas funciones de distribución de probabilidad y parámetros ajustados con el método de momentos.

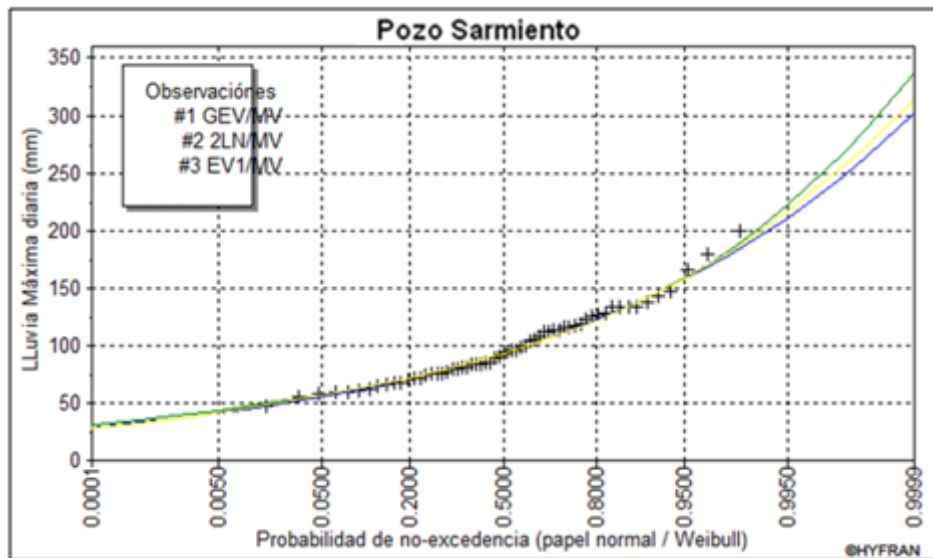


Figura 29: Comparación entre estimaciones realizadas con distintas funciones de distribución de probabilidad y parámetros ajustados con el método de momentos.

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. 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, el límite inferior y el intervalo de confianza de la lámina de lluvia (Ver Figura30). Este aumento de la incertidumbre



Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

el valor extrapolado es debido a la reducida longitud relativa de la serie comparada con el periodo de retorno analizado.

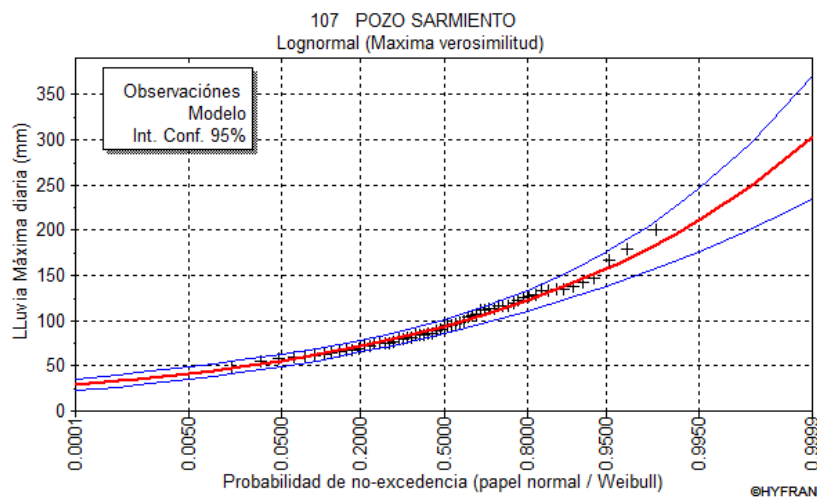


Figura 30: P (mm) vs Probabilidad de no-excedencia (incluyendo intervalos de confianza) estimada con la función de distribución de probabilidad LogNormal sobre la base de la región de estudio de la estación pozo Sarmiento (código interno 107).

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 a 100 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.

Podemos observar en la Figura 26 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 ello, si se adopta un periodo de retorno de 200 años en realidad no es conveniente porque el diseño se haría para un valor esperado para el periodo de retorno de 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.

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

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

Para finalizar el análisis se creó una planilla (Ver Tabla 17) 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.

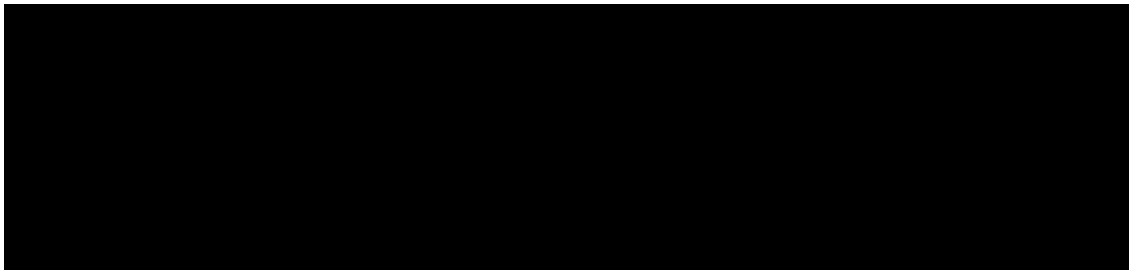


Tabla17: Contraste entre los valores de lluvia máxima estimadas con distintas funciones de distribución y métodos de ajuste.

En la Tabla 18 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	96,1%	99,0%	98,0%	98,5%	100,0%	97,9%
50	97,3%	99,4%	98,4%	98,9%	100,0%	98,9%
25	98,8%	100,0%	99,4%	99,4%	100,0%	98,8%
20	98,7%	100,0%	99,4%	99,4%	100,0%	99,4%
10	100,0%	99,3%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
5	99,2%	99,2%	99,2%	99,2%	100,0%	99,2%

Tabla18: Contraste relativo de los distintos valores estimados con distintas funciones de distribución (con respecto a los valores estimados con la función de distribución LogNormal).

# Capítulo V

Análisis de resultados para el conjunto de estaciones seleccionadas

## 5. Análisis de resultados para el conjunto de estaciones seleccionadas.

### 5.1. Verificación de hipótesis estadísticas en las series de lluvias máximas.

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

Las series de datos pluviométricos de las sesenta y siete estaciones pluviométricas que tenían una longitud de serie acorde a lo descrito en la sección 3.2, fueron sometidas a la detección de datos atípicos. De las setenta y seis estaciones que fueron sometidas a la prueba de datos atípicos solo la estación (Ver tabla 19) El Ceibal ha evidenciado más de dos valores atípicos. Dicha eliminación solo representa el 1,49% de las estaciones que tenían una longitud de serie acorde a lo descrito en la sección 3.2.

Estaciones Pluviométricas	Longitud de serie	Latitud	Longitud
El Ceibal	16	-64,3166	-24,7333

Tabla 19: Estación pluviométrica con más de dos Datos Atípicos.

#### 5.1.2. Prueba de Independencia.

Las sesenta y seis estaciones que verificaron fueron sometidas a la prueba de Independencia (Wald-Wolfowitz). En la Tabla 20 se muestran las estaciones depuradas. Del total de estaciones analizadas una estación no paso la prueba, lo cual constituye el 1,51% del total de estaciones que verificaron datos atípicos.

Estaciones Pluviométricas	Longitud de serie	Latitud	Longitud
Tuc-Tuca	31	-65,2575	-22,4155

Tabla 20: Estación Pluviométrica que no verifico la Prueba de Independencia de sus valores máximos diarios.

#### 5.1.3. Prueba de Estacionalidad.

Las estaciones que verificaron fueron sometidas a la Prueba de Estacionalidad (Kendall). Los registros de las estaciones que se encuentran en la Tabla 21 han rechazado esta prueba. Son tres estaciones las que fueron depuradas, lo cual representa el 4,61% del total de estaciones que pasaron la prueba de Independencia.

Estaciones Pluviométricas	Longitud de serie	Latitud	Longitud
Nazareno	30	-65,1014	-22,5094
Poscaya	29	-65,0797	-22,4550
Peña Alta	21	-65,0000	-23,6500

Tabla 21: Estaciones Pluviométricas que rechazaron la Prueba de Estacionalidad.

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

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

Las estaciones restantes fueron sometidas a la Prueba de Homogeneidad (Wilcoxon) de sus registros históricos. La estación que se menciona en la Tabla 22 no pasó la prueba siendo el 1,61% del total de estaciones que pasaron la prueba de Estacionalidad.

Estaciones Pluviométricas	Longitud de serie	Latitud	Longitud
Peñas Bayas	24	-65,7500	-24,9667

Tabla 22: Estaciones Pluviométricas que rechazaron la Prueba de Homogeneidad.

Finalmente se decidió descartar la estación “129 - Jujuy Aeródromo” debido a que esta presentaba problemas en los registros de lluvia, como ser 6 datos de lluvias que superan los 350 mm, lo cual se considera un registro excesivo. Debido a esta anomalía se decidió prescindir de la estación en cuestión (Ver Tabla 23). Como hay varios datos dudosos (con registro excesivo), estos no son detectados por el test que detecta los datos atípicos. Las estaciones que verificaron las hipótesis estadísticas fueron analizadas estadísticamente y los resultados de este análisis se detallan a continuación.

Estaciones Pluviométricas	Longitud de serie	Latitud	Longitud
Jujuy Aeródromo	37	-63,4980	-22,3660

Tabla 23: Estación que mostraba datos dudosos.

De esta manera podemos observar en la Tabla 24 que de las 102 estaciones pluviométricas de las cuales se partió este trabajo, solo 60 pasaron las pruebas representando estas el 59% del total.

Estaciones Pluviométricas	102
Estaciones que verifican las pruebas	60
Porcentaje	59%

Tabla 24: Porcentaje de estaciones que verificaron las pruebas.

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”. Se puede observar en la Figura 31 que para longitudes de serie que oscilan entre 14 y 30 años se ve que la máxima diferencia de algunos valores estimados con otras funciones de distribución con respecto a la LogNormal disminuye a medida que aumenta la longitud de registro.

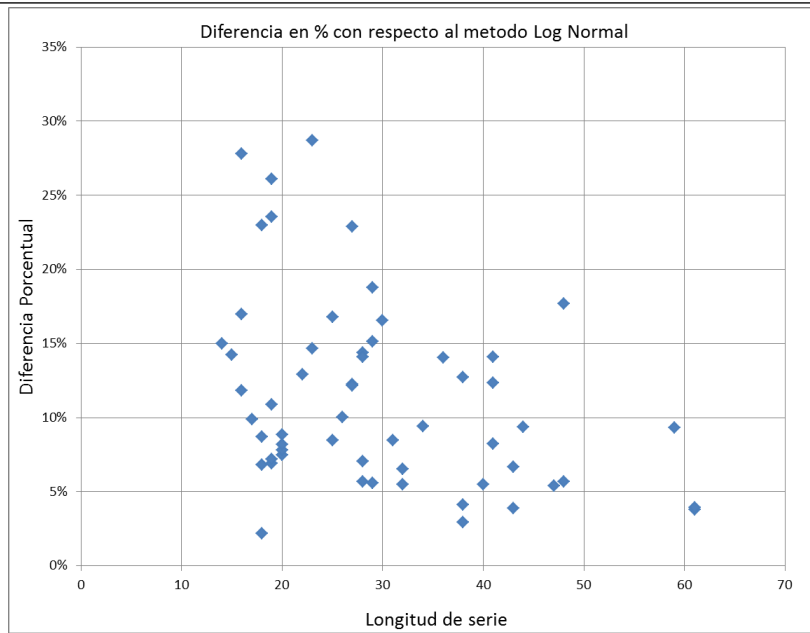


Figura 31: Evolución de la máxima diferencia porcentual entre los valores estimados con la distribución LogNormal y alguna función de distribución a medida que aumenta la longitud de la serie.

Para 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 31 con los intervalos de confianza. En la Figura 32 se puede ver el análisis realizado.

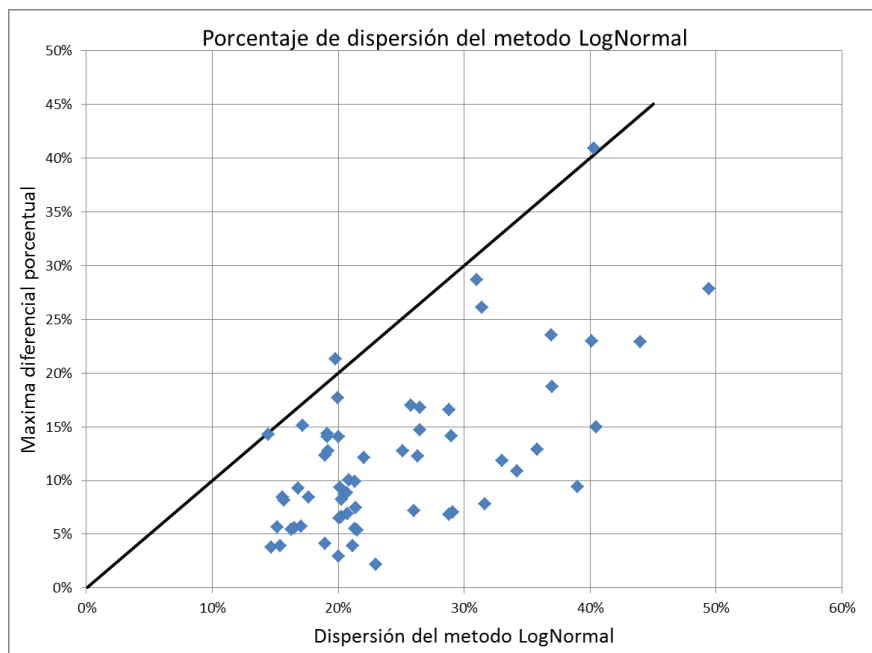


Figura 32: Análisis de dispersión del método LogNormal.

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

En la Figura 33 se puede observar la distribución espacial de las estaciones que pasaron las pruebas.

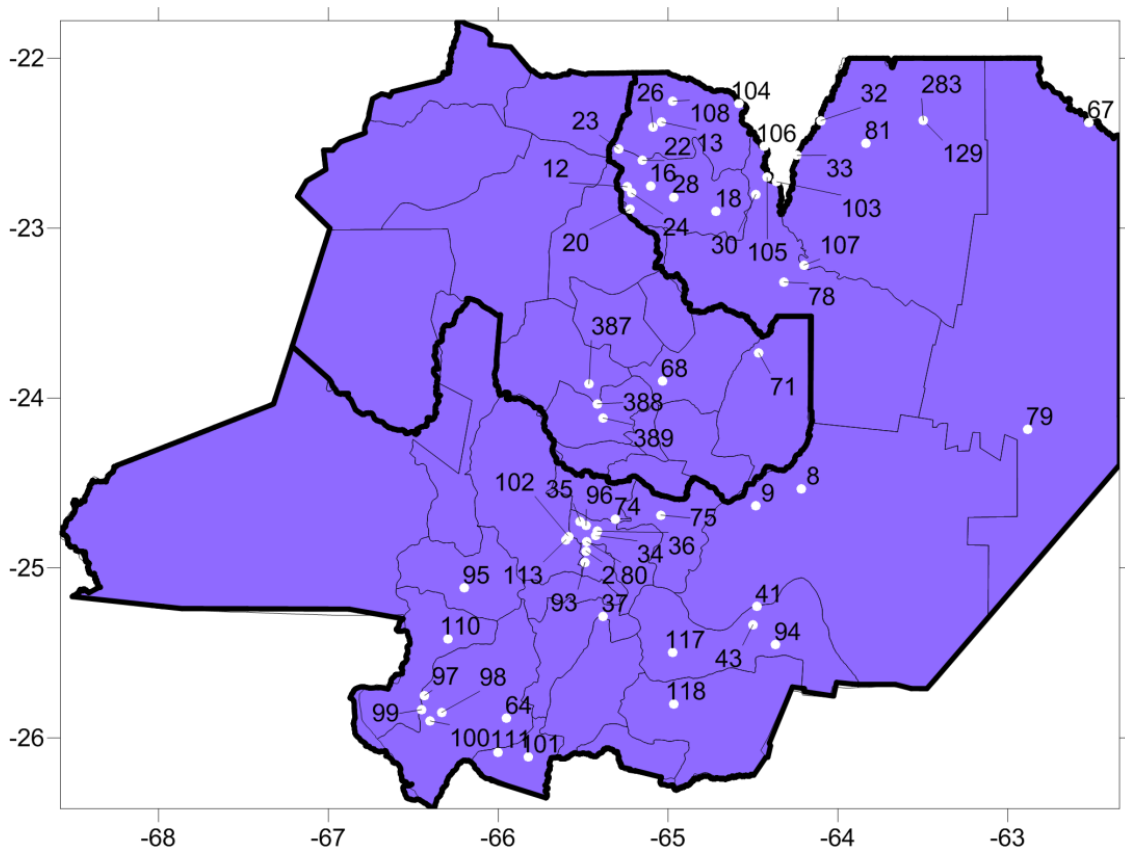


Figura 33: Estaciones finalmente seleccionadas.

### 5.2. Análisis de estadística descriptiva.

Se conformó 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 25). Además, en la misma se describe su nombre y código interno.

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

A large black rectangular area representing a redacted table. The table content is completely obscured by a solid black fill.

Tabla 25: Datos de estadística descriptiva de las estaciones finalmente seleccionadas.



Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

---

### **5.3. Análisis de estadística inferencial.**

Se conformó 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 26). Además, en la misma se describe su nombre y código interno.

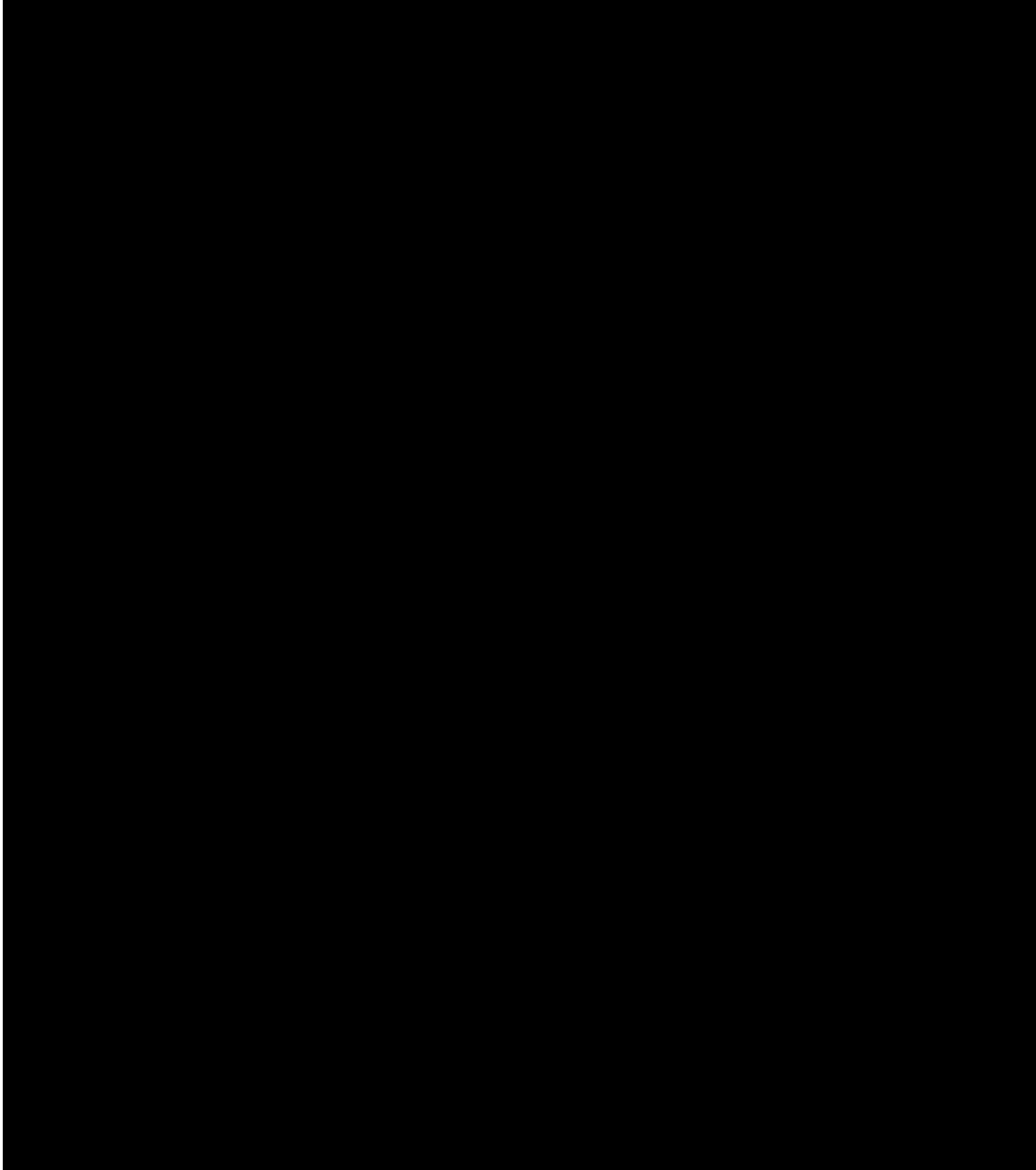


Tabla 26: Valores de distribución de probabilidad empírica para las estaciones finalmente seleccionadas.

# Capítulo VI

## 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 IdrisiSelva, el cual permite generar un archivo vectorial o de tipo rastergeoreferenciado.

### **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. A modo de ejemplo se presenta una versión reducida en la Tabla 27.
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 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.

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

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 Figura34.Finalmente, se debe guardar con la opción Save del menú File.

Cod. Interno	ID Org.	Nombre de la estación	Provincia	Serie	Máximo
2	1	INTA - Cerrillos	Salta	43	153,5
8	2	Dorado - San Felipe	Salta	16	167
9	3	Seco - San Fernando	Salta	16	138,4
12	4	San Isidro	Salta	30	45
13	5	Bermejo - Trigo Huayco	Salta	28	57
16	6	Iruya - Las Higueras	Salta	30	55
18	7	Iruya - San José	Salta	33	214
20	8	Iruya - Colanzuli - Salta	Salta	22	34,5
22	9	Iruya - El Molino - Salta	Salta	30	50
23	10	Iruya - El Pabellón - Salta	Salta	29	48
24	11	Iruya - Iruya - Salta	Salta	31	42
26	12	Iruya - Paltorco - Salta	Salta	29	70,5
28	13	Iruya - San Antonio - Salta	Salta	31	102,5
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
389	58	Yala	Jujuy	29	155

Tabla 27: Tabla para importar en el programa IDRISI.

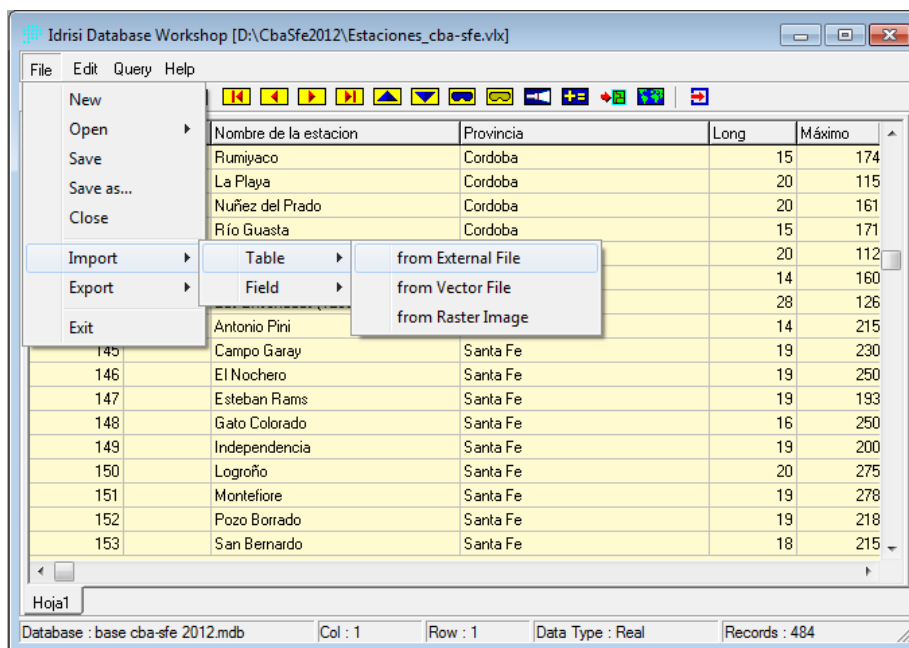


Figura 34: Cuadro de diálogo DatabaseWorkshop – Import.

### 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 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 35.

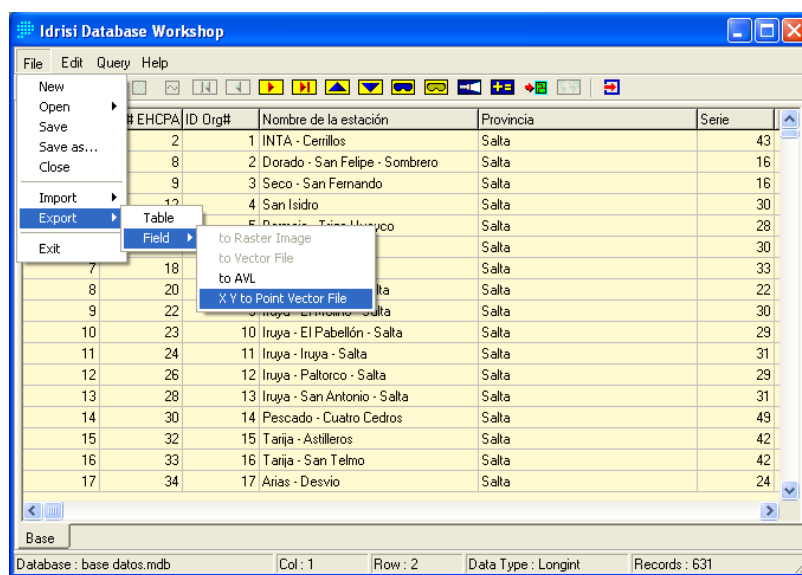


Figura35: Cuadro de Diálogo Database Workshop - Export.

3. Luego se debe abrir el cuadro de diálogo Export Vector File como se muestra en la Figura 36. 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.

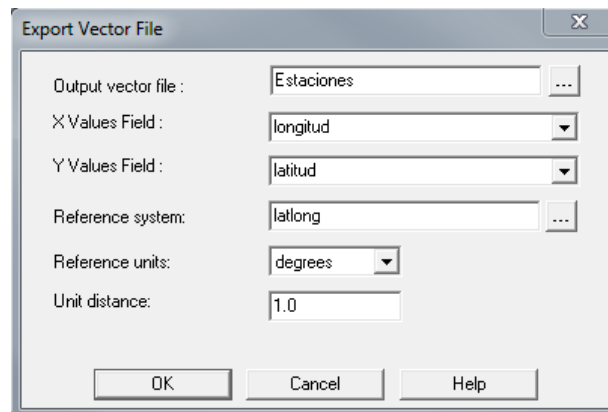



Figura 36: Cuadro de Diálogo Export Vector File.

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 37.

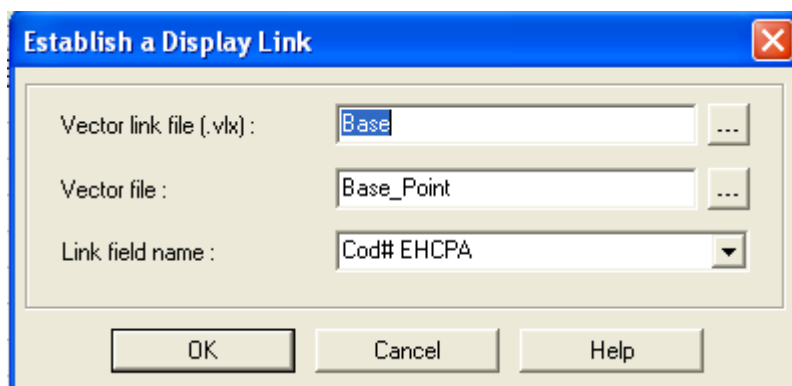


Figura 37: Cuadro de Diálogo de Establish a Display Link.

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.

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

- Desde el cuadro DatabaseWorkshop se ejecuta la opción Createldrisi Vector File. Aparecerá en pantalla una nueva ventana Export Vector File que se debe completar de la siguiente manera, según la Figura 38.

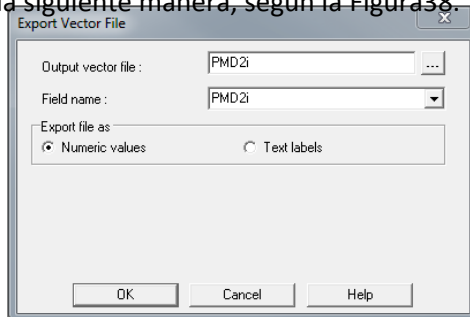


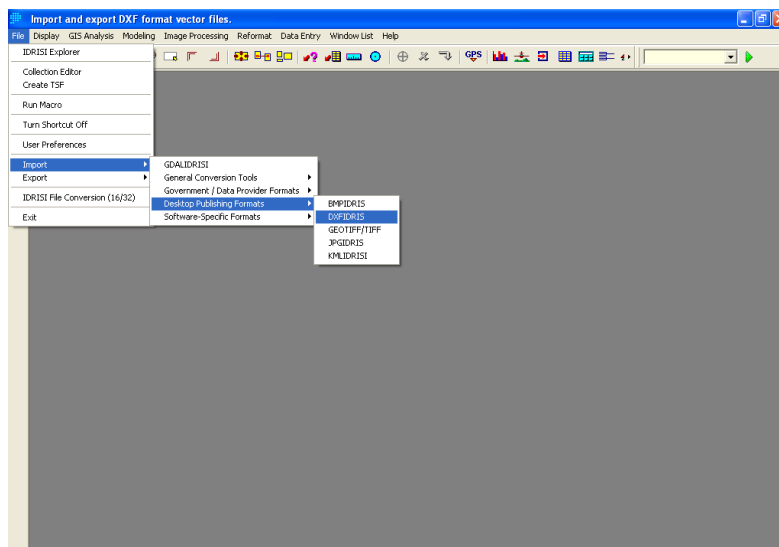
Figura 38: Cuadro de Diálogo Export Vector File.

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.

#### 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:

- 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”.
- Importo el archivo dxf a IDRISI, a través de la función “file”, “Import”, “Desktop publishingformats”, “DXFIDRISI” (Ver Figura 39 y Figura 40).



Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

Figura 39: Cuadro de dialogo ImportDxf IDRISI.



Figura40: 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.

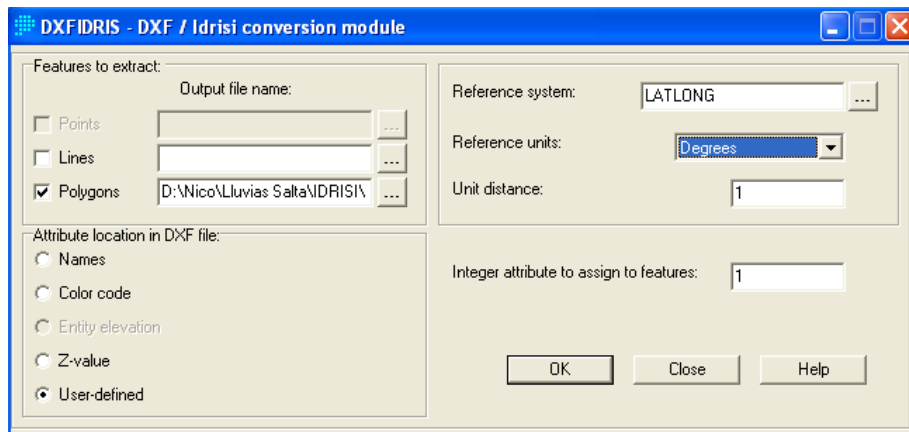


Figura 41: Cuadro de dialogo DXF / Idrisi conversión module.

- 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 Figura43).

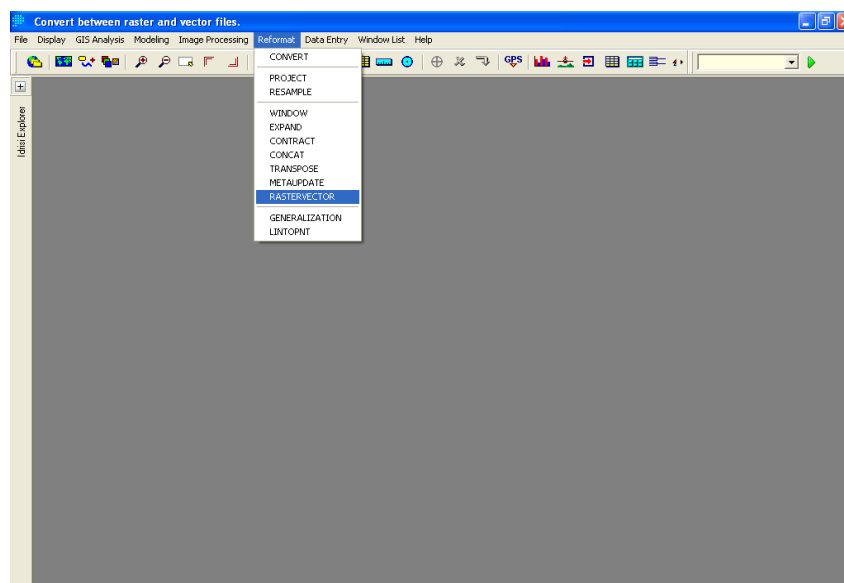




Figura42: Cuadro de diálogo RASTERVECTOR.

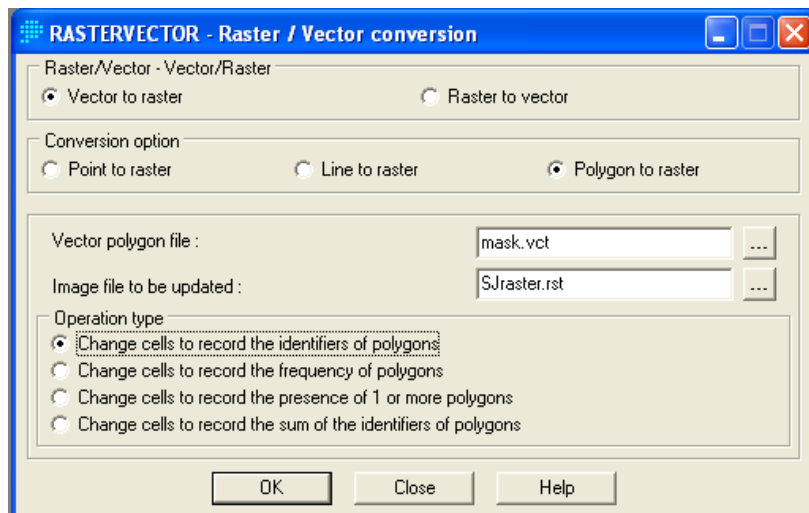


Figura43: Cuadro de dialogo Raster / Vector conversión.

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

- e) Por último, en la Figura 44, se muestra el formato de salida de la máscara utilizada para las provincias de Salta y Jujuy; donde se excluye del análisis la región donde no se recopilieron datos pluviométricos.

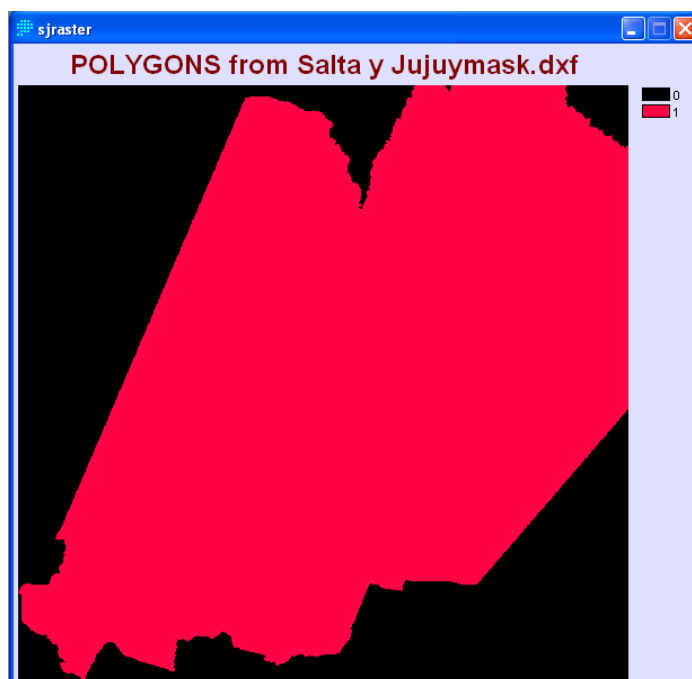


Figura 44: Mascara utilizada para las Provincias de Salta y Jujuy.

### 6.5. Método de interpolación de Kriging.

El submenú Kriging conduce a tres interfases. 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 interfase ModelingFitting (Ajuste de la Modelación), se definen modelos matemáticos para describir las relaciones de covarianza entre los datos de muestra. Por último, en la interfase Kriging 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 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

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

---

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 Surface Analysis, 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).

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

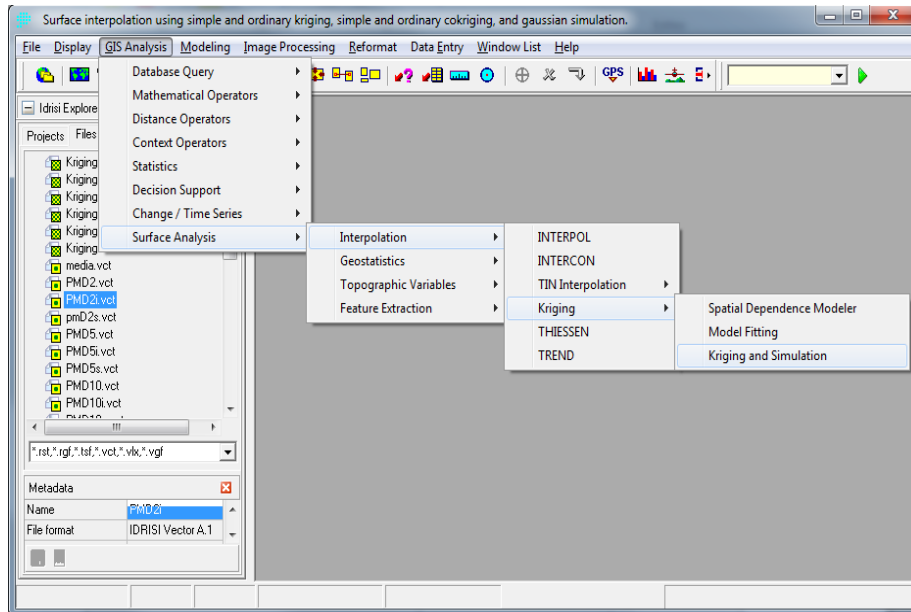


Figura45: Secuencia para abrir el método de interpolación Kriging and Simulation.

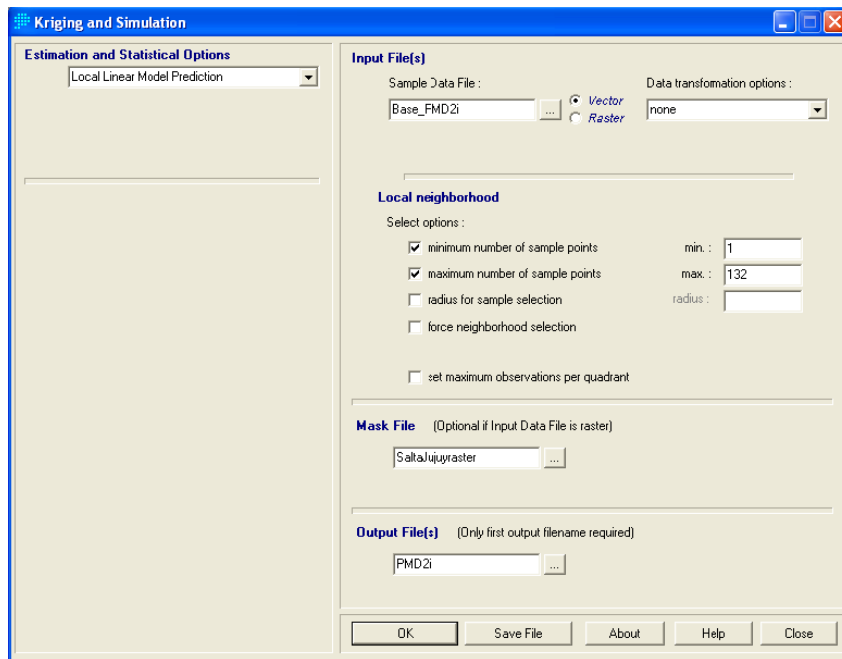


Figura 46: Cuadro de Diálogo Kriging and Simulation.

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

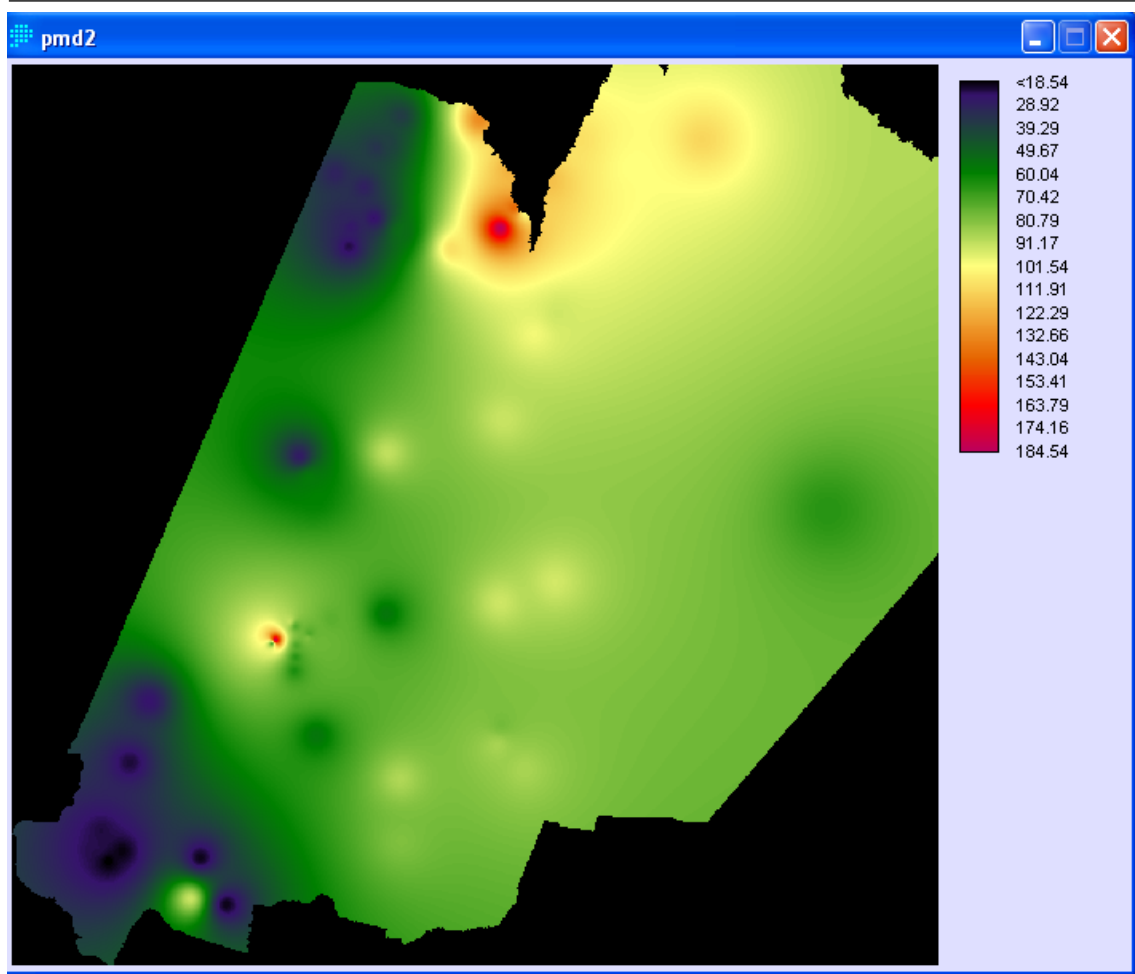


Figura 47: Raster interpolado por el método Kriging.

### 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

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

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). El archivo de salida se muestra en la Figura 51.

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

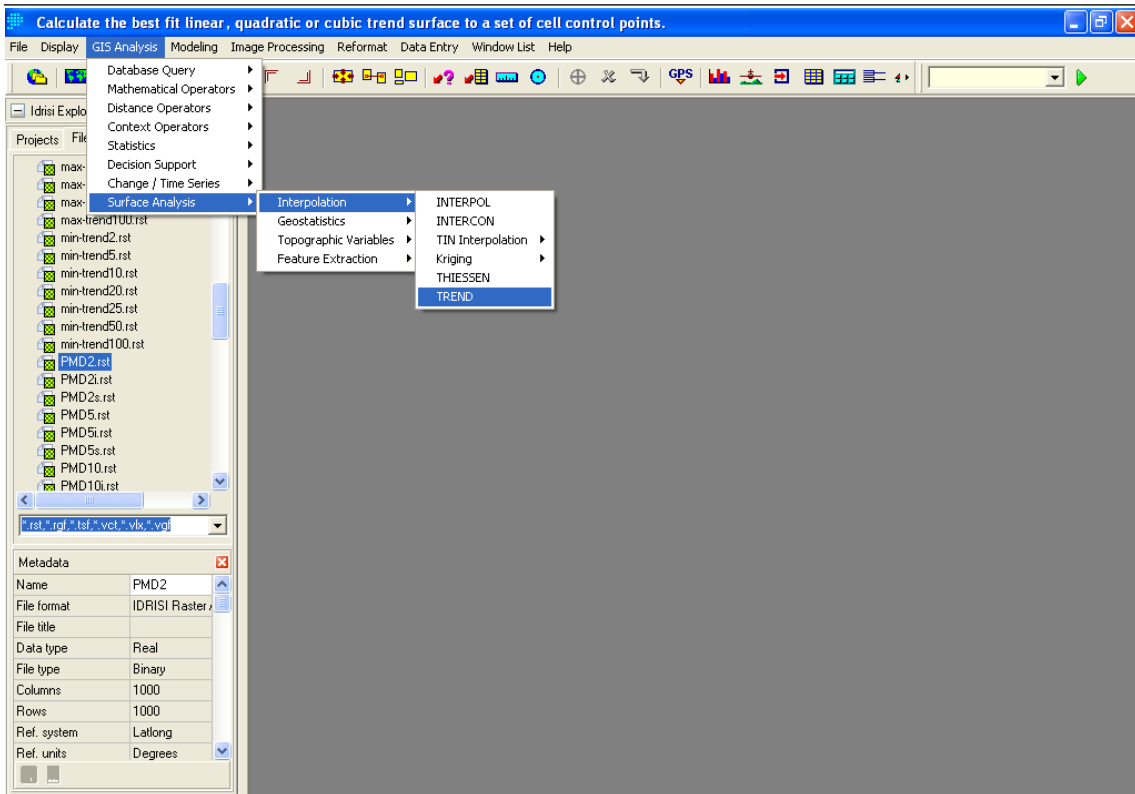


Figura 48: Secuencia para abrir el método de interpolación Trend.

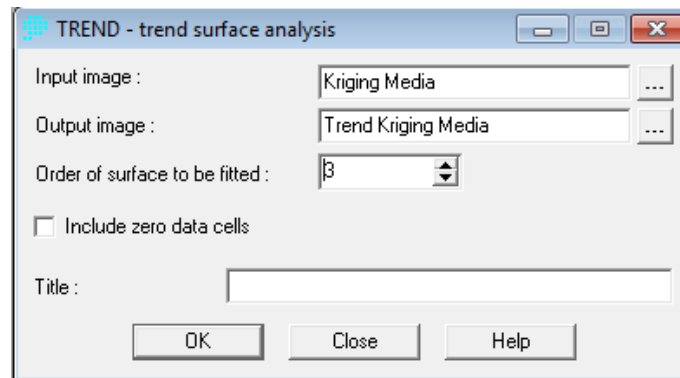


Figura 49: Cuadro de diálogo del método de interpolación Trend.

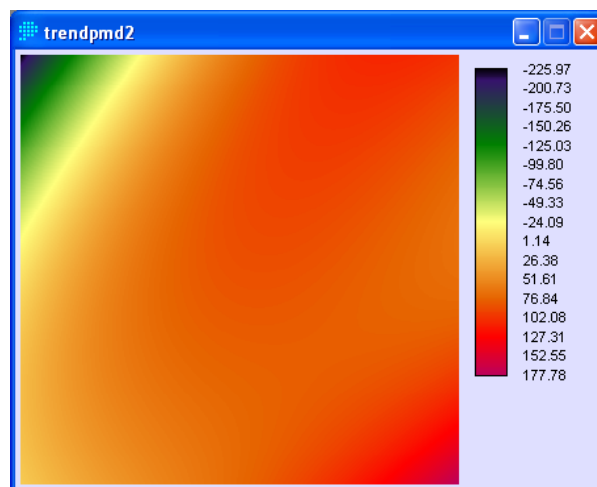


Figura50: Superficie tendencial. Regresión Lineal. T = 2 Años.

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

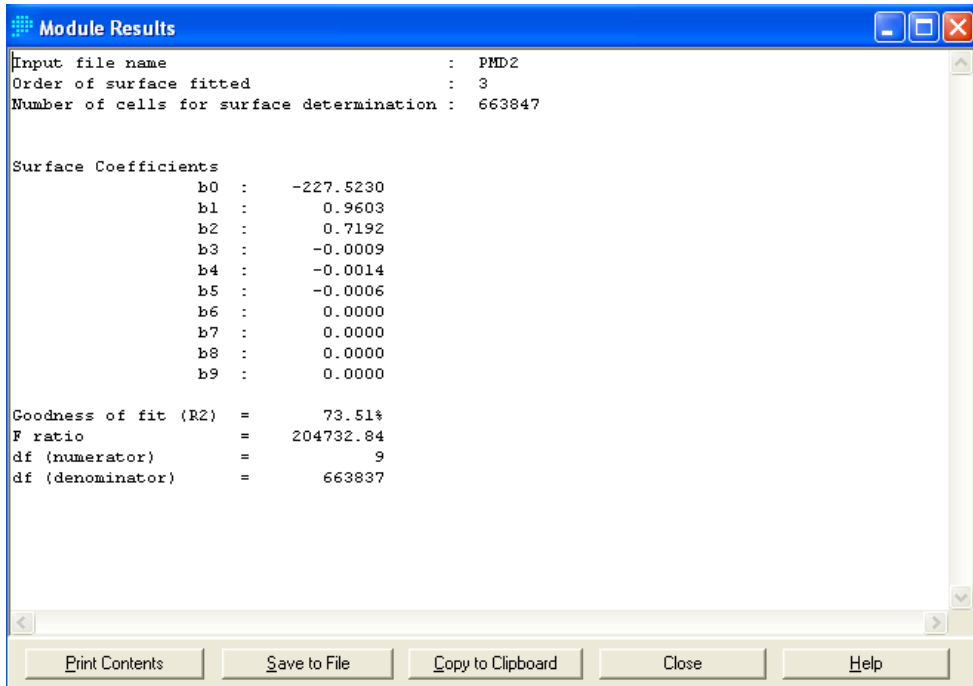


Figura51: Archivo de salida del módulo “Trend”.

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 Córdoba y Santa Fe. Esta función puede aparecer tanto en el menú GIS “Analysis - DatabaseQuery” como en el menú GIS “Analysis – MathematicalOperators”. La primera de las formas se muestra en la Figura 52.

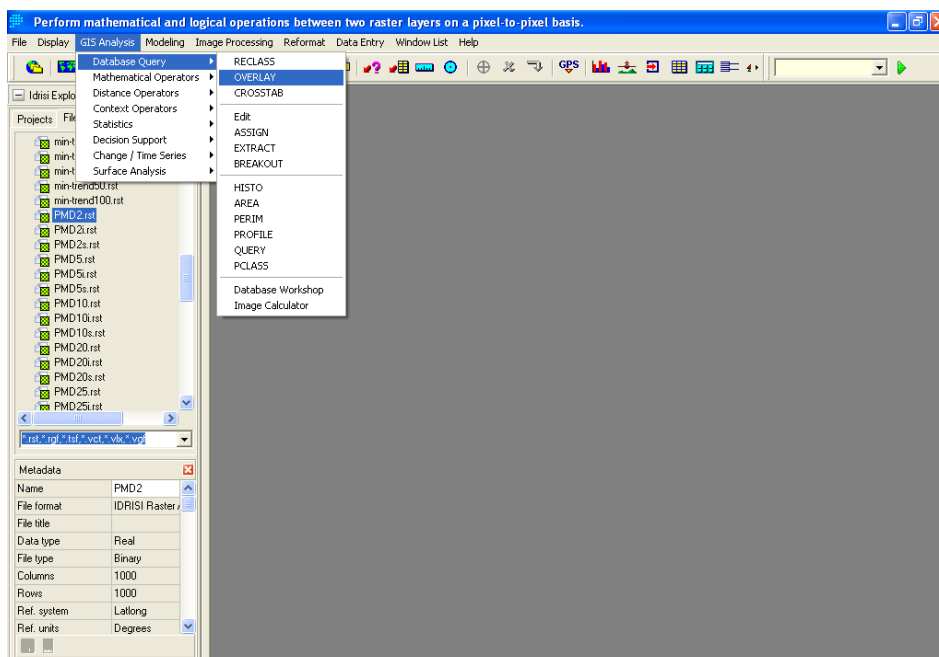


Figura52: Secuencia para abrir la función “Overlay”.



Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

Los pasos a seguir se muestran en la Figura 53:

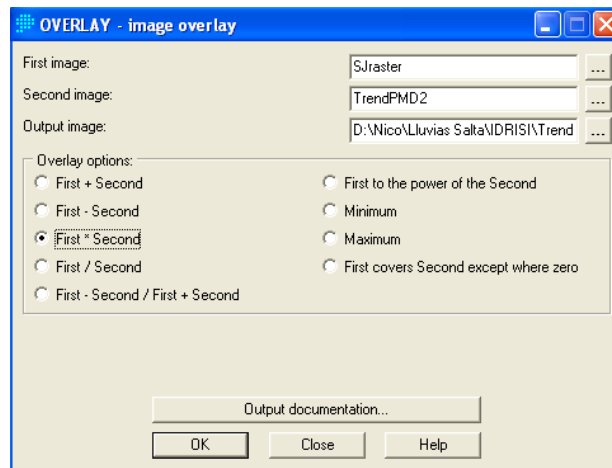


Figura53: Cuadro de diálogo de la función Overlay.

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

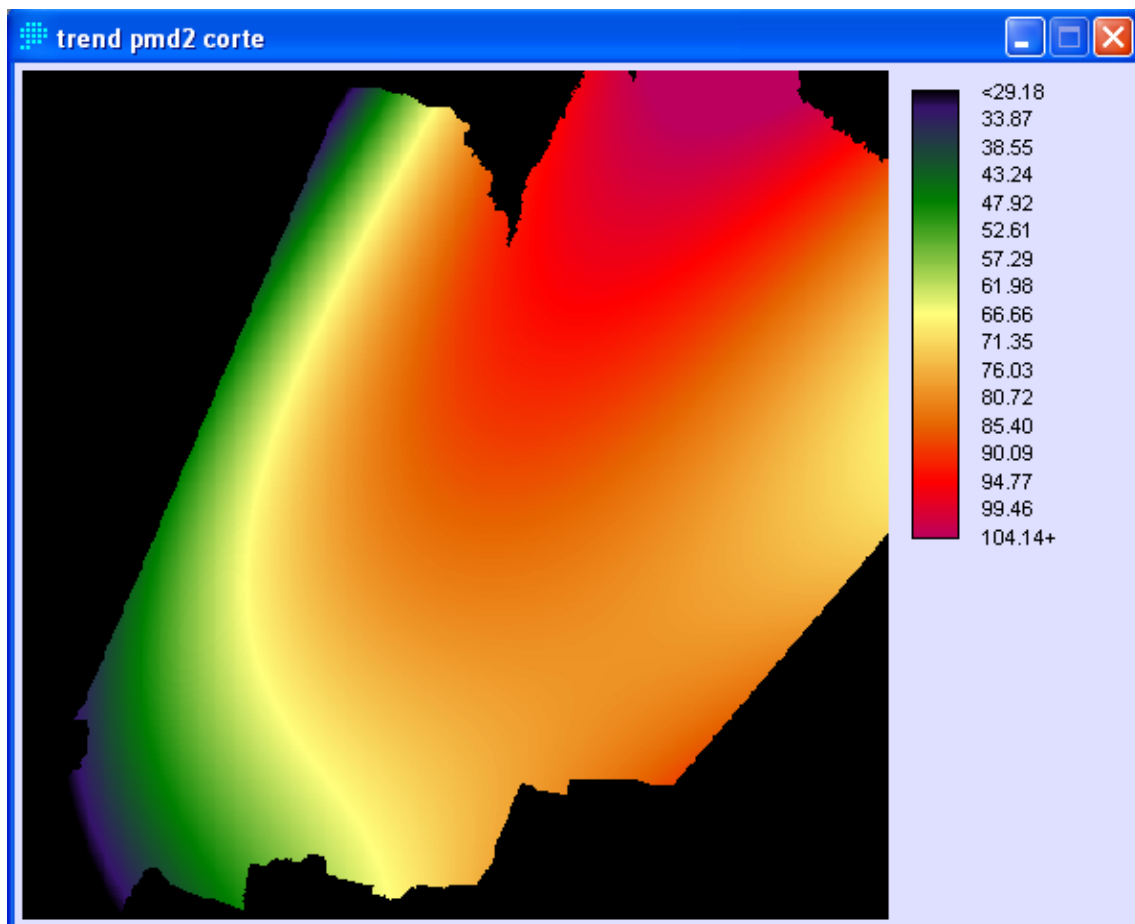


Figura54: Grilla interpolado por el método Trend. T = 10 Años Media de las series históricas de las lluvias máximas diarias anuales.

### 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 lámina 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

- 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

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 “MathematicalOperators” (Ver Figura 55). Se presenta a modo de ejemplo un archivo raster obtenido (Figura 56).

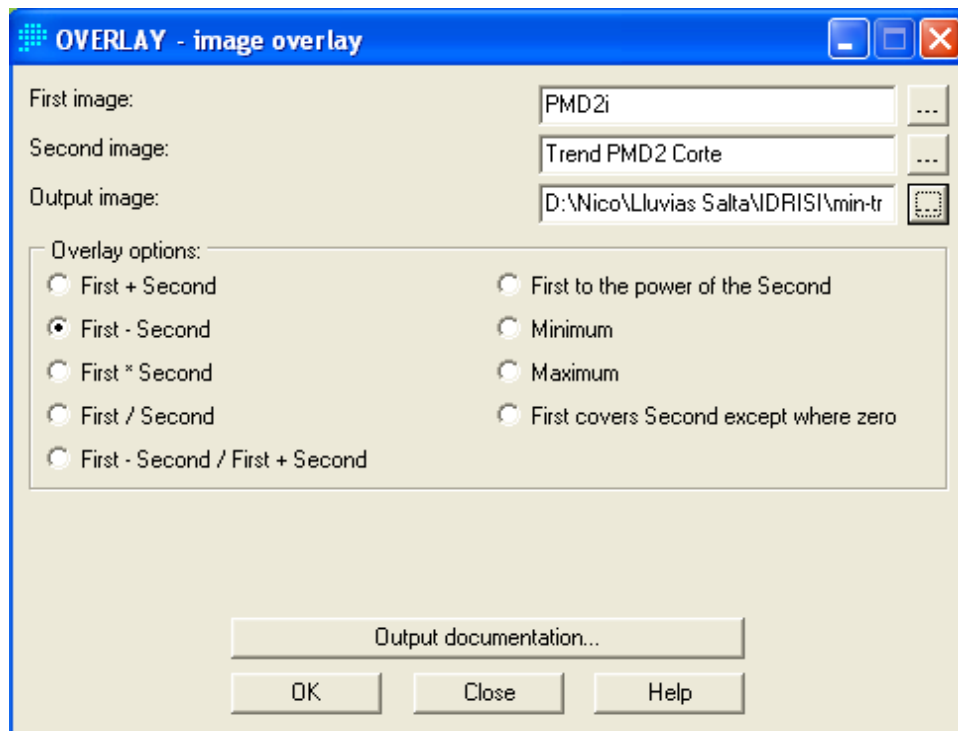


Figura 55: Cuadro de dialogo de la función Overlay

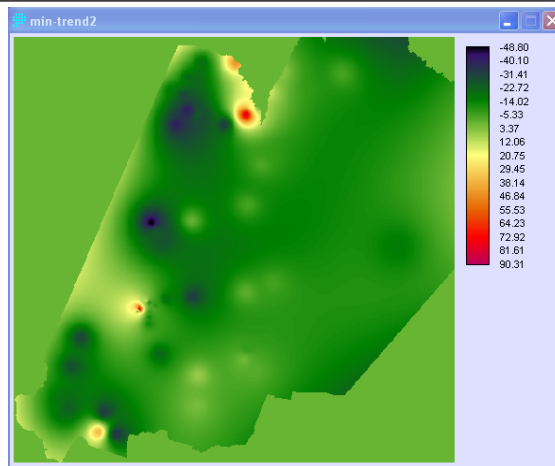


Figura 56: Diferencia entre “Kriging” (valores mínimos) y “Trend” (regresión lineal). T = 2 Años.

Para poder visualizar la cantidad de valores que se encuentran fuera del intervalo de confianza se recurrirá 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 57).

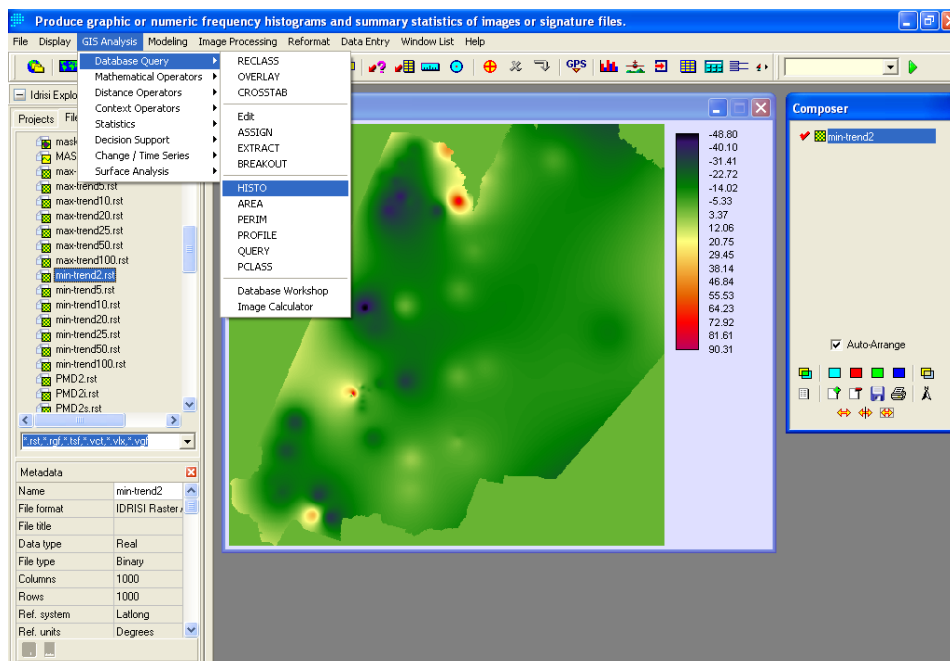


Figura 57: Secuencia para abrir la función Histo.

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

El cuadro de diálogo de Figura 58 se deberá completar 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.

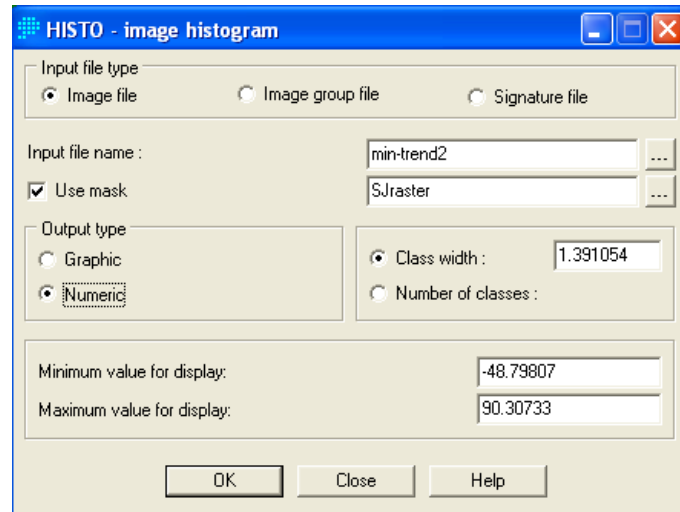


Figura 58: Cuadro de diálogo de la función Histo.

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 59) 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 59: Histograma de frecuencias. Producción numérica.

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

El histograma de frecuencias gráfico (Ver Figura 60) obtenido es:

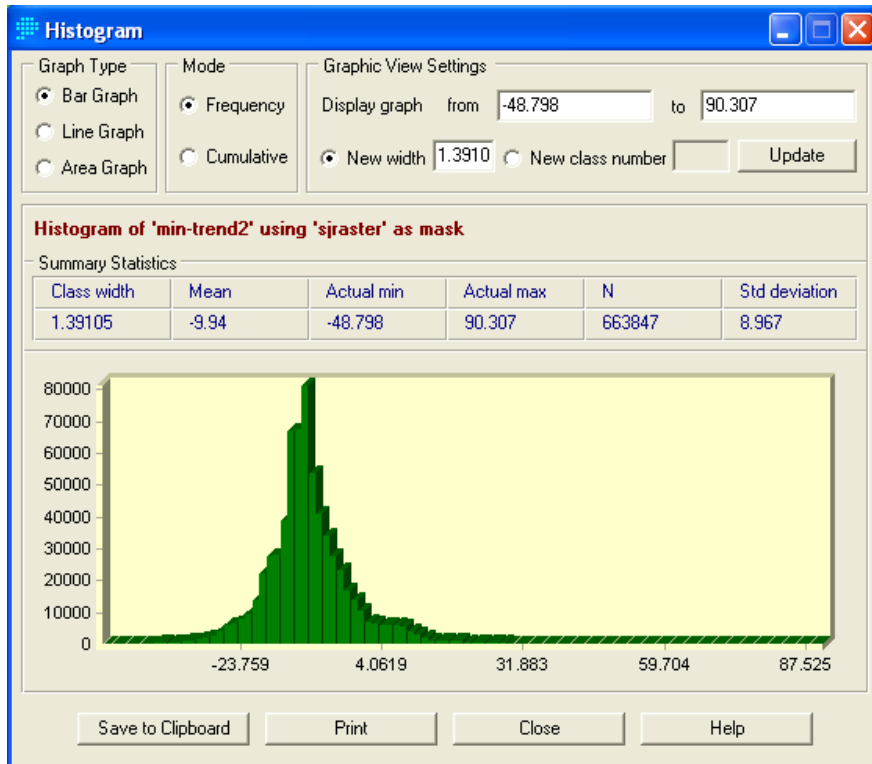


Figura 60: Histograma de frecuencias. Producción gráfica.

De la Tabla 28 a la 34 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	8,50%
Mínimo - Medio	5,60%

Tabla 28: Porcentaje de valores fuera del intervalo para  $T = 2$  Años.

	Cúbica
Máximo - Medio	9,30%
Mínimo - Medio	3,60%

Tabla 29: Porcentaje de valores fuera del intervalo para  $T = 5$  Años.

	Cúbica
Máximo - Medio	6,00%
Mínimo - Medio	4,40%

Tabla 30: Porcentaje de valores fuera del intervalo para  $T = 10$  Años.

	Cúbica
Máximo - Medio	5,00%

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

<b>Mínimo - Medio</b>	2,70%
-----------------------	-------

Tabla 31: Porcentaje de valores fuera del intervalo para  $T = 20$  Años.

	<b>Cúbica</b>
<b>Máximo - Medio</b>	4,80%
<b>Mínimo - Medio</b>	2,50%

Tabla 32: Porcentaje de valores fuera del intervalo para  $T = 25$  Años.

	<b>Cúbica</b>
<b>Máximo - Medio</b>	4,00%
<b>Mínimo - Medio</b>	2,20%

Tabla 33: Porcentaje de valores fuera del intervalo para  $T = 50$  Años.

	<b>Cúbica</b>
<b>Máximo - Medio</b>	4,10%
<b>Mínimo - Medio</b>	1,60%

Tabla 34: Porcentaje de valores fuera del intervalo para  $T = 100$  Años.

A medida que el periodo de retorno aumenta hay más diferencia entre los límites superiores e inferiores de los intervalos de confianza, por lo que la superficie tendencial queda inserta entre los intervalos (Ver Figura 61).

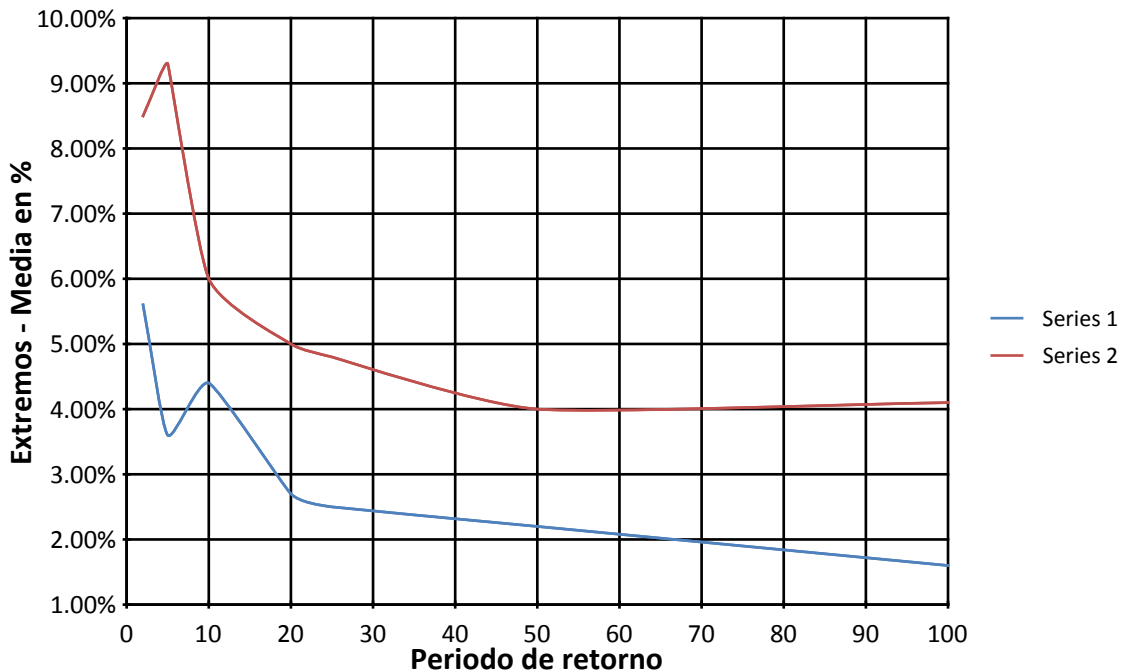


Figura 61: Diferencia porcentual ente valores medios y extremos.

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

### 6.7. Mapas tendencias de lluvias diarias máximas anuales para distintos periodos de retorno.

En las Figuras 62 a 67 se muestran los mapas de lluvia diaria máxima anual asociados a los diferentes períodos de retorno analizados.

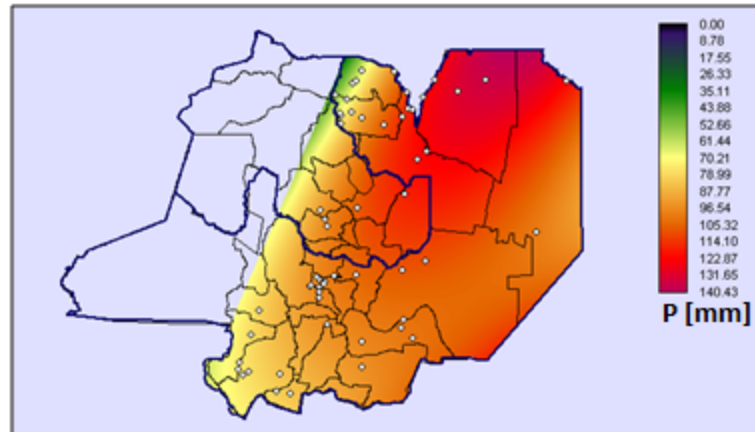
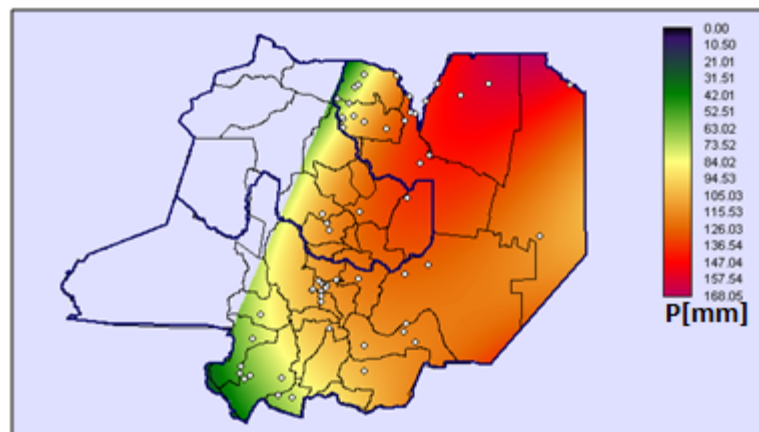
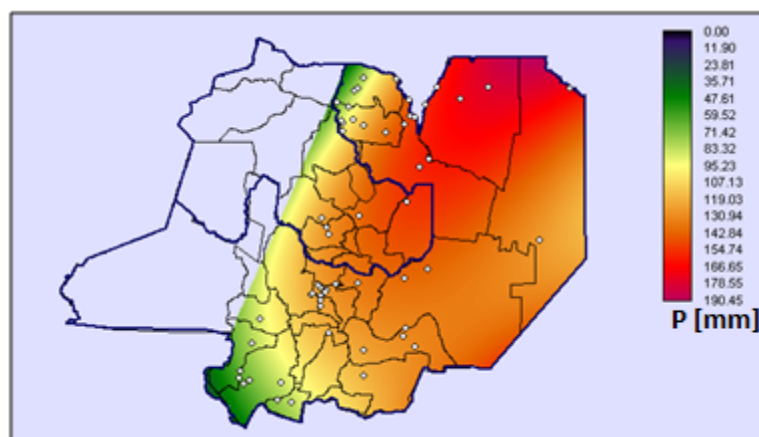


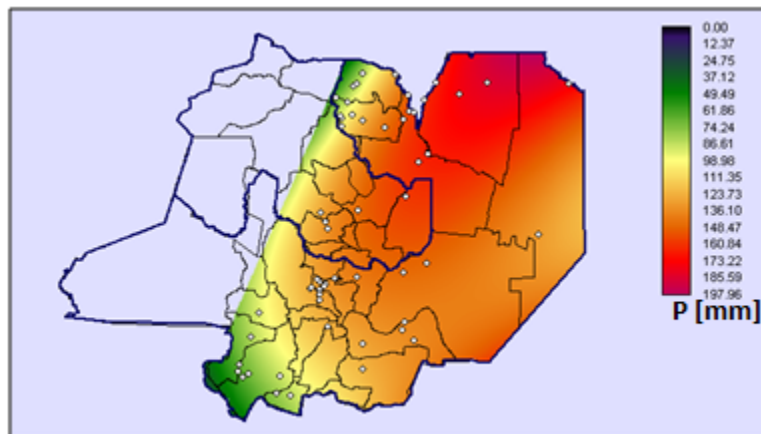
Figura 62: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno  $T= 2$  años [en mm].



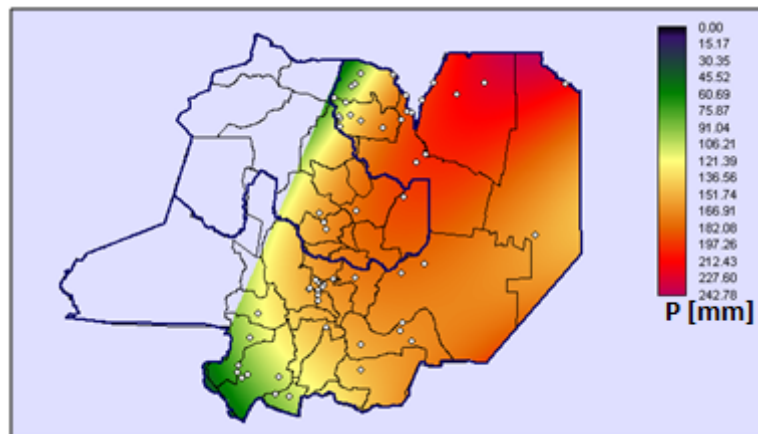
Mapa 63: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno  $T= 5$  años [en mm].



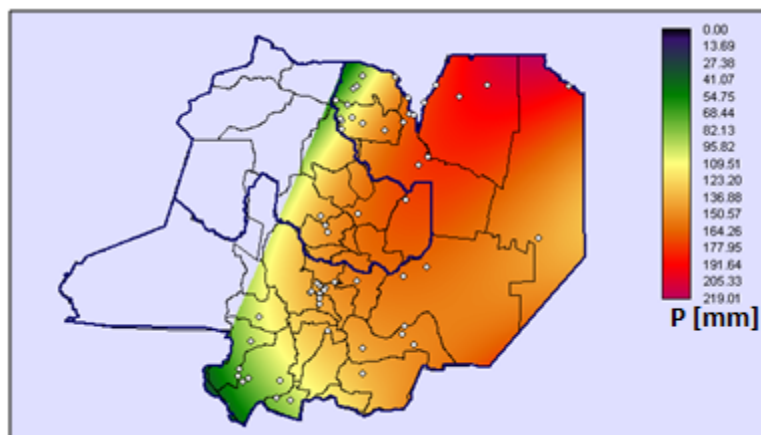
Mapa 64: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno  $T= 10$  años [en mm].



Mapa 65: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno  $T= 20$  años [en mm].



Mapa 66: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno  $T= 50$  años [en mm].



Mapa 67: Mapa de lluvias máximas anuales para Periodo de retorno  $T= 100$  años [en mm].



# Capítulo VII

Comparación de resultados obtenidos en este trabajo con estudios en la Presa Los Molinos

## 7. Comparación de los resultados obtenidos en este trabajo con estudios en la Presa Los Molinos.

### 7.1. Introducción.

Como se mencionó en la Tabla 1 los valores de lluvias anuales para distintos periodos de retorno para la cuenca activa de la Presa Los Molinos es 51, 80, 112 y 127 mm para periodos de retorno de 2, 10, 50 y 100 años. A continuación se contrastan estos valores estimados en este estudio. Para la comparación, primero hay que estimar los valores estadísticos de lluvia en función de los valores puntuales derivados de los mapas tendenciales.

### 7.2. Caracterización espacial de las lluvias de diseño.

Los registros puntuales son siempre muestras en extremo limitadas de la lluvia sobre lacuenca, de modo que su conversión en un estimador areal demanda gran extrapolación. Se asume que las láminas locales representan la lluvia sobre áreas reducidas (2,5 a 25km<sup>2</sup> en torno al pluviómetro) dependientes de las características climáticas y topográficas de la región. Para superficies mayores, la precipitación media sobre lacuenca (**PMA**) difiere del máximo puntual de lluvia y deberá ser inferida, mediante algoritmos de atenuación, a partir de este valor, que es el único con estimación futura. Los ábacos de atenuación son gráficos (Ver Figura 68) con curvas para varias duraciones, que indican el porcentaje de lluvia local a tomar como promedio sobre la cuenca.

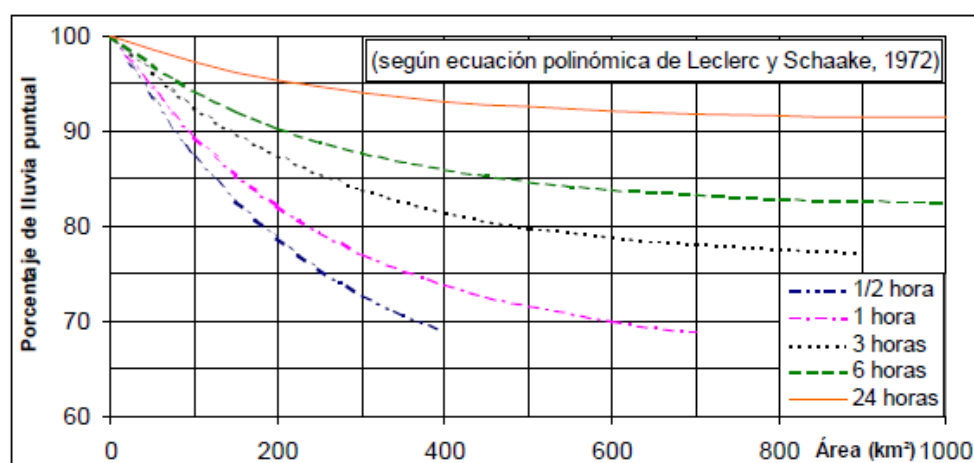


Figura 68: Ejemplo de una atenuación de valores puntuales de lluvias máximas para estimar valores areales.

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

La porción de lámina a considerar depende de la persistencia de las lluvias, debido a que las que más duran localmente (por mecanismo de precipitación, tamaño superior y/o más lento desplazamiento) tienen mayor probabilidad de superponerse en el tiempo con otras en su entorno. Por otra parte, investigaciones sobre lluvias extremas en diferentes puntos de la tierra, muestran que la altura pluviométrica máxima varía con la inversa del cuadrado del área considerada.

Luego de numerosos estudios realizados en la provincia de Córdoba, se dedujo que las curvas de decaimiento areal responden a la ecuación:

$$CDA = \frac{A}{25} \text{ o bien } \ln CDA = k \ln A - k \ln 25$$

#### Ecuación 7-1

Donde CDA es el coeficiente de decaimiento areal y  $A$  es el área. Esta ecuación es válida cuando  $A > 25 \text{ km}^2$  y  $k < 0$ . La justificación de esta estructura es que asume el valor de lámina local como un estimador válido en toda el área, cuando  $A$  es menor que  $25 \text{ km}^2$ , y más allá decae. De modo que, para  $A = 25 \text{ km}^2$ ,  $\ln CDA = 0$  y  $CDA = 1$ . Donde CDA es el coeficiente de decaimiento areal y  $A$  es el área.

Para la estimación de los parámetros  $k$  y posteriormente CDA se aplicó el método desarrollado por Catalini (año 2011). En la Tabla 35, se puede apreciar el valor de los parámetros, estimados para una tormenta de 24 Hs (1440 minutos) y un área de  $1497 \text{ km}^2$  (Cuenca activa).

- k:	0,067
CDA:	76,15%

Tabla 35: Coeficientes “-k” y “CDA” estimados por el método de Catalini.

### 7.3. Resultados.

Para finalizar se realiza la comparación entre los valores de lámina de precipitación areal estimado en este trabajo, utilizando los métodos mencionados anteriormente y el valor proporcionado por la UNLP (Ver Tabla 36).

T (años)	CETA		UNLP
	PMDA puntual	PMDA atenuado	PMDA atenuado
2	75	57	51
10	114	87	80
50	147	112	112
100	165	126	127

Tabla 36: Resumen de los valores de tormenta de diseño estimados.

Validación de la Tormenta de Diseño para la Presa Los Molinos – Jujuy, utilizando técnicas de regionalización.

En la Tabla 37 y Figura 69, se puede apreciar la diferencia porcentual entre los valores de precipitación:

Diferencias porcentuales (CETA y UNLP)	
T (años)	Diferencia porcentual
2	11,98%
10	8,51%
50	0,06%
100	1,07%

Tabla 37: Diferencia porcentual de los valores estimados por el CETA y UNLP.

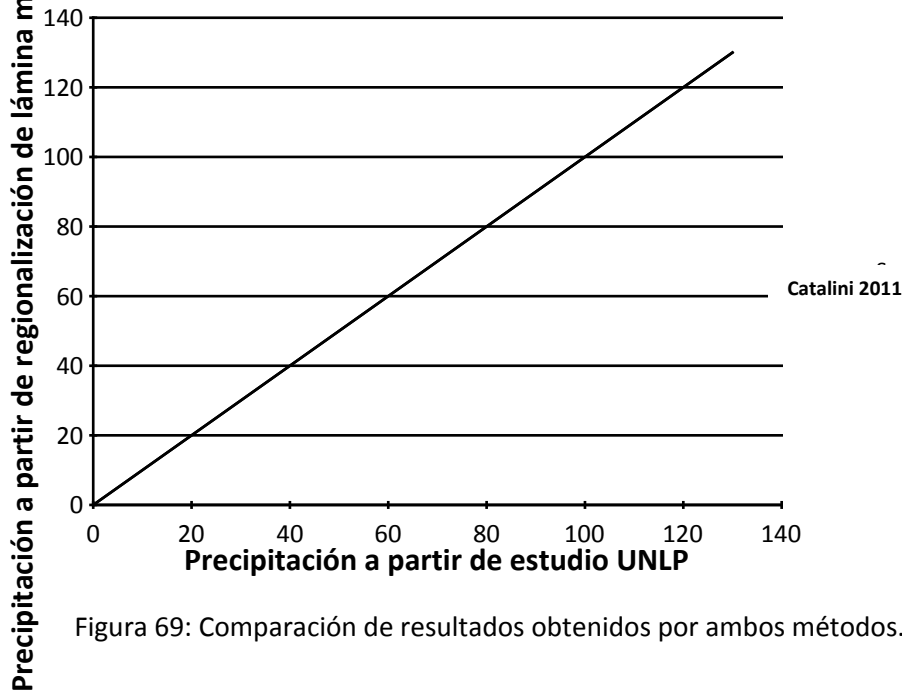


Figura 69: Comparación de resultados obtenidos por ambos métodos.

Pudo observarse poca diferencia entre los valores obtenidos por el CETA y los obtenidos por la UNLP para los distintos periodos de retorno, otorgándole un sólido respaldo al trabajo realizado.

# Capítulo VIII

## 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 102 estaciones pluviométricas en la región de estudio.
2. Se ubicaron espacialmente las estaciones notando una ausencia de las mismas en la zona de la Puna.
3. La determinación del año hidrológico Julio-Junio resultó ser el más adecuado para la región de estudio.
4. 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.
5. 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.
6. Se utilizó un Sistema de información Geográfico (SIG) para representar los resultados obtenidos. El programa utilizado fue IDRISI Selva 17.00.
7. Se realizó la interpolación espacial a través del método de Kriging, el cual evidenció la presencia de valores anómalos en el espacio.
8. Se crearon mapas tendenciales de isohietas de láminas de lluvias máximas diarias asociadas a diferentes períodos de retorno.
9. Se realizó el contraste con estudios antecedentes de lluvias de diseño en la Presa Los Molinos.

## **8.2. Conclusiones personales.**

Como conclusión de esta actividad, puedo decir que he trabajado en un grupo donde priman el compañerismo y el trabajo en equipo, en el que todos están dispuestos a enseñar y ayudar. A lo largo del desarrollo se me fue enseñando diferentes técnicas y actividades, algunas desconocidas para mí, que han sido de gran interés y utilidad para la concreción de los objetivos planteados. Además es de destacar el acompañamiento y participación permanente de todos los integrantes de este grupo de trabajo del Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA).

## **8.3. Trabajos futuros.**

Se conforma una segunda etapa, a realizar entre Enero y Julio de 2014, en donde se busca recopilar nueva información para así poder densificar y ampliar la zona de estudio, incluyendo las provincias de Catamarca, Santiago del Estero, Formosa y Chaco.

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

# Capítulo IV

## 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".
- Catalini, C.G; Caamaño Nelli, G. E.; Dasso C. M.; (2011). "Desarrollo y Aplicaciones sobre Lluvias de Diseño en Argentina". Editorial Académica Española. 271 páginas. ISBN: 978-3-8454-9722-8 Saarbrücken, Alemania.
- Diaz Lozada, Jose Manuel (2013). "Descripción experimental, utilizando un modelo físico, del flujo de aproximación a la Presa Los Molinos". Trabajo final de la carrera Ingeniería Civil - Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales - Universidad Nacional de Córdoba - Córdoba, Argentina.
- Estudio realizado en la Universidad Nacional de la Plata (1970).
- Vaschalde, Tomas Santiago (2013). "Caracterización hidrodinámica del flujo de ingreso a las obras de evacuación de excedentes de la Presa Los Molinos, Jujuy". Trabajo final de la carrera Ingeniería Civil - Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales - Universidad Nacional de Córdoba - Córdoba, Argentina.