

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO -
PUNO**

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“MODELO REGIONAL APLICADO A LAS MAXIMAS AVENIDAS EN LAS
CUENCAS DE LOS RIOS: ILAVE, CALLACAME Y ZAPATILLA”**

TESIS

PRESENTADO POR:

MAURO GIL LAURA MAMANI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

PUNO – PERÚ

2014

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGRICOLA
TESIS

“MODELO REGIONAL APLICADO A LAS MAXIMAS AVENIDAS EN LAS
CUENCAS DE LOS RIOS: ILAVE, CALLACAME Y ZAPATILLA”

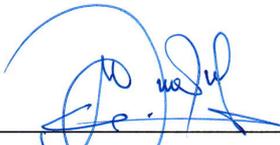
Presentada a la Coordinación de Investigación de la Facultad de Ingeniería
Agrícola; como requisito para optar el Título de:

INGENIERO AGRICOLA

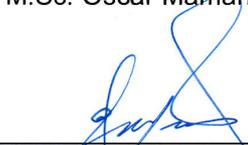
APROBADO POR:

PRESIDENTE DEL JURADO : 
Dr. Jose Vera Santa Maria.

PRIMER JURADO : 
M.Sc. Edilberto Velarde Coaquira.

SEGUNDO JURADO : 
M.Sc. Edilberto Huaquisto Ramos.

DIRECTOR DE TESIS : 
M.Sc. Oscar Mamani Luque.

ASESOR DE TESIS : 
Ing. German Belizario Quispe.

ASESOR DE TESIS : 
Ing. Efraim Lujano Laura.

ÁREA : Ingeniería y Tecnología
TEMA: Estudios hidrológicos
LÍNEA: Recursos Hídricos

DEDICATORIA:

El presente trabajo de Investigación representa uno de mis grandes anhelos hecho realidad. Lo dedico con mucho cariño, amor y respeto:

- ✓ A Dios por darme la vida, por ser mi guía y la oportunidad de adquirir conocimiento y sabiduría.
- ✓ Con cariño e imensa gratitud a mi gran padre, Daniel (+) y a mi adorada madre Fructoasa, por el permanente apoyo que me brindaron su aliento, paciencia, consejos y por su gran esfuerzo, hicieron posible el logro de mi noble profesión.
- ✓ A mis hermanos: Juan, Lino (+), Tito, Elsa e Irma con mucho cariño y afecto, por su apoyo y contribución en mi formación profesional.
- ✓ A mí querida Betzabe y a mi pequeña adorada, Elizabeth Gabriela por brindarme su apoyo incondicional y sobre todo por el cariño mostrado en los momentos más críticos.

MAURO L. M.

AGRADECIMIENTOS:

- ✓ A la Universidad Nacional del Altiplano y a la Facultad de Ingeniería Agrícola, que me acogieron en sus aulas de forma gratuita durante cinco años, por darme la oportunidad de educarme y formarme como Ingeniero. A los docentes que me motivaron a escoger la especialidad y me entregaron las herramientas que hoy en día comienzo a utilizar.
- ✓ A los docentes de la Facultad de Ingeniería Agrícola, por sus valiosas enseñanzas, en mi formación profesional.
- ✓ Al Ing. M.Sc. Oscar Mamani Luque, Director del presente trabajo de Investigación, por su acertada dirección.
 - ✓ Así mismo quiero agradecer a los miembros del jurado: Dr. José Vera Santa María, Ing. Edilberto Velarde Coaquira y Ing. M.Sc. Percy Ginés Choque, por sus comentarios y sugerencias, y por toda la ayuda que me brindaron.
 - ✓ Al Ing. Ricardo Bardales Vassi, por su asesoramiento, preocupación y apoyo en la culminación del presente trabajo de investigación.
- ✓ Al Ing. Apolinario Lujano Laura, por su asesoramiento, preocupación y apoyo en la culminación del presente trabajo de investigación.
- ✓ Al Ing. Efraín Lujano Laura, por sus pautas dadas en el avance de la presente investigación.
- ✓ A mis compañeros de la Facultad de Ingeniería Agrícola, por su apoyo moral en la culminación de la presente Tesis.

A todas las persona, amigos y familiares, que de una u otra manera, directa e indirectamente, motivaron y contribuyeron en la ejecución y culminación de la presente Tesis.

INDICE

	Página.
RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPITULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION.	
1.1. Planteamiento del problema.....	5
1.1.1 Problema general.....	6
1.1.2 Problemas específicos.....	6
1.2 Antecedentes.....	7
1.2.1 Antecedentes internacionales.....	7
1.2.2 Antecedentes nacionales y regionales.....	8
1.3 Objetivos.....	10
1.3.1 Objetivo general.....	10
1.3.2 Objetivos específicos.....	10
CAPITULO II MARCO TEORICO, MARCO CONCEPTUAL Y HIPOTESIS DE LA INVESTIGACION.	
2.1 Marco teórico.....	11
2.1.1 Cuenca hidrográfica.....	11
2.1.2 Partes de una cuenca.....	14
2.1.3 Tipos de cuenca.....	15
2.1.4 Caracterización de la cuenca.....	15
2.1.5 Información hidrométrica.	15
2.1.6 Funciones de distribución de probabilidad usadas en hidrología....	16
2.1.7 Máximas avenidas.....	19
2.1.8 Modelo regional.....	19
2.1.9 Modelo regional para las descargas máximas.	20
2.1.10 Tiempo de retorno.....	22
2.1.11 Evaluación de descargas máximas.....	23
2.1.14 Estimación de parámetros de distribución teórica.....	23
2.1.15 Hidrología estadística.....	25
2.1.16 Tratamiento probabilístico de la información hidrológica.....	26
2.1.17 Ajuste a una distribución de probabilidad.....	28
2.1.18 Cuantiles regionales.....	29

2.1.16.1	Determinación de los cuantiles.....	29
2.1.16.2	El error de estimación de los cuantiles.....	30
2.1.18	Modelo regional para para las descargas máximas.....	31
2.2	Marco conceptual.....	33
2.2.1	Cuenca hidrográfica.....	33
2.2.2	Caracterización de cuencas.....	35
2.2.3	Definición de máxima avenida.....	35
2.2.4	Origen y formación de una avenida.....	36
2.2.7	Regionalización.....	37
2.2.8.1	La regionalización hidrográfica.....	37
2.2.8.2	Análisis de regionalización.....	38
2.2.9	Descargas máximas.....	39
2.2.10	Análisis de frecuencia.....	40
2.2.11	Estimación de los cantiles.....	41
2.3	Hipótesis de la investigación.....	42
2.3.1	Hipótesis general.....	42
2.3.2	Hipótesis específicos.....	42
CAPITULO III MATERIALES Y METODOS.		
3.1	Materiales.....	43
3.1.1	Ubicación del estudio.....	43
3.1.2	Ubicación geográfica.....	43
3.1.3	Ubicación política.....	44
3.2	Métodos.....	47
3.2.1	Recolección y análisis de la información hidrometeoro lógica.....	47
3.2.2	Caracterización de la cuenca.....	47
3.2.2.1	Área de la cuenca.....	48
3.2.2.2	Perímetro de la cuenca.....	48
3.2.2.3	Longitud mayor del río.....	48
3.2.2.4	Forma de una cuenca.....	49
3.2.2.5	Densidad de drenaje.....	51
3.2.2.6	Pendiente media del río.....	53
3.3	Determinación de las avenidas máximas de diseño mediante la utilización de métodos probabilísticos.	54
3.3.1	Modelos de distribución.....	54
3.3.2	Distribución normal.....	55

3.3.3 Distribución log normal 2 parámetros.....	55
3.3.4 Distribución log normal 3 parámetros.....	56
3.3.5 Distribución de gama 2 parámetros.....	57
3.3.6 Distribución de gama 3 parámetros.....	57
3.3.7 Distribución log Pearson tipo III.....	58
3.3.8 Distribución Gumbel.....	58
3.3.9 Distribución log Gumbel.....	59
3.4 Pruebas de bondad de ajuste.....	60
3.5 Prueba X^2	60
3.6 Prueba Kolmogorov Smirnov.....	61
3.7 Relación entre el periodo de retorno y función de distribución acumulada...	63
3.8 Regionalización de los caudales máximos.....	63
3.9 Método de Fuller.....	65
3.10 Estimación de los cantiles regionales.....	66
3.10.1 Estimación de cuantiles.....	67
3.11 Modelo regional para las descargas máximas.....	67
3.11.1 Regresión lineal.....	69
3.11.2 Regresión potencial.....	70
3.14 Estimación de exponentes regionales.....	72
3.15 Modelo regional.....	72
CAPITULO IV RESULTADOS.	
4.1 Parámetros geomorfológicos de las cuencas de los ríos: llave, Callacame y Zapatilla	74
4.1.1 Ubicación de las estaciones meteorológicas SENAMHI – PUNO.....	78
4.1.2 Método de Fuller.	79
4.1.3 Datos de las descargas máximas anuales y promedios históricos....	80
4.2 Función de distribución de mejor ajuste con los datos hidrológicos para los caudales máximos.	84
4.2.1 Determinación de las máximas avenidas de diseño mediante la utilización De métodos probabilístico para los caudales máximos.....	87
4.2.2 Determinación de los caudales máximas para diferentes estaciones.....	90
4.3 Determinación de las máximas avenidas de diseño mediante la utilización De los cuantiles regionales y modelo regional.....	93

4.3.1 Modelo potencial.	94
4.3.2 Comparacion de modelo probabilistico y modelo regional.....	101
4.3.3 Evaluación del medelo regional.....	103
4.3.4 Diferencia de los resultados de caudales maximos obtenidos mediante el metodo probabilistico y modelo regional.	105

CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 Conclusiones.....	109
5.2 Recomendaciones.....	111

BIBLIOGRAFIA.

ANEXO

LA PRUEBA DE AJUSTE DE KOLMOGOROV SMIRNOV PARA LA ESTIMACION DE METODOS PROBABILISTICOS.

MAPAS DE LAS CUENCAS HIDROGRAFICAS DE LOS RÍOS: ILAVE, CALLACAME Y ZAPATILLA.

RELACION DE CUADROS

Cuadro N° 4-1: Caracteristicas morfologicas de la cuenca del callacame.....	77
Cuadro N° 4-2: ubicación de las estaciones meteorologicas SENAMHI-PUNO...	78
Cuadro N° 4-3: Registro de la serie anual de caudales maximos diareos llave..	81
Cuadro N° 4-4: Registro de serie anual de caudales maximos del río Yoroco...	82
Cuadro N° 4-5 Registro de serie anual de caudales maximos del río Zapatilla...	83
Cuadro N° 4-6: Resultados de la prueba de ajuste Kolmogorov Smirnov río llave.....	84
Cuadro N° 4-7: Resultados de la prueba de ajuste Kolmogorov Smirnov río Calacéame.....	85
Cuadro N° 4-8: Resultados de la prueba de ajuste Kolmogorov Smirnov río Zapatilla.....	86
Cuadro N° 4.9 determinación de las máximas avenidas de diseño Mediante la utilización de métodos probabilístico río llave.	87

Cuadro N° 4-10: Calculo de caudal máximo aplicando la distribución Hidroesta del río Callacame.....	88
Cuadro N° 4-11: Calculo de caudal máximo aplicando la distribución Hidroesta del río Zapatillas.....	89
Cuadro N° 4-12: Resultados de descargas maximos avenidas de los ríos: llave,Callacame y Zapatillas.....	91
Cuadro N° 4-13: Resultados de modelo regional de los ríos Callacame, Zapatillas y llave de 2 años.....	94
Cuadro N° 4. 14 Tiempo de retorno de 5 años.....	95
Cuadro N° 4. 15 Tiempo de retorno de 10 años.....	96
Cuadro N° 4. 16 Tiempo de retorno de 50 años.....	97
Cuadro N° 4. 17 Tiempo de retorno de 100 años.....	98
Cuadro N° 4. 18 Tiempo de retorno de 200 años.....	99
Cuadro N° 4. 19 comparacion del modelo probabilistico y modelo regional....	101

Relación de Figuras

Grafico N° 4-1: Ajuste de caudales máximos del río llave.....	88
Grafico N° 4-2: Ajuste de caudales máximos del río Callacame.....	89
Grafico N° 4-3: Ajuste de caudales máximos del río Zapatilla.....	90
Grafico N° 4-4: Ajuste caudales maximos de Gama de 3 parámetros estación llave.....	92
Grafico N° 4-5: Ajuste caudales máximos de Gama de 3 parámetros estación Callacame.....	93
Grafico N° 4-6: Ajuste caudales máximos de Log Normal de 2 parámetros Estación Zapatilla.....	94
Grafico N° 4-7: Resultados de modelo regional periodo de retorno de 2 años..	95
Grafico N° 4-8: Resultados de modelo regional periodo de retorno de 5 años..	96
Grafico N° 4-9: Resultados de modelo regional periodo de retorno de 10 años..	97

Grafico N° 4-10: Resultados de modelo regional periodo de retorno de 50 años.....	98
Grafico N° 4-11: Resultados de modelo regional periodo de retorno de 100 años.....	99
Grafico N° 4-12: Resultados de modelo regional periodo de retorno de 200 años.....	100
Grafico N° 4-13: Comparación del modelo probabilistico y modelo regional río llave.....	102
Grafico N° 4-14: Comparación del modelo probabilistico y modelo regional río Callacame.....	102
Grafico N° 4-15: Comparación del modelo probabilistico y modelo regional río Zapatilla.....	103
Grafico N° 4-16: Evaluacion del modelo regional de estación llave.....	104
Grafico N° 4-17: Evaluacion del modelo regional de estación Callacame.....	104
Grafico N° 4-18: Evaluacion del modelo regional de estación Zapatilla.	105
Grafico N° 4-19: Diferencia de los resultados de los caudales maximos obtenidos mediante el metodo probabilisticos y el modelo regional.....	106

Relación de mapas

Mapa N° 3-1: Cuencas hidrograficas de la región Puno.....	27
Mapa N° 3-1: Cuencas delimitadas para el proyecto de investigacion.....	28

RELACION DE SIMBOLOS

- A = Área de la cuenca en Km²
 P = Perímetro de la cuenca en KM
 Kc = Coeficiente de Compacidad
 R = Radio de la circunferencia
 Kf = Factor de Forma
 L = Longitud axial de la cuenca
 L' = Ancho medio
 Dd = Densidad de drenaje
 Lt = Longitud total de los cursos de agua
 H = Desnivel total (cota en la parte más alta – cota en la estación de aforo), en Km.
 L = Lado mayor del rectángulo equivalente en Km
 Sc = Pendiente Promedio de la cuenca
 D = Intervalo de desnivel constante entre las curvas de nivel en Km.
 L^* = Longitud total de las curvas de nivel dentro de la cuenca, en Km.
 E = Es la elevación media.
 a = Es área entre las curvas de nivel.
 Li = Longitud de cada tramo
 S_i = Pendiente de cada tramo.
 l = Lado menor del rectángulo equivalente en (Km)
 X_i = Información de Análisis.
 \bar{x}_1, \bar{x}_2 = Medias del periodo 1 y 2 respectivamente.
 $S_1(x), S_2(x)$ = Desviación Estándar del periodo 1 y 2.
 n_1, n_2 = Tamaño del periodo 1 y 2.
 n = Tamaño de la muestra. $n = n_1 + n_2$
 G.L.: Grados de libertad
 F_C = Valor de "F" Calculado.
 F_t = Valor de "F" Tabular de las tablas.
 α = Nivel de significación.
 G.L.N. = Grado de libertad del numerador
 G.L.D. = Grados de libertad del denominador
 $x'_{(t)}$ = Valor corregido de la información

$x_{(t)}$ = Valor a ser corregido según la serie sea diario, semanal o mensual respectivamente.

$P = 1, 2, \dots, n$, igual al número de años de registro.

t = Tiempo, tomado como la variable independiente de la tendencia.

$T = (p - 1)w + \tau$

A_m, B_m, C_m, D_m , Son los coeficientes de los polinomios de regresión que deben ser estimados con los datos.

$\overline{T}_{m,p,\tau}$ = Es el promedio de la tendencia.

\bar{t} = Es el promedio de tiempo t .

S_{Tm} = Desviación estándar de la tendencia $T_{m,p,\tau}$.

S_t = Desviación estándar del tiempo t .

R = Coeficiente de correlación lineal entre la tendencia y el tiempo.

T_C = Valor del estadístico "T" calculado.

$X_{p,\tau}$ = Es la serie de información analizada

$T_{m,p,\tau}$ = Tendencia en la media.

$Y_{p,\tau}$ = Serie sin tendencia en la media, que presenta las siguientes características.

$T_{s,p,\tau}$ = Es la tendencia de la desviación estándar.

$t = 1, 2, \dots, n$

n = Número total de datos.

A_s, B_s, C_s, D_s = Son los coeficientes de los polinomios de regresión que deben ser estimados con los datos.

S_p = Desviación estándar del año p .

$Y_{p,\tau}$ = Serie sin tendencia en la media.

\overline{Y}_p = Promedio del año p

N_e y M_e = Valores específicos para cada parámetro.

$Y\%$ = Cantidad especificada que se quiere regionalizar.

S = Pendiente de la cuenca.

A_p = Aforo promedio.

P_{t-1} = Precipitación promedio desfasado en una unidad.

L = Longitud del curso principal, entre otros.

f = Función de relación que puede ser lineal o no lineal.

Y = Variable dependiente representado por los parámetros de los modelos estocásticos ó cantidades específicas.

$I = 1,2,3,\dots, m$, con m igual al número de variables independientes.

x_i = Es el conjunto de variables independientes que pueden ser área, longitud, pendiente, precipitación, promedio, etc.

b_i = Son los parámetros del modelo de R.M.

E_j = Es una variable aleatoria normal e independiente (0,1).

S_e^2 = Es el estimado de la varianza del error de la ecuación planteada.

Y_i = Valor observado.

\hat{Y} = valores estimados por la ecuación.

%P= Porcentaje promedio del error.

Se= El error estándar.

\bar{Y} = Promedio del valor Y .

Tr = Tiempo de retorno.

R = Regionalización.

MR = Modelo regional.

P = Ecuación potencial.

RESUMEN.

El presente trabajo de investigación se ha desarrollado en las cuencas de los ríos: llave, Callacame y Zapatilla, de la región de Puno. Para el diseño de las obras hidráulicas es necesario conocer el caudal de diseño. Existen varios métodos para estimar el caudal de diseño como los métodos probabilísticos, métodos hidrológicos, métodos empíricos. En el presente trabajo se ha determinado un modelo regional usando métodos probabilísticos. Mediante este se puede estimar el caudal de diseño conociendo el área de la cuenca y para un periodo de retorno. El modelo probabilístico adecuado para interpretar el comportamiento de las descargas máximas avenidas anuales es el modelo. Para el río llave la distribución Gama de 3 parámetros, río Callacame la distribución Gama de 3 parámetros y río Zapatilla la distribución Log Normal 2 parámetros. Lo cual se ha definido mediante la prueba de ajuste de Chi-cuadrado. El objetivo es proponer un modelo regional aplicado a las máximas avenidas en la cuencas de los ríos: llave, Calacéame y Zapatilla Puno. La metodología aplicada permite hallar los modelos probabilísticos para estimar el caudal de diseño, a partir de los datos meteorológicos de la estación de puente llave, puente Callacame y puente Zapatillas. Entre los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación se obtuvo que en las distribuciones de probabilidades los que más se ajustan son: la distribución de Log Normal 2 parámetros y Log Normal 3 parámetros. Concluyendo que queda demostrado que el modelo regional es bueno para estimar las descargas de máximas avenidas en cualquier ubicación de la cuenca, debido a que en la comparación con el método probabilístico son similares con el modelo regional: para 2 años (337.17, 19.1, 6.9), para 5 años

(752.2, 63.5, 26.5), para 10 años (925.5, 93.5, 41.6), para 50 años (1248.4, 176.7, 88.5), para 100 años (1367.0, 219.2, 114.89), para 200 años (1481.0, 266.4, 145.3)m³/s. El coeficiente de correlación de la ecuación potencial es $r^2 = 0.93, 0.93, 0.94, 0.96, 0.98$ y 0.98 para las estaciones de: río llave, río Callacame y río Zapatilla.

PALABRAS CLAVES.

- Función de distribución, máximas avenidas, modelo regional, río Callacame y tiempo de retorno.

INTRODUCCION

La estimación del modelo regional para las máximas avenidas, determinados para periodos de retorno de diseño es fundamental en muchas aplicaciones de la Ingeniería Hidráulica. El primero de los casos normalmente se aborda haciendo uso de las distribuciones probabilísticas más usuales: Normal Log Normal de 2 Parámetros, Log Normal de 3 Parámetros, Gamma de 2 Parámetros, Gamma de 3 Parámetros y Gumbel, viendo de emplear la distribución de mejor ajuste de acuerdo a los resultados obtenidos a partir de pruebas como Chi-Cuadrado o Kolmogorov-Smirnov.

Para el diseño de las infraestructuras hidráulicas es necesario conocer el caudal de diseño. El modelo regional es el más adecuado para estimar el caudal de diseño. Conociendo las áreas de las cuencas en el estudio.

En el capítulo 2, se presenta el marco teórico a las descargas de máximas avenidas anuales, trabajos anteriores relacionados al trabajo de investigación.

En el capítulo 3, La metodología del presente trabajo nos permite estimar los caudales máximos para el diseño de infraestructuras hidráulicas, a partir de los datos hidrológicos de las estaciones del río llave, río Callacame y río Zapatilla.

En el capítulo 4 se presenta los resultados estimados del presente trabajo de investigación, se obtuvo que en las distribuciones de probabilidades los que más se ajustan sea el método Gama de 3 parámetros y Log Normal de 2 parámetros. También el modelo regional es el que se ajusta, de tal forma que son consistentes.

En el capítulo 5 se presenta las conclusiones, queda demostrado que el modelo regional es bueno para estimar las descargas máximas avenidas en cualquier ubicación de la cuenca.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En los estudios hidrológicos es importante el conocer las características del caudal que drena una cuenca determinada, para diseñar diferentes tipos de estructuras hidráulicas es necesario conocer las descargas de máximas avenidas para diferentes periodos de retorno en un punto de un río o una cuenca donde no existen estaciones de aforo. Para estimar las descargas máximas avenidas en puntos no aforados de un río o una cuenca es necesario tener modelos regionales de descargas máximas avenidas.

En muchas obras hidráulicas construidas, consideraron en su diseño de caudales medios de estaciones hidrométricas cercanas; esto por falta de información de caudales de máximas avenidas; cuando se presentan eventos extremos en algunas de estas estructuras hidráulicas se producen fallas por sub dimensionamiento en el diseño de la estructura; los mismos que con el tiempo se destruyan totalmente ocasionando pérdidas económicas.

Para el presente trabajo de investigación se buscará el modelo o modelos probabilísticos adecuados para los registro de estaciones hidrográficas de la cuenca del río llave, cuenca del río Callacame y la cuenca del río Zapatillas. Luego se buscará modelos regionales que relacionen los parámetros físicos de la cuenca y periodos de retorno con las descargas máximas avenidas.

Utilizando el modelo regional se puede estimar las descargas máximas avenidas en cualquier punto de la cuenca.

1.1.1. Problema general.

¿De qué manera es posible que el modelo regional permita estimar las máximas avenidas en la cuenca del río Calacéame Puno?

1.1.2. Problemas específicos.

- Cuál es las características geomorfológicas de la cuenca.
- ¿C uál es la función de distribución teórica adecuada para las máximas avenidas?
- ¿Permiten los cuantiles regionales estimar las máximas avenidas para diferentes periodos de retorno?

1.2. ANTECEDENTES.

1.2.1. Antecedentes internacionales.

Según el Instituto Tecnológico de Costa Rica, (1980). Indica que, el caudal de diseño puede ser estimado empleando diversos métodos que como son:

- Métodos probabilísticos: Distribución Gumbel, distribución Pearson Tipo III, distribución exponencial, distribución gamma y distribución log-normal.
- Métodos hidrológicos: método racional, método del hidrograma unitario y método del hidrograma unitario sintético.

Crochín, S. (1983). Recomienda diferentes métodos para la estimación de crecientes como son:

- Métodos de distribución de caudales máximos (distribución normal, distribución log.-normal, distribución Gumbel, distribución Pearson Tipo III, distribución Log-Pearson tipo III).

Pizarro, F. (2007). La función de distribución de probabilidad con la cual los caudales máximos se ven mayormente reflejados, es la función de Gumbel, considerando su uso como altamente confiable, entregando un coeficiente de determinación promedio para todas las estaciones del 96,4% y una aprobación altamente significativa de la prueba de bondad de ajuste Kolmogorov Smirnov. En segundo lugar y con resultados muy similares, se encuentra la función de Goodrich que también puede ser recomendable para su aplicación en cuencas de la Región. Y en tercer lugar, con resultados levemente disímiles, la función, Pearson Tipo III que presentó un coeficiente de determinación promedio del 94,9%, la cual puede ser recomendable solamente para tener una primera estimación del ajuste de valores de caudales máximos.

Método de (Fuller). (Modelo que permite regionalizar el comportamiento de las descargas máximas).

Según el Universidad Nacional del Noreste Comunicaciones Científicas y Tecnológicas (2000). Es válida para cuencas con área mayor a 200 km², pues por debajo de ese valor la inclusión de la variable **P** al sistema pasa a ser obligada para tener un grado aceptable de correlación de $R^2 = 98\%$ y aun así debe aplicarse con cierto cuidado en esta franja de valores.

Revista Chilena de Ingeniería, (2013). La región de estudio tiene una red con poca densidad de estaciones, pero el análisis regional coadyuva a que las estaciones de gran amplitud de datos transfieren información a sitios que no tienen o solo tienen pocos registros, de tal manera que análisis regional logra una mejora en la estimación de eventos extremos para la zona de estudio.

1.2.2. ANTECEDENTES NACIONALES Y REGIONALES.

Ganancias, Facundo (2010). "Evaluación de metodologías de regionalización hidrológica: Aplicación a los caudales máximos de cuencas representativas de la región Sur-Oeste". Puede observarse que con la nueva relación entre áreas y caudal medio, indicada en la mejora la calidad de los resultados obtenidos. Sin embargo, las diferencias, aun cuando son menores, continúan con una tendencia a incrementarse a medida que aumenta el tiempo de retorno analizado. Llegando a un resultado final aceptable con un coeficiente de comparación entre las descargas máximas estimadas con los modelos probabilísticos y el modelo regional, y la correlación entre ambos métodos es del 99% ($r^2 = 0.99$).

Villón. M. (2002). Indica que, en el estudio de la Hidrología del Perú. Que trata de la evaluación de los caudales máximos y de las escorrentías que pueden ocurrir en una sección genérica para eventos de máxima intensidad con una determinada probabilidad. Para el caso de la cuenca del río Callacame no se detallan los resultados ni modelos que permitan estimar las descargas máximas.

Velázquez, Juan (2003). Cuyo título es análisis regional de intensidades de precipitación de la cuenca del río llave, Llegándose a un resultado final aceptable con un coeficiente de determinación de 0.95% para un caudal máximo de 295 m³/s. para un periodo de retorno de 30 años.

Zeballos, E. (2013) trabajo de investigación, cuyo título “modelo regional y ecuaciones estadísticas para determinar las descargas máximas instantáneas en el río Coata”, Llegando a un resultado final aceptable con un coeficiente de comparación entre las descargas máximas estimadas con los modelos probabilísticos y el modelo regional, y la correlación entre ambos métodos es del 99% ($R^2 = 0.99$).

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION.

1.3.1. Objetivo general.

- Proponer un modelo regional aplicado a las máximas avenidas en la cuenca del río Callacame Puno.

1.3.2. Objetivo específico.

- Caracterizar los principales parámetros geomorfológicos de las cuencas: río: llave, río Callacame y río zapatilla.
- Determinar la función de distribución teórica adecuada para las máximas avenidas.
- Estimar los cuantiles regionales para diferentes periodos de retorno.

II. MARCO TEÓRICO, MARCO CONCEPTUAL E HIPOTESIS DE LA INVESTIGACION.

2.1. MARCO TEÓRICO.

2.1.1. CUENCA HIDROGRÁFICA.

Villón, Máximo (2002). Define a la cuenca de drenaje de una corriente como el área de terreno donde todas las aguas caigan por precipitación, unen para formar un solo curso de agua; cada curso de agua tiene una cuenca bien definida, para cada punto de su recorrido. La cuenca del Lago Titicaca, es una cuenca que no tiene su salida ni al océano Pacífico ni al océano Atlántico. Dentro de la cuenca del lago Titicaca uno de sus afluentes es el río Callacame, el cual desemboca sus aguas al río Desaguadero.

El río Callacame está formado por los ríos Causilluma y Collpajahuirá; adicional a estos su caudal también es incrementado en el trayecto por quebradas y ríos tributarios.

La delimitación de una cuenca, sobre un plano o mapa de curvas de nivel siguiendo las líneas de divortium acuarium (parte aguas), la cual es una línea imaginaria, que divide a las cuencas adyacentes y distribuye el escurrimiento originado por la precipitación que en cada sistema de corriente fluye hacia el punto de salida de la cuenca. El parte de aguas está formado por los puntos de mayor nivel topográfico y cruza las corrientes en los puntos de salida, llamado estación de aforo.

Una cuenca se puede clasificar atendiendo a su tamaño, en cuenca grande y cuenca pequeña. La cuenca grande es aquella cuenca en la que predominan las características fisiográficas de la misma (pendiente, elevación, área y cauce) una

cuenca para fines prácticos se considera grande, cuando el área es mayor de 250 km²; mientras que la cuenca pequeña, es aquella cuenca que corresponde a las lluvias de fuerte intensidad y pequeña duración, en la cual las características físicas (tipo de suelo, vegetación), son más importantes que el cauce. Se considera cuenca pequeña aquella cuya área varía desde unas pocas hectáreas, hasta un límite, que para propósito práctico se considera 250km².

Debido a que la forma de la cuenca es muy irregular el cálculo de área de una cuenca no se puede realizar por formulas geométricas, sin embargo existen los siguientes métodos para sus cálculos: uso de la balanza analítica, uso del planímetro o por métodos computacionales.

Vasquez, Cesar (1993). Define a la cuenca hidrográfica como el área o unidad de territorio delimitada por una divisoria topográfica (*divortum acuarium*), que capta la precipitación y drena el agua de escorrentía hasta un colector común, denominado río principal.

Con el transcurrir de los años esta definición se dio restringida teniéndose a la ficha dos definiciones las cuales son más integrales. a) cuenca hidrográfica es el sistema que interrelaciona factores naturales, sociales, económicos, políticos e institucionales y que son variables el tiempo y b) cuenca hidrográfico, es el área o ámbito geográfico delimitado *divortiun acuarium* donde ocurre el ciclo hidrológico e interactúan los factores naturales, sociales, económicos, políticos e institucionales y que son variables en tiempo.

Otro concepto de cuenca hidrográfica, es un ámbito geográfico natural donde ocurre el ciclo hidrológico; es el área drenada hacia un río, identificado por una peculiar topografía delimitada por su divisorias de aguas en un sentido amplio

incluye el aire, la luz solar, la flora, y la fauna que si sitúan alrededor de una fuente de agua principales que funcionan como colectora

Vásquez, Cesar (2000). Define a la cuenca como un territorio o un área geográfica (suelo, agua, clima, precipitación pluvial, escorrentía subterránea, etc.) delimitados por la colección del agua que se deriva en una fuente de agua. Esta contiene determinados recursos naturales que otorgan posibilidades a la vida humana y animal, y su hilo conductor es el ciclo hidrológico y a la cultura de la población que ocupa y se relaciona con la naturaleza. Ese hilo se encuentra constantemente generándose, regenerándose o degenerándose con la intervención del hombre y su sociedad los cuales forman juntos un todo invisible con la con la naturaleza.

Los elementos más importantes de una cuenca son: el agua , el suelo, el clima , la vegetación, topografía, la flora, la fauna y el hombre.

Los rangos de áreas referenciales para las diferentes unidades hidrográficas, se pueden observar en el siguiente cuadro.

CUADRO N° 2.1

Rangos de áreas referenciales.

Unidad hidrográfica	Área (has)
cuenca	50,000 – 800,000
Sub cuenca	5,000 – 50,000
Micro cuenca	< 5,000

2.1.2. PARTES DE UNA CUENCA.

Vásquez, Cesar (2000). Menciona que las cuencas altas andinas normalmente constan de 3 partes:

Parte alta.- estas comprenden altitudes superiores a los 3,000 m.s.n.m. Llegando en algunos casos hasta 6,000m.s.n.m. En tales áreas se concentran el mayor volumen de agua, dado que allí la precipitación pluvial es intensa y abundante. La precipitación total anual promedio alcanza los 1,000 – 2,000mm/año.

Parte media.- esta comprendida entre los 800 y 3,000m.s.n.m. las precipitación promedio que caen en estas zonas varían entre 100 - 1,000mm/año.

Parte baja.- abarcan desde el nivel del mar hasta los 800m.s.n.m. la precipitación promedio que cae en la zona es muy escasa siendo menor a 100mm/año.

2.1.3. TIPOS DE CUENCA.

Existen tres tipos de cuencas:

- **Exorreicas:** drenan sus aguas al mar o al océano. Un ejemplo es cuenca del Plata en Sudamérica.
- **Endorreicas:** desembocan en lagos, lagunas o salares que no tienen comunicación fluvial al mar, por ejemplo, la cuenca del río desaguadero, en Bolivia.

- **Arreicas:** las aguas se evaporan o se filtran en el terreno antes de encausarse en una red de drenaje, arroyos, aguadas y cañadones de la meseta de Patagónica central perteneciente a este tipo, ya que no desaguan en ningún río u otro cuerpo hidrográfico de importancia. También son frecuentes en áreas del desierto del Sahara y en muchas otras partes.

2.1.4. CARACTERIZACIÓN DE CUENCAS.

Vásquez, Cesar (2000). Menciona que las características fisiográficas de la cuenca pueden ser explicadas a partir de ciertos parámetros o constantes que se obtienen del procesamiento de la información cartográfica y conocimiento de la topografía de la zona de estudio. La cuenca como unidad dinámica es un sistema hidrológico en el que se refleja acciones recíprocas entre parámetros y variables.

Las variables pueden clasificarse en variables o acciones externas, conocidos como entradas salidas al sistema, tales como: precipitación, escorrentía directa, evaporación infiltración, transpiración y variables de estado tales como: contenido de la humedad del suelo, salinidad, cobertura vegetal, entre otros. Los parámetros en cambio permanecen constantes en el tiempo y permiten explicar las características fisiomorfométricas de la cuenca.

2.1.5. INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA.

Dentro de la cuenca del río Callacame existe una estación hidrométrica ubicada en el Puente Yohoroco, esta estación solo encontró información hidrométrica a

partir del 1995 a la fecha, sin embargo para el presente estudio será necesario considerar en el análisis de información de cuencas vecinas.

2.1.6. FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD USADAS EN HIDROLOGÍA.

Pizarro, F. (2007). La función de distribución de probabilidad con la cual los caudales máximos se ven mayormente reflejados, es la función de Gumbel, considerando su uso como altamente confiable, entregando un coeficiente de determinación promedio para todas las estaciones del 96,4% y una aprobación altamente significativa de la prueba de bondad de ajuste Kolmogorov Smirnov. En segundo lugar y con resultados muy similares, se encuentra la función de Goodrich que también puede ser recomendable para su aplicación en cuencas de la Región. Y en tercer lugar, con resultados levemente disímiles, la función, Pearson Tipo III que presentó un coeficiente de determinación promedio del 94,9%, la cual puede ser recomendable solamente para tener una primera estimación del ajuste de valores de caudales máximos.

Finalmente se descarta la función Log-Normal, debida a que dicha función presenta una sobreestimación en los valores de caudales máximos probables, no siendo recomendable su uso para caudales máximos.

Mejares, Aparicio (1996). Menciona que entre las funciones de distribución de probabilidad usados en hidrología, se estudian las siguientes: Normal, Log Normal, Pearson III y Gumbel.

Las funciones Normal y Log Normal son generalmente apropiadas para variables aleatorias que cubren todo el rango de valores de los resultados posibles del experimento bajo análisis, como por ejemplo los volúmenes de escurrimiento

mensual en un río. Las funciones Gumbel se desarrollaron para el análisis de los valores extremos o mínimos anuales. La función Pearson Tipo III ocupa un lugar intermedio.

Mijares, Aparicio (1993). Afirma que, en la estadística existe decenas de funciones de distribución de probabilidad teóricas; de hecho, existen tantas como se quiera, y obviamente no es posible probarlas todas para un problema particular. Por lo tanto, es necesario escoger, de esas funciones, las que se adapten mejor al problema bajo análisis.

Monsalve, S. (1995). En esta publicación indica que existen dos métodos de estimación de avenidas: los de tipo determinístico y los del tipo probabilístico. En los del tipo determinístico se calculan en forma unívoca los caudales de la máxima avenida en base a los datos hidrometeorológicos y entre ellos destaca el método de la "Avenida Máxima Probable". Los modelos probabilísticos recomendadas para la estimación de avenidas son: modelo de Gumbel, modelo de valor extremo tipo II, modelo log Gumbel, modelo Gamma, modelo exponencial, modelo log normal de 2 parámetros, modelo de valor extremo general, modelo de Pearson tipo III, modelo log normal de 3 parámetros, modelo logística generalizada, modelo log Pearson tipo III.

Crochin, S. (1983). Indica que, Los modelos probabilísticos consideran a las descargas máximas anuales, como variables aleatorias independientes en el tiempo, es decir no se toma en cuenta la secuencia en el tiempo (serie histórica). En los métodos estadísticos o probabilísticos se considera que el caudal es una variable aleatoria que está sujeta al análisis frecuencial y que por lo tanto puede ser estudiada mediante diversas leyes estadísticas de fenómenos extremos.

Al utilizar los modelos probabilísticos primero se busca el modelo probabilístico adecuado para los datos de los caudales máximos.

En este caso el análisis se hace en cada estación, la prueba estadística usada para probar la bondad de ajuste es la prueba de Chi-cuadrado. Para estimar los valores de los caudales estimados para una determinada probabilidad es necesario estimar los parámetros de los modelos probabilísticos.

En el libro de Hidrología aplicada. Indica una serie de modelos probabilísticos o de distribuciones de probabilidad comúnmente utilizados para variables hidrológicas, como son: distribución normal, distribución log normal, distribución exponencial, distribución gamma, distribución Pearson tipo III, distribución log Pearson tipo III y distribución de valor extremo tipo I.

Las leyes de probabilidad para explicar el comportamiento temporal de caudales máximos son: distribución normal, distribución log normal, distribución Gumbel, distribución log – Gumbel, distrución Pearson tipo III y distribución log – Pearson tipo III.

2.1.7. MÁXIMAS AVENIDAS.

Linsley, S. (1978), para la determinación del caudal máximo instantáneo ocurrido en una sección de control, en un lapso determinado, generalmente durante el transcurso del pasaje de una onda de avenida, disponerse de un instrumento registrador. Se expresan en m^3/s y se le asocia la fecha en que se ha registrado.

Es un parámetro importante para determinar la capacidad de escurrimiento en obras hidráulicas que no deben ser sobrepasados, puesto que ese hecho

acarrearía daños importantes. Cuando se cuenta con registros plurianuales de caudales se suele definir una serie de caudales máximos instantáneos para cada año, de esta forma se pueden desarrollar estudios estadísticos y asociar dichos caudales a tiempo de retorno.

2.1.8. MODELO REGIONAL.

Erazo, Ana (2004), Las estaciones hidrométricas registran los caudales mínimos, medios y máximos que fluyen por un punto determinado de una cuenca. Esta información hidrológica medida, permite cuantificar la oferta hídrica de la cuenca, y estimar los caudales máximos para diferentes periodos de retorno para el diseño de obras hidráulicas. La estimación de estos valores de caudal en cuencas que no poseen medición directa a través de una estación hidrométrica, puede realizarse a través de metodologías estadísticas, hidrometeorológicas o de regionalización. En este documento, se presenta la metodología y los resultados de la regionalización de caudales máximos y medios en el país, llevada a cabo con base en los datos registrados en las estaciones hidrométricas históricas.

La regionalización de caudales máximos desarrollada, permite la estimación de los caudales en cualquier parte del país para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50 y 100 años y la regionalización de caudales medios permite la estimación de los caudales medios anuales y mensuales igualmente para cualquier cuenca. Estas regionalizaciones consisten en una serie de ecuaciones

y factores de ajuste, que de una forma sencilla permiten estimar los caudales tanto máximos como medios.

Las series hidrológicas de caudales máximos a dimensionales constituidas para cada región hidrológicamente homogénea fueron ajustadas a las funciones de distribución Gumbel, Log Pearson III, Log Normal II y Log Normal III, y evaluadas con las pruebas de Chi² y de Smirnov Kolmogorov y ajuste gráfico, para determinar la función de mejor ajuste a las series. Posteriormente, se determinó el factor de ajuste para cada periodo de retorno en cada región hidrológicamente homogénea y por último se evaluó la relación entre las características fisiográficas de las cuencas y los caudales máximos promedios.

2.1.9. MODELO REGIONAL PARA LAS DESCARGAS MÁXIMAS.

Pérez, M. (2009). Manifiesta que, hasta hace poco, los esfuerzos para pronosticar avenidas centraban su interés únicamente en la descarga máxima de la avenida, relacionando la ocurrencia del gasto pico con los parámetros meteorológicos y fisiográficos de una cuenca. En la actualidad se cuenta con métodos más completos que consideran la presencia de distintas condiciones meteorológicas. La principal utilidad de los métodos para la predicción de avenidas, radica en que al tener una idea anticipada de las avenidas que están por ocurrir, es posible aprovechar al máximo los mecanismos de control, como en el caso de presas.

El modelo regional para las descargas máximas instantáneas anuales se estimará mediante fórmulas empíricas. Este método es más antiguo y consiste

en establecer una relación funcional entre la magnitud de una creciente y una o más variables de las que depende.

El inconveniente principal que presentan los resultados obtenidos de la aplicación de las Fórmulas Empíricas, deriva del hecho de que éstas se están utilizando en cuencas distintas a aquellas en las que fueron deducidas, por lo que sus coeficientes deberían ser ajustados, lo cual resulta sumamente difícil.

Sin embargo, debido a la correlación que existe entre la magnitud de cuenca y el gasto máximo, los resultados obtenidos con las fórmulas empíricas podrán servir para acotar la magnitud de las Avenidas de Proyecto. De preferencia se deben de utilizar todos aquellos que por sus restricciones, puedan ser utilizados y de sus resultados, evidentemente diferentes y algunos hasta absurdos, se concluirán los valores probables de las Avenidas de Proyecto, ya que estos métodos sirven como un marco de referencia. En el siguiente cuadro, se presenta un resumen de 15 fórmulas empíricas de los diversos tipos. Las fórmulas empíricas pueden ser clasificadas en dos grandes grupos:

1. Fórmulas que incluyen el concepto de probabilidad. Se consideran las mejores, por ejemplo Gete, Fuller, Creager, etc.
2. Fórmulas que no incluyen el concepto de probabilidad. Pudiéndose dividir en los cuatro siguientes subgrupos:

2.1.10. TIEMPO DE RETORNO.

Chow, T. (1994). Manifiesta, Es el tiempo promedio en años entre eventos o sucesos que igualan o exceden a una magnitud dada, a este tiempo promedio se denomina como tiempo o periodo de retorno.

Si X es una variable aleatoria, la probabilidad de igualar o exceder a un valor determinado x se puede expresar matemáticamente mediante la siguiente ecuación:

$$P(X \geq x) = p$$

Para cada observación o experimento existen dos posibilidades (proceso Bernoulli).

- $X \geq x$ (éxito), su probabilidad es p
- $X < x$ (falla) su probabilidad es $1 - p$

$$f(t, p) = (1 - p)^{t-1} p \quad \text{para } t = 1, 2, \dots, n$$

La ecuación es la función masa de probabilidad de la distribución geométrica y está dada por la siguiente ecuación:

$$g(x, p) = p(1 - p)^{x-1} \quad \text{para } x = 1, 2, 3, \dots, n$$

Donde la variable aleatoria es $x=t$.

2.1.11. EVALUACIÓN DE LAS DESCARGAS MÁXIMAS.

Crochín, S. (1983). Existen varios métodos para estimar las crecidas o las descargas máximas; como son: métodos probabilísticos, métodos hidrológicos, métodos empíricos, método de área-pendiente etc. El método a emplear básicamente depende de los datos que se tienen a disposición del proyectista. En el presente trabajo se va estudiar el comportamiento de los caudales máximos instantáneas de la cuenca del río Santa mediante métodos probabilísticos, luego se busca los modelos regionales en función de los parámetros físicos de la cuenca.

En algunas aplicaciones prácticas de la Ingeniería Hidráulica es necesario conocer el comportamiento espacial y temporal de los caudales de avenida (Diseño de vertedero de la represa), en estos casos son empleados los métodos de tránsito de avenidas. En otros casos la Ingeniería Hidráulica sólo necesita conocer el comportamiento temporal de las crecidas anuales, es decir es necesario conocer valores de las descargas máximas anuales. Con los datos de crecidas anuales se determinan el caudal de avenida extraordinaria, también llamado como caudal de diseño.

2.1.12. ESTIMACION DE PARAMETROS DE DISTRIBUCIONES TEORICAS.

Villón, Máximo (2005). Menciona que para determinar los valores numéricos de los parámetros de la distribución teórica, a partir de los datos muestrales, se utilizan varios métodos de estimación, siendo en orden ascendente de menor a

mayor eficiencia, los siguientes: Gráfico, Mínimos Cuadrados, Momentos y Máxima Verosimilitud.

Método grafico.- Consiste en plotear los valores de la distribución empírica sobre un papel especial, donde la distribución teórica asignada a priori, se puede representar como una línea recta, y de allí estimar los parámetros buscados.

- El papel de probabilidades normal, representa la distribución normal como una línea recta.
- El papel de probabilidades log-normal, representa la distribución log-normal como una línea recta.
- El papel de probabilidades extremas, representa la distribución Gumbel como una línea recta.

a. Método de mínimos cuadrados.- este método es más aplicable para la estimación de los parámetros de una ecuación de regresión; Por ejemplo, dada la recta de regresión lineal $Y=a+bx$; donde a y b son los parámetros.

El error entre el valor observado i y el teórico es: $E_i = y_i - a - bx_i$

La suma de los cuadrados de los errores de los valores observados es.

$$s = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2$$

Esta suma puede minimizarse para a y b, esto se consigue derivando parcialmente S en función de cada estimado a y b, e igualando a cero, es decir:

$$\frac{\partial S}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i) = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n x_i (y_i - a - bx_i) = 0$$

Estas últimas ecuaciones se denominan ecuaciones normales, las cuales resueltas dan para a y b:

$$b = \frac{\sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{n}}{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2}$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} = \frac{\sum y_i}{n} - \frac{\sum x_i}{n} b$$

2.1.13. HIDROLÓGIA ESTADÍSTICA.

Chow, T. (1994). Los procesos hidrológicos evolucionan en el espacio y en el tiempo en una forma que es parcialmente predecible, o determinística, y parcialmente aleatoria. Un proceso de este tipo se conoce con el nombre de proceso estocástico. En algunos casos, la variabilidad aleatoria del proceso es tan grande comparada con su variable determinística, que se justifica que el hidrólogo trata el proceso como puramente aleatorio. De esta manera, el valor de una observación del proceso no está correlacionada con los valores de observaciones adyacentes, y las propiedades estadísticas de todas las observaciones son iguales.

2.1.14. TRATAMIENTO PROBABILÍSTICO DE LA INFORMACIÓN HIDROLÓGICA.

Chow, T. (1994). Una variable aleatoria X es una variable discreta por una distribución de probabilidad. La distribución determina la posibilidad de una observación x de la variable caiga en un rango especificado de X .

Si X es la precipitación anual en un lugar especificado, entonces la distribución de probabilidad de que la precipitación anual observada en un año dado caiga en un rango definido, tal como menos de 30 pulg, o 30 pulg – 40 pulg, y así sucesivamente.

Un conjunto de observaciones x_1, x_2, \dots, x_n de una variable aleatoria se denomina una muestra. Se supone que las muestras son sacadas de una hipotética población infinita que posee propiedades estadísticas constantes, mientras que las propiedades de una muestra puedan variar de una muestra a otra. El conjunto de todas las muestras posibles se puede extraer de una población se conoce como el espacio muestra, y eventos es un subconjunto del espacio muestral.

La probabilidad de un evento, $P(A)$, es la probabilidad de que esta ocurra cuando se hace una observación de la variable aleatoria. Las propiedades del evento pueden estimarse. Si una muestra de n observaciones tiene n_A valores en el rango de evento A , entonces la frecuencia relativa es n/n_A . A medida que el tamaño de la muestra aumente, la frecuencia relativa se convierte progresivamente en una estimación de la probabilidad del evento, es decir.

$$P(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_A}{n}$$

Tales probabilidades se conocen como probabilidades objetivas o posteriores debido a que dependen concretamente de las observaciones de la variable aleatoria.

Las probabilidades de eventos obedecen a ciertos criterios.

Probabilidad total. Si el espacio muestral Ω está completamente dividido en m eventos o áreas no traslapadas A_1, A_2, \dots, A_m , entonces.

$$P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_m) = P(\Omega)$$

a. Complementariedad. Se sigue que si \bar{A} es el complemento de A , es decir, $\bar{A} = \Omega - A$, entonces.

$$P(\bar{A}) = 1 - P(A)$$

Probabilidad condicional. Supóngase que existen dos eventos A y B . el evento A podría ser el que la precipitación de este año fuera menor a 40 pulg mientras que B podría ser el evento de que la precipitación del próximo año sea menor que 40 pulg. La intersección es $A \cap B$, el evento de que tanto A como B ocurran, es decir, dos años sucesivos con precipitación anual menor de 40 pulg. Si $P(B/A)$ es la probabilidad condicional de que ocurra B dado que ya ha ocurrido A , entonces la probabilidad conjunta de que A y B ocurran, $P(A \cap B)$, es el producto de $P(B/A)$ y la probabilidad de que A ocurra, es decir, $P(A \cap B) = P(B/A)P(A)$, o

$$P(B/A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)}$$

Si la ocurrencia de B no depende de la ocurrencia de A se dice que los eventos son independientes y $P(B/A) = P(B)$. para eventos independientes como se demuestra.

$$P(A \cap B) = P(A)P(B)$$

2.1.15. AJUSTE A UNA DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD.

Chow, T. (1994). Una distribución de probabilidad es una función que representa la probabilidad de ocurrencia de una variable aleatoria. Mediante el ajuste de una distribución de un conjunto de datos hidrológicos, una cantidad de información probabilística en la muestra puede resumirse en forma compacta es la función y en sus parámetros asociados. El ajuste de distribuciones puede llevarse a cabo por varios métodos:

Villón. Máximo (2002). Las pruebas de Bondad de ajuste, consisten en comprobar gráfica y estadísticamente, si la frecuencia empírica de la serie analizada, se ajusta a una determinada función de probabilidades teórica seleccionada a priori, con los parámetros estimados con base a los valores muestrales.

Las pruebas estadísticas, tienen por objeto la certidumbre que se obtiene al hacer una hipótesis estadística sobre una población.

Las pruebas de bondad de ajuste más utilizado son:

- a. Ajuste gráfico.
- b. Ajuste estadístico.
 - Chi cuadrado.
 - Smirnov Kolmogorov.

2.1.16. CUANTILES REGIONALES.

2.1.16.1. Determinación de cuantiles:

La Serena, C. (2008). Los cuantiles son valores asociados a un determinado valor de probabilidad, dependiente de una función de distribución acumulada de probabilidad especificada en sus parámetros.

El software LRAP junto con determinar la o las distribuciones de probabilidad de mejor ajuste a la serie de datos pertenecientes a una región homogénea, determina al mismo tiempo los parámetros de la distribución, medidas a partir de las cuales se calculan los cuantiles para un set de valores de probabilidad.

La ventaja de este procedimiento es que, conociendo la curva de crecimiento regional, o curva de cuantiles regionales, se determinan fácilmente los cuantiles de cada estación en la región, multiplicando los cuantiles regionales por el correspondiente factor de escala, que corresponde en este análisis a la precipitación media anual de la estación considerada.

2.1.16.2. EL ERROR DE ESTIMACIÓN DE LOS CUANTILES.

Bartley, (1987). Una medida de la fiabilidad de la estimación de un cuantil XT es el error cuadrático medio (MSE) del estimador, que se define como:

$$MSE(\bar{X}_T) = E [(\bar{X}_T - XT)^2]$$

Dónde:

$E[\bar{X}_T - XT]$ es el operador valor esperado. Este error es muy complejo de obtener analíticamente, por lo que se recurre o bien a simulaciones de tipo Monte Carlo para obtener el error cuadrático medio muestral, o bien a la obtención de su valor asintótico.

Se define el error cuadrático medio muestral del estimador del cuantil, SMSE, como:

$$SMSE_i(XT) = \sum_{j=1}^S (XT_{ij} - XT)^2$$

Dónde:

XT = verdadero valor del cuantil de período de retorno.

XT_{ij} = estimador del cuantil en la simulación j utilizando la información i ,

S = número total de simulaciones.

Sin embargo, el error cuadrático medio definido por la ecuación es a su vez una variable aleatoria. Se trata por tanto de una aproximación que tenderá al verdadero

MSE cuando las simulaciones tiendan a infinito. Para obtenerlo es necesaria la generación de series sintéticas en número muy elevado. En este trabajo se han simulado múltiples escenarios cada uno de ellos con 5000 simulaciones.

El algoritmo empleado para la obtención de números aleatorios con distribución uniforme en el intervalo $[0, 1]$ ha sido un generador congruencial lineal.

2.1.17. MODELO REGIONAL PARA LAS DESCARGAS MÁXIMAS.

Hasta hace poco, los esfuerzos para pronosticar avenidas centraban su interés únicamente en la descarga máxima de la avenida, relacionando la ocurrencia del gasto pico con los parámetros meteorológicos y fisiográficos de una cuenca. En la actualidad se cuenta con métodos más completos que consideran la presencia de distintas condiciones meteorológicas. La principal utilidad de los métodos para la predicción de avenidas, radica en que al tener una idea anticipada de las avenidas que están por ocurrir, es posible aprovechar al máximo los mecanismos de control.

a. REGRESION POTENCIAL.

La regresión potencial es la más adecuada para estimar los caudales máximos la regresión potencial, para el presente trabajo de investigación a partir de

análisis regional de avenidas para distintos periodos de retorno cuyos resultados se presentan.

La presión (Q) y el volumen (A) en un tipo de gas están ligados por una ecuación del tipo.

$$QA^{-b} = a$$

Dónde:

Q = caudal máximo instantáneo anual (m³/s).

a,b,c,d: parámetros regionales por determinar.

T = periodo de retorno.

A = área de la sub cuenca.

2.2. MARCO CONCEPTUAL.

2.2.1. CUENCA HIDROGRÁFICA.

Villón, Máximo (2002). Define a la cuenca de drenaje de una corriente como el área de terreno donde todas las aguas caigan por precipitación, unen para formar un solo curso de agua; cada curso de agua tiene una cuenca bien definida, para cada punto de su recorrido. La cuenca del Lago Titicaca, es una cuenca que no tiene su salida ni al océano Pacífico ni al océano Atlántico. Dentro de la cuenca del lago Titicaca uno de sus afluentes es el río Callacame, el cual desemboca sus aguas al río Desaguadero.

El río Callacame está formado por los ríos Causillum y Collpajahuira; adicional a estos su caudal también es incrementado en el trayecto por quebradas y ríos tributarios.

La delimitación de una cuenca, sobre un plano o mapa de curvas de nivel siguiendo las líneas de divortium acuarium (parte aguas), la cual es una línea imaginaria, que divide a las cuencas adyacentes y distribuye el escurrimiento originado por la precipitación que en cada sistema de corriente fluye hacia el punto de salida de la cuenca. El parte de aguas está formado por los puntos de mayor nivel topográfico y cruza las corrientes en los puntos de salida, llamado estación de aforo.

Vasquez, Cesar (1993). Define a la cuenca hidrográfica como el área o unidad de territorio delimitada por una divisoria topográfica (divortum acuarium), que capta la precipitación y drena el agua de escorrentía hasta un colector común, denominado río principal.

Con el transcurrir de los años esta definición se dio restringida teniéndose a la ficha dos definiciones las cuales son más integrales. a) cuenca hidrográfica es el sistema que interrelaciona factores naturales, sociales, económicos, políticos e institucionales y que son variables el tiempo y b) cuenca hidrográfico, es el área o ámbito geográfico delimitado divortium acuarium donde ocurre el ciclo hidrológico e interactúan los factores naturales, sociales, económicos, políticos e institucionales y que son variables en tiempo.

Otro concepto de cuenca hidrográfica, es un ámbito geográfico natural donde ocurre el ciclo hidrológico; es el área drenada hacia un río, identificado por una peculiar topografía delimitada por su divisorias de aguas en un sentido amplio incluye el aire, la luz solar, la flora, y la fauna que si sitúan alrededor de una fuente de agua principales que funcionan como colectora.

Vásquez, Cesar (2000). Define a la cuenca como un territorio o un área geográfica (suelo, agua, clima, precipitación pluvial, escorrentía subterránea, etc.) delimitados por la colección del agua que se deriva en una fuente de agua. Esta contiene determinados recursos naturales que otorgan posibilidades a la vida humana y animal, y su hilo conductor es el ciclo hidrológico y a la cultura de la población que ocupa y se relaciona con la naturaleza. Ese hilo se encuentra constantemente generándose, regenerándose o degenerándose con la intervención del hombre y su sociedad los cuales forman juntos un todo invisible con la con la naturaleza.

2.2.2. CARACTERIZACION DE CUENCAS.

Vasquez, Cesar (2000). Menciona que las características fisiográficas de la cuenca pueden ser explicadas a partir de ciertos parámetros o constantes que se obtienen del procesamiento de la información cartográfica y conocimiento de la topografía de la zona de estudio. La cuenca como unidad dinámica es un sistema hidrológico en el que se refleja acciones reciprocas entre parámetros y variables.

Las variables pueden clasificarse en variables o acciones externas, conocidos como entradas salidas al sistema, tales como: precipitación, escorrentía directa, evaporación infiltración, transpiración y variables de estado tales como: contenido de la humedad del suelo, salinidad, cobertura vegetal, entre otros. Los parámetros en cambio permanecen constantes en el tiempo y permiten explicar las características fisiomorfométricas de la cuenca.

2.2.3. DEFINICIÓN DE MÁXIMA AVENIDA.

Guevara, Carlos (2005). Define como un múltiplo de las descargas medias diarias, el cual puede ser de 3-5 veces.

Molina, (1995). Define como la máxima descarga de un río, o el caudal que haya superado a todas las demás observadas durante un período de tiempo.

Sotero, Miguel (1987). Define como el mayor volumen de agua que pasa por un determinado punto de control, a consecuencia de una fuerte precipitación.

Rocha, (1993). Las avenidas son fenómenos naturales que suelen causar grandes daños en todo el mundo. Debemos precisar que no es lo mismo avenida que inundación. Una avenida es fundamentalmente un fenómeno hidrometeorológico; que se debe a las condiciones naturales. En cambio una

inundación es el desbordamiento de un río por incapacidad de su cauce para contener el caudal que se presenta.

Chávez, (1994). La importancia del análisis de las crecidas obedece a la necesidad de definir las magnitudes de éstas para determinar finalmente el caudal de diseño necesario para que el ingeniero plantee las soluciones adecuadas a problemas como los sistemas de protección contra crecientes, se trata de proyectos de obras que protejan contra los daños que puedan ocasionar las inundaciones, la erosión por las fuertes correntadas, etc., en las poblaciones, en las áreas cultivadas, centros de trabajo, vías de comunicación, etc., es decir, de sistemas importantes para la vida y bienestar humanos. Su máxima importancia tiene tugar cuando hay amenaza directa para la vida de las personas.

2.2.4. ORIGEN Y FORMACIÓN DE UNA AVENIDA.

La formación de una avenida tiene como fuentes de origen a las precipitaciones y fusión de nieves, principalmente. La máxima avenida, generalmente se produce a causa de una precipitación excepcional por su intensidad, duración y extensión.

2.2.5. ESTIMACIÓN DE LOS CUANTILES.

Alvares, (1999). Una vez escogida una función de distribución, se estimarán los cantiles asociados a un cierto período de retorno.

$$\lambda^R (J) = \sum_{S=1}^M \lambda(S) j \cdot \left(\frac{NS}{L}\right)$$

Donde la contribución de cada estación con N_i observaciones al promedio se pondera en función de la longitud de la serie como:

$$L = \sum_{j=1}^M N_j$$

Obtenidos los L-momentos muestrales y caracterizada a través de ellos la función de distribución acumulada, se puede plantear $x = x(F)$ para distintos períodos de retorno y obtener los cantiles dividiendo estos valores extremos de la variable por la media anual muestra.

2.2.6. REGIONALIZACIÓN.

Perez, M. (2003). Un problema común en la evaluación de eventos extremos de lluvias o crecidas es su estimación en sitios sin datos o con poca información; este inconveniente se corrige mediante un análisis de datos de varias estaciones vecinas. Al conformar grupos de estaciones se aprovecha la información de la región cuando ésta es homogénea. Al aplicar el concepto de homogeneidad en el análisis regional con un tipo de datos, se benefician las estimaciones, obteniéndose mayor confiabilidad de resultados, en comparación con la forma tradicional que sólo utiliza información de un sitio.

Por consiguiente, la cuantificación de eventos hidrológicos o meteorológicos en regiones con poca o nula información, se debe lograr con base a la información disponible en toda la región, hidrológica o meteorológicamente homogénea

2.2.6.1. LA REGIONALIZACIÓN HIDROGRÁFICA.

La regionalización se apoya en el concepto fundamental de homogeneidad hidrológica en una región, es decir dividir la zona de estudio en regiones cuyas características topográficas, climáticas, orográficas, etc. sean similares

(homogeneidad estadística). Utilizando éste concepto, se han desarrollado diferentes métodos entre ellos la Regionalización de Características Medias de la cuenca, encaminada a regionalizar parámetros que permitan calcular eventos máximos para diferentes períodos de retorno en sitios donde no se tiene información de este tipo y se dispone de variables geomorfoclimáticas de apoyo, fácilmente medibles.

En este estudio se muestra de forma general el planteamiento matemático de la Regionalización de las Características Medias de la Cuenca; para este caso en particular la precipitación y la evaporación, éstas y el área de drenaje con la media y la desviación estándar de los caudales máximos son las variables de interés.

2.2.6.2. ANÁLISIS DE REGIONALIZACIÓN.

En las ocasiones en que se requiere del análisis de frecuencias en un sitio donde no se tiene suficiente información disponible ó que se carece, la regionalización hidrológica. Se emplea el análisis regional de las estaciones de medición con características similares, es decir que pertenezcan a una región homogénea.

Está técnica correlaciona las variables hidrológicas con las características físicas de las región o meteorológicas, así a través de estas relaciones regionales, es posible obtener estimados de gastos en función de características hidrológicas.

Así, en la hidrología se reconocen dos tipos de regionalización:

En resumen, el análisis regional nos permite estimar eventos de diseño en cuencas no aforadas o con medición escasa.

Si se está considerando realizar un análisis de frecuencias, este puede hacerse ya sea:

- a) Empleando los datos de estaciones hidrométricas.
- b) Combinando los registros de estaciones hidrométricas y un análisis regional.
- c) Utilizando únicamente el análisis regional.

2.2.7. DESCARGAS MÁXIMAS.

Monsalve, S. (1995). Indica que el caudal de valor alto de un río en comparación a las descargas habitualmente observadas. Estos caudales son causantes de daños en la Ingeniería. Para prevenir estos daños es que se hace necesario una evaluación cuantitativa de las crecidas. Por eso es importante diseñar obras hidráulicas que permitan el paso de las crecientes sin sufrir daño), sin embargo que.

Crochín, S. (1983). Indica que es el caudal de valor alto normal estándar se expresa mediante la siguiente de un río en comparación a las descargas ecuación: habitualmente observadas. Las tablas evaluación cuantitativa de las crecidas. Por eso es de distribución normal estándar, o mediante es importante diseñar obras hidráulicas que permitan técnicas de métodos numéricos (integración el paso de las crecientes sin que sufran daño.

La descarga o caudal, es el volumen de escorrentía superficial por unidad de tiempo, $Q=V/t$, es la principal variable que caracteriza la escorrentía superficial.

Las descargas son evaluadas usando diferentes métodos de aforo, con los datos de aforo se obtienen las curvas de descargas los que a su vez son utilizados para estimar las descargas para diferentes niveles de agua que ha ocupado a través del tiempo en una determinada sección hidrométrica, éstos datos al ser ploteados en coordenadas cartesianas se denominan como hidrogramas. Un río presenta un régimen de descarga que puede expresarse de diferentes formas,

pudiéndose obtener los siguientes datos representativos: máximas instantáneas, mínimas instantáneas, promedio de mínimas, promedio de máximas, descarga promedio diario, descarga mensual promedio, módulo anual, descarga mensual del año promedio, caudal específico, etc.

- **Componentes del caudal.**

Guevara, Carlos (2004). Menciona que el escurrimiento o caudal se conforma de cuatro procesos o componentes que se diferencian por el tiempo que tardan en llegar a la estación de medición y por la vía de llegada: Escurrimiento superficial, escurrimiento subsuperficial, escurrimiento subterráneo y lluvia que cae sobre el cauce.

2.2.8. ANÁLISIS DE FRECUENCIA.

Ashkar, (1993). Manifiesta que. El análisis de frecuencia es una herramienta utilizada para predecir el comportamiento futuro de los caudales en un sitio de interés, a partir de la información histórica de caudales.

Es un método basado en procedimientos estadísticos, que permite calcular la magnitud del caudal asociado a un período de retorno. Su confiabilidad depende de la longitud y calidad de la serie histórica, además de la incertidumbre propia de la distribución de probabilidades seleccionada. Cuando se pretende realizar extrapolaciones a períodos de retorno mayores que la longitud de la serie disponible, el error relativo asociado a la distribución de probabilidades utilizada es más importante, mientras que en interpolaciones, la incertidumbre está asociada principalmente a la calidad de los datos a modelar; en ambos casos la incertidumbre es alta dependiendo de la cantidad de datos disponibles.

El análisis de frecuencia consiste en determinar los parámetros de las distribuciones de probabilidad y determinar con el factor de frecuencia la magnitud del evento para un período de retorno dado. Para determinar la magnitud de eventos extremos, cuando la distribución de probabilidades no es una función fácilmente invertible, se requiere conocer la variación de la variable respecto a la media.

2.2.9. LOS CUANTILES REGIONALES.

La Serena, C. (2008). Los cuantiles son valores asociados a un determinado valor de probabilidad, dependiente de una función de distribución acumulada de probabilidad especificada en sus parámetros.

El software LRAP junto con determinar la o las distribuciones de probabilidad de mejor ajuste a la serie de datos pertenecientes a una región homogénea, determina al mismo tiempo los parámetros de la distribución, medidas a partir de las cuales se calculan los cuantiles para un set de valores de probabilidad.

2.3. HIPOTESIS DE LA INVESTIGACION.

2.3.1. HIPÓTESIS GENERAL.

- El modelo regional permite estimar las máximas avenidas en la cuenca del río Callacame.

2.3.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICO.

- Los parámetros geomorfológicos se estiman mediante el sistema de información geográfica.
- La función de distribución teórica se ajusta a las máximas avenidas.
- Los cuantiles regionales permiten estimar las máximas avenidas para diferentes periodos de retorno.

III. MATERIALES Y METODOS.

3.1. MATERIALES.

Dentro de los materiales utilizados en la ejecución de esta investigación se tienen los siguientes:

- Equipo de cómputo e impresión.
- Programas de cómputo (Microsoft Word, Microsoft Excel, Microsoft Power Point, AutoCAD, Hidroesta 2, etc.
- Información cartográfica: Cartas Nacionales escala 1:100,000 elaboradas por el Instituto Geográfico Militar.
- Información hidrometeorológica: Registros históricos de descargas máximos mensuales de las cuencas de los: río Ilave, río Callacame y río Zapatillas.
- Material bibliográfico adquirido y existente: textos, trabajos de investigación, revistas y artículos.
- Útiles de escritorio.

3.1.1. UBICACIÓN DEL ESTUDIO.

El ámbito del proyecto en estudio políticamente se ubica en el departamento de Puno, provincia de Chucuito en el distrito de Huacullani, en el lugar conocido también como Pichu Pichuni, exactamente aguas debajo de la confluencia de los ríos Callacame y Causillumá, que pertenece a la cuenca del río Callacame.

3.1.2. UBICACIÓN GEOGRÁFICA.

Región natural: Sierra (Altiplano de Puno)

Altitud : 3,850 a 4,600 msnm.

Coordenadas: N= 8'156,000 a 8'184,000

E= 440,000 a 468,000.

3.1.3. UBICACIÓN POLÍTICA.

- **Las características de la zona de estudio de investigación.**

El presente proyecto se encuentra en la zona de:

Región : Puno

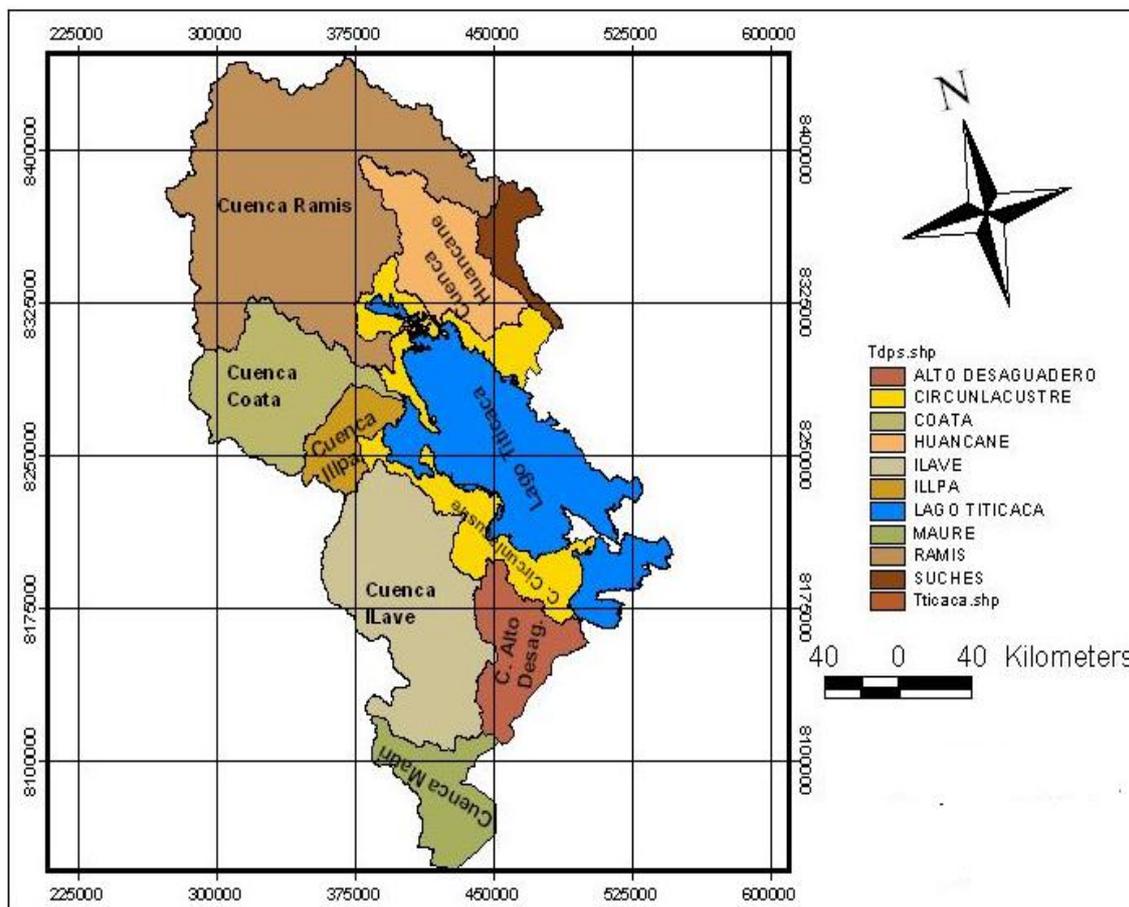
Provincia : Chucuito

Distrito : Huacullani

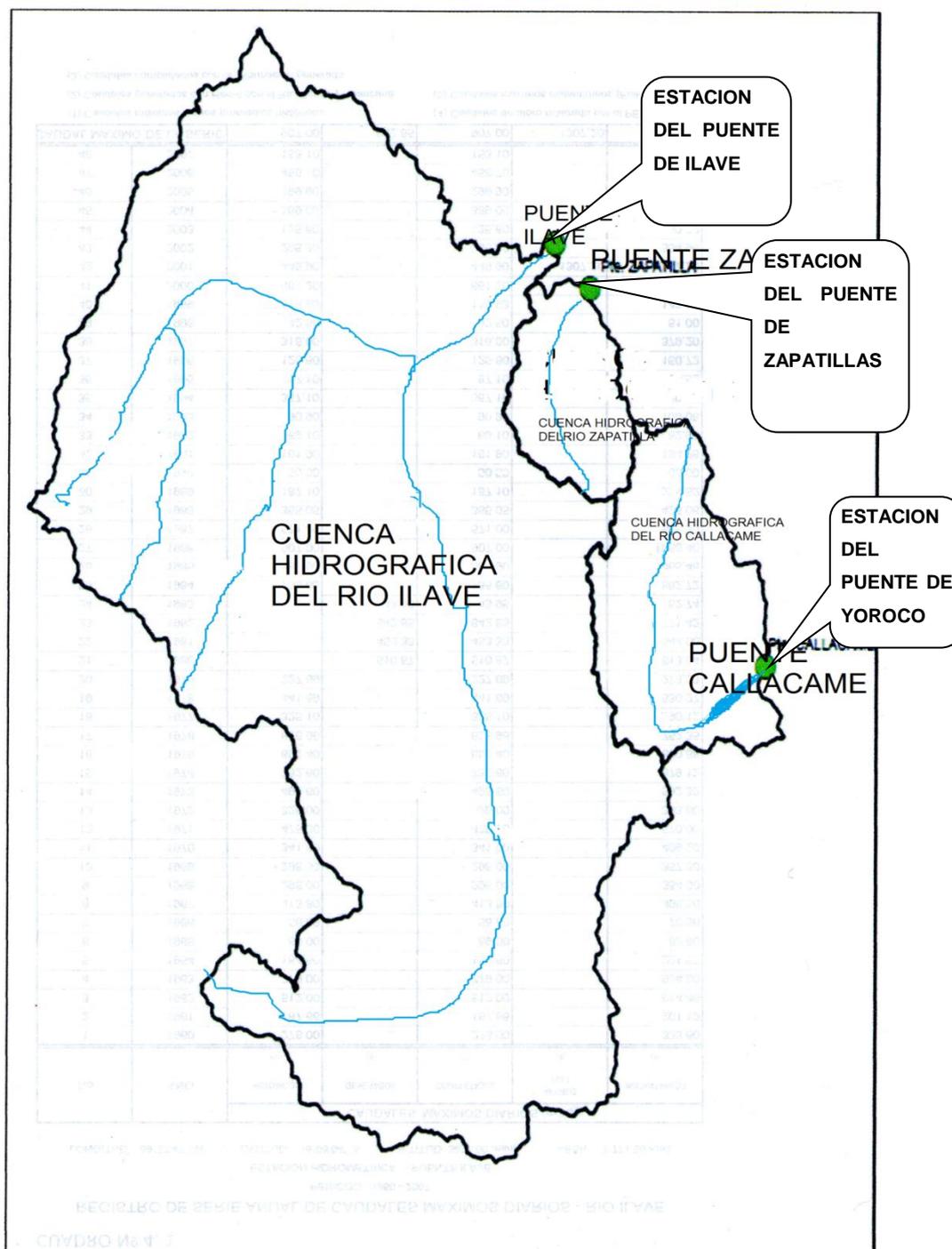
Comunidades: Pichu pichuni, Yohoro, Ccumu Huacullani, Challacollo y Ancomarca.

MAPA N°. 01

Cuencas hidrográficas de la región de Puno.



MAPA N°. 02 Cuenca delimitada para el proyecto de investigación: conformando tres grandes cuencas hidrográficas de la región sur de Puno.



3.2. METODOS.

3.2.1. RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA.

Los datos se han obtenidos de SENAMHI. La serie histórica de caudales máximos mensuales y anuales del río llave, río Callacame y río Zapatillas se presenta en el siguiente capítulo, Esta información nos permitirá determinar los caudales máximos para diferentes periodos de retorno, mediante los métodos probabilísticos y modelo regional, los mismos fueron proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. Los periodos de registro de caudales máximos del río llave, río Zapatillas y río Callacame.

3.2.2. CARACTERIZACION DE LA CUENCA.

La cuenca como unidad dinámica y natural, refleja las acciones recíprocas entre el suelo, los factores geológicos, el agua y la vegetación, proporcionando un resultado de efecto común: escurrimiento o corriente de agua por medio del cual los efectos netos de estas acciones recíprocas sobre este resultado pueden ser apreciadas y valoradas.

Estos factores físicos o geomorfológicos son considerados generalmente en forma aislada, sin tener en cuenta la posible interdependencia entre ellos y se representan en forma numérica.

Las dos primeras categorías de medición son planimétricas, es decir, tratan de propiedades proyectadas sobre un plano horizontal. La tercera categoría, trata de la desigualdad vertical de la forma de la cuenca.

En lo que respecta a este ítem, se desarrolló el marco teórico y el cálculo de los principales parámetros geomorfológicos de las cuencas que se encuentran en el Área de Proyecto del río Callacame asociados a su capacidad de respuesta a la precipitación en forma de escorrentía, tales como: Área. Perímetro, Longitud del Cauce Principal, Ancho Promedio, Coeficiente de Compacidad. Factor de forma, Grado de Ramificación, Densidad de drenaje y Pendiente Media.

3.2.2.1. ÁREA DE CUENCA.

La superficie de la cuenca delimitada por el divisor topográfico, corresponde a la superficie de la misma proyectada en un plano horizontal, y su tamaño influye en forma directa sobre las características de los escurrimientos fluviales y sobre la amplitud de las fluctuaciones. Las áreas de las cuencas en los puntos de interés.

3.2.2.2. PERÍMETRO DE LA CUENCA.

El perímetro de la cuenca está definido por la longitud de la línea de división de aguas (Divortium Aquarium).

3.2.2.3. LONGITUD MAYOR DEL RÍO (L).

Recibe este nombre, el mayor cauce longitudinal que tiene una cuenca determinada, es decir, el mayor recorrido que realiza el río desde la cabecera de la cuenca, siguiendo todos los cambios de dirección o sinuosidades hasta un punto fijo de interés, que puede ser una estación de aforo o desembocadura.

3.2.2.4. FORMA DE LA CUENCA.

Es la que determina la distribución de las descargas de agua a lo largo del curso principal o cursos principales, y es en gran parte responsable de las características de las crecientes que se presentan en la cuenca.

Es expresada por parámetros, tales como el Ancho Promedio, Coeficiente de Compacidad y el Factor de forma.

a) Ancho promedio de cuenca.

Es la relación entre el área de la cuenca y la longitud mayor del curso del río, la expresión es la siguiente:

$$A_p = \frac{A}{L}$$

Dónde:

A_p = Ancho promedio de la cuenca (Km.)

A = Área de la cuenca

L = Longitud mayor del curso principal

b). Coeficiente de compacidad (kc).

O índice de Gravelious, constituye la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de una circunferencia cuya área - igual a la de un círculo - es equivalente al área de la cuenca en estudio.

Su fórmula es la siguiente:

$$Kc = 0.28 * \sqrt{P}/A$$

Siendo:

Kc = Coeficiente de Compacidad (Km/Km²)

P = Perímetro de la cuenca (Km.)

A = Área de la cuenca (Km²)

Una cuenca se aproximará a una forma circular cuando el valor Kc se acerque a la unidad

Cuando se aleja de la unidad, presente una relación irregular con relación al círculo.

Si este coeficiente fuera igual a la unidad, significa que habrá mayores oportunidades de crecientes debido a que los tiempos de Concentración, Tc (duración necesaria para que una gota de agua que cae en el punto más alejado de aquella, llegue a la salida o desembocadura), de los diferentes puntos de la cuenca serían iguales.

De igual modo, cuanto mayor sea el valor de Kc, también será mayor el tiempo de concentración de las aguas y. por tanto, estará menos propensa a una inundación.

Generalmente en cuencas muy alargadas el valor de Kc, es mayor que 2.

Un valor de Kc. menor que 1. Nos indica una cuenca de forma circular, siguiendo el desarrollo de su curso principal, debiendo estar más expuesta a las crecientes que una cuenca de forma redondeada.

C). Factor de forma (Ff).

Es otro índice numérico con el que se puede expresar la forma y la mayor o menor tendencia a crecientes de una cuenca.

Es la relación entre el ancho promedio de la cuenca (A_m) y la longitud del curso de agua más largo (L).

La expresión es la siguiente

$$Ff = \frac{Ap}{L}$$

Siendo:

Ff = Factor de Forma

Ap = Ancho promedio de la cuenca (Km.)

L = Longitud del curso más largo (Km.)

Una cuenca con Factor de Forma bajo, está sujeta a menos crecientes que otra del mismo tamaño pero con un Factor de Forma mayor.

3.2.2.5. DENSIDAD DE DRENAJE.

El sistema de drenaje de una cuenca está conformado por un curso de agua principal y sus tributarios: observándose por lo general, que cuanto más largo sea el curso de agua principal, más llena de bifurcaciones será la red de drenaje.

Con la finalidad de determinar las características de dicha red, se definen los siguientes índices:

a). Grado de ramificación.

Para definir el grado de ramificación de un curso de agua principal, se ha considerado el grado de bifurcaciones dentro de la cuenca presentan. El procedimiento más común para esta clasificación, es considerar como corrientes de orden uno, aquellos que no tienen ningún tributario, de orden dos a los que solo tienen tributarios de orden uno, de orden tres, aquellas corrientes con dos o más tributarios de orden dos, etc. Así, el orden de la principal, indicara la extensión de la red de corrientes dentro de la cuenca.

b). Densidad de drenaje.

Indica la relación entre la longitud total de los cursos de agua: efímeros, intermitentes y perennes de una cuenca (L_i) y el área total de la misma (A).

Valores altos de densidad refleja una cuenca muy bien drenada que debería responder relativamente rápido al influjo de la precipitación, es decir que las precipitaciones influirán inmediatamente sobre las descargas de los ríos (Tiempos de Concentración cortos).

Una cuenca con baja densidad de drenaje refleja un área pobremente drenada con respuesta hidrológica muy lenta. Una baja densidad de drenaje es favorecida en regiones donde el material del subsuelo es altamente resistente bajo una cubierta de vegetación muy densa y de relieve plano.

La densidad de drenaje tiende a uno en ciertas regiones desérticas de topografía plana y terrenos arenosos, y a un valor alto en regiones húmedas, montañosas y de terrenos impermeables.

Esta última situación es la más favorable, pues si una cuenca posee una red de drenaje bien desarrollada, la extensión media de los terrenos a través de los cuales se produce el escurrimiento superficial es corto y el tiempo en alcanzar los cursos de agua también será corto; por consiguiente la intensidad de las precipitaciones influirá inmediatamente sobre el volumen de las descargas de los ríos.

La expresión es la siguiente:

$$Dd = \frac{Li}{A}$$

Siendo:

Dd = Densidad de drenaje (Km/Km²)

Li = Longitud total de los cursos de agua (Km/Km²)

A = Área de la cuenca (Km²)

Monsalve, refiere que Dd usualmente toma los siguientes valores:

Entre 0.5 Km/Km² para hoyas con drenaje pobre.

Hasta 3.5 Km/Km² para hoyas excepcionalmente bien drenados.

3.2.2.6. PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA.

El agua superficial concentrada en los lechos fluviales escurre con una velocidad que depende directamente de la declividad de éstos, así a mayor declividad habrá mayor velocidad de escurrimiento. La pendiente media del río es un parámetro empleado para determinar la declividad de un curso de agua entre dos puntos.

Se determina mediante la siguiente expresión:

$$I_c = \frac{(HM - Hm)}{1000 * L}$$

Siendo:

I_c = Pendiente media del río

L = longitud del río

HM y Hm = Altitud Máxima y mínima del lecho del río, referidas al nivel medio de las aguas del mar.

3.3. DETERMINACION DE LAS AVENIDAS MAXIMAS DE DISEÑO MEDIANTE LA UTILIZACION DE METODOS PROBABILISTICOS.

Se determinara el modelo regional aplicado a las avenidas máximas instantáneas de diseño mediante los métodos probabilísticos, siguiendo el siguiente procedimiento:

3.3.1. MODELOS DE DISTRIBUCION.

El análisis de frecuencias tiene la finalidad de estimar precipitaciones, intensidades o caudales máximos, según sea el caso, para diferentes períodos de retorno, mediante la aplicación de modelos probabilísticos, los cuales pueden ser discretos o continuos.

En la estadística existen diversas funciones de distribución de probabilidad teóricas; para la determinación de las avenidas de diseño en la cuenca del río Callacame se utilizara las siguientes funciones:

- Distribución Normal.

- Distribución Log Normal 2 parámetros.
- Distribución Log Normal 3 parámetros.
- Distribución Gamma 2 parámetros.
- Distribución Gamma 3 parámetros.
- Distribución Log Pearson tipo III.
- Distribución Gumbel.
- Distribución Log Gumbel.

3.3.2. DISTRIBUCIÓN NORMAL.

La función de densidad de probabilidad normal se define como:

$$f(x) = \frac{1}{S\sqrt{(2\pi)}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{S}\right)^2}$$

Dónde

$f(x)$ = función densidad normal de la variable x .

X = variable independiente.

μ = parámetro de localización, igual a la media aritmética de x .

S = parámetro de escala, igual a la desviación estándar de x .

3.3.3. DISTRIBUCIÓN LOG NORMAL 2 PARAMETROS.

La función de distribución de probabilidad es:

$$P(x \leq x_i) = \frac{1}{S\sqrt{(2\pi)}} \int_{-\infty}^{x_i} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2S^2}} dx$$

Dónde μ y S son los parámetros de la distribución. X y S

Si la variable x de la ecuación (2) se reemplaza por una función $y=f(x)$, tal que $y=\log(x)$, la función puede normalizarse,

Transformándose en una ley de probabilidades denominada log – normal, $N(Y, S_y)$. Los valores originales de la variable aleatoria x , deben ser transformados a $y = \log x$, de tal manera que:

$$Y = \sum_{i=1}^n \log x_i / n$$

Y : Dónde es la media de los datos de la muestra transformada.

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - Y)^2}{n - 1}}$$

Dónde:

S_y , es la desviación estándar de los datos de la muestra transformada.

Asimismo; se tiene las siguientes relaciones:

$$cs = a/S^2y$$

$$a = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n (y_i - Y)^3$$

Dónde:

Cs , es el coeficiente de oblicuidad de los datos de la muestra transformada.

(Monsalve, 1999).

3.3.4. DISTRIBUCIÓN LOG NORMAL 3 PARÁMETROS.

La función de densidad de x es:

$$f(x) = \frac{1}{(x - x_0)\sqrt{(2\pi)S_y}} e^{-1/2[\ln(x-x_0)-u_y/S_y]}$$

Para $x > x_0$

Dónde:

X_0 : parámetro de posición

U : parámetro de escala o media

S^2 : parámetro de forma o varianza

3.3.5. DISTRIBUCIÓN GAMMA 2 PARÁMETROS.

La función de densidad es:

$$f(x) = \frac{x^{\gamma-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^{\gamma} \Gamma(\gamma)}$$

Válido para:

$$0 \leq x < \infty$$

$$0 < \gamma < \infty$$

$$0 < \beta < \infty$$

Dónde:

γ : parámetro de forma

β : parámetro de escala

3.3.6. DISTRIBUCIÓN GAMMA 3 PARÁMETROS.

La función de densidad es:

$$f(x) = \frac{(x - x_0)^{\gamma-1} e^{-\frac{(x-x_0)}{\beta}}}{\beta^{\gamma} \Gamma(\gamma)}$$

Válido para:

$$x_0 \leq x < \infty$$

$$-\infty < x_0 < \infty$$

$$0 < \beta < \infty$$

$$0 < \gamma < \infty$$

Dónde:

x_0 : origen de la variable x , parámetro de posición

γ : parámetro de forma

β : parámetro de escala

3.3.7. DISTRIBUCIÓN LOG PEARSON TIPO III.

La función de densidad es:

$$f(x) = \frac{(\ln x - x_0)^{\gamma-1} e^{-\frac{(\ln x - x_0)}{\beta}}}{x \beta^\gamma \Gamma(\gamma)}$$

Válido para:

$$x_0 \leq x < \infty$$

$$-\infty < x_0 < \infty$$

$$0 < \beta < \infty$$

$$0 < \gamma < \infty$$

Dónde:

x_0 : parámetro de posición

γ : parámetro de forma

β : parámetro de escala

3.3.8. DISTRIBUCIÓN GUMBEL.

La distribución de Valores Tipo I conocida como Distribución Gumbel o Doble Exponencial, tiene como función de distribución de probabilidades la siguiente expresión:

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}}$$

Utilizando el método de momentos, se obtienen las siguientes relaciones:

$$\alpha = \frac{1.2825}{\sigma}$$

$$\beta = \mu - 0.45\sigma$$

Dónde:

: Parámetro de concentración. α

: Parámetro de localización. β

Según Chow, la distribución puede expresarse de la siguiente forma:

$$x = \bar{x} + k\sigma_x$$

Dónde:

x : Valor con una probabilidad dada.

\bar{x} : Media de la serie.

k : Factor de frecuencia.

3.3.9. DISTRIBUCIÓN LOG GUMBEL.

La variable aleatoria reducida log Gumbel, se define como:

$$y = \frac{\ln x - \mu}{\alpha}$$

Con lo cual, la función acumulada reducida log Gumbel es:

$$G(y) = e^{-e^y}$$

3.4. PRUEBAS DE BONDAD DE AJUSTE.

Las pruebas de bondad de ajuste son pruebas de hipótesis que se usan para evaluar si un conjunto de datos es una muestra independiente de la distribución elegida.

En la teoría estadística, las pruebas de bondad de ajuste más conocidas son la χ^2 y la Kolmogorov – Smirnov, las cuales se describen a continuación.

3.5. PRUEBA χ^2 .

Esta prueba fue propuesta por Karl Pearson en (1900), se aplica para verificar bondad de las distribuciones normales y log normales.

Para aplicar la prueba, el primer paso es dividir los datos en un número k de intervalos de clase. Luego se calcula el parámetro estadístico:

$$D = \sum_{i=1}^k (\theta_i - \varepsilon_i)^2 / \varepsilon_i$$

Dónde:

θ_i Es el número observado de eventos en el intervalo i y ε_i es el número esperado de eventos en el mismo intervalo.

ε_i Se calcula como:

$$\varepsilon_i = n[F(S_i) - F(I_i)] \quad i= 1, 2... k$$

Asimismo; $F(S_i)$ es la función de distribución de probabilidad en el límite superior del intervalo i , $F(I_i)$ es la misma función en el límite inferior y n es el número de eventos.

Una vez calculado el parámetro D para cada función de distribución considerada, se determina el valor de una variable aleatoria con distribución χ^2 para $v = k-1-m$ grados de libertad y un nivel de significancia α , donde m es el número de parámetros estimados a partir de los datos.

Para aceptar una función de distribución dada, se debe cumplir:

$$D \leq X_{1-\alpha, k-1-m}^2$$

El valor de $X_{1-\alpha, k-1-m}^2$ se obtiene de tablas de la función de distribución X^2

Cabe recalcar que la prueba del X^2 , desde un punto de vista matemático solo debería usarse para comprobar la normalidad de las funciones normal y Log normal.

3.6. PRUEBA KOLMOGOROV – SMIRNOV.

Aparicio, (1996). Método por el cual se comprueba la bondad de ajuste de las distribuciones, asimismo permite elegir la más representativa, es decir la de mejor ajuste.

Esta prueba consiste en comparar el máximo valor absoluto de la diferencia D entre la función de distribución de probabilidad observada $F_o(x_m)$ y la estimada $F(x_m)$:

$$D = \text{máx} / F_o(x_m) - F(x_m)$$

Con un valor crítico d que depende del número de datos y el nivel de significancia seleccionado. Si $D < d$, se acepta la hipótesis nula. Esta prueba tiene la ventaja sobre la prueba de X^2 de que compara los datos con el modelo estadístico sin necesidad de agruparlos. La función de distribución de probabilidad observada se calcula como:

$$F(x_m) = 1 - m / (n+1)$$

Donde m es el número de orden de dato x_m en una lista de mayor a menor y n es el número total de datos.

- La prueba Smirnov-Kolmogorov.- consiste en comparar las diferencias existentes entre la probabilidad empírica de los datos de la muestra y la probabilidad teórica, tomando el valor máximo del valor absoluto, de la diferencia entre el valor observado y el valor de la recta teórica del modelo, es decir:

$$\Delta = \text{máx. } |F(x) - P(x)|$$

Dónde:

Δ = estadístico de Smirnov-Kolmogorov, cuyo valor es igual a la diferencia máxima existente entre la probabilidad ajustada y la probabilidad empírica.

$F(x)$ = probabilidad de la distribución de ajuste o teórica.

$P(x)$ = Probabilidad experimental o empírica de los datos, denominada también frecuencia acumulada.

Las ventajas y limitaciones de esta prueba son:

- No requiere un conocimiento a priori de la función de distribución teórica.
- Es aplicable a distribuciones de datos no agrupados, es decir, no se requiere hacer intervalo de clase.
- Es aplicable a cualquier distribución teórica.

- Se aplica en la función de distribución acumulada y no en la función de densidad.
- Comparándola con la prueba chi – cuadrado, no hay condición de que cada clase de frecuencia deba contener un mínimo de 5 valores observados.

No es una prueba exacta, sino una prueba aproximada.

3.7. RELACIÓN ENTRE EN PERIODO DE RETORNO Y FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ACUMULADA.

Las ecuaciones de función de distribución acumulada $F(x)$, se representa mediante la siguiente ecuación.

$$F(x) = P(X < x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx.$$

La ecuación expresa una probabilidad que el suceso no ocurra. En este caso el periodo de retorno (T) se calcula mediante la siguiente expresión.

$$T = \frac{1}{P(x \geq X)} = \frac{1}{1 - P(X > x)} = \frac{1}{1 - F(x)}$$

En la ingeniería los diseños se hacen para soportar los eventos máximos es decir en un determinado evento no se ha superado, en un periodo de retorno determinado, por lo tanto los diseños se realizan para periodos de retorno, es decir los valores de $F(x)$, se estiman para un tiempo de retorno dado mediante la siguiente ecuación.

$$F = 1 - \frac{1}{T}$$

3.8. REGIONALIZACION DE LOS CAUDALES MAXIMOS.

Encontró para los caudales máximos instantáneos anuales de una estación hidrométrica ecuaciones del tipo:

Dónde:

$$Q = a (\ln (T))+b$$

Q = Caudal máximo instantáneo anual (m /s).

a, b = Constantes para la estación hidrométrica.

T= Período de retorno (años).

$$Q = aA^bT^c$$

Dónde:

Q = Caudal máximo instantáneo anual (m³/s).

a,b,c,d: Parámetros regionales por determinar.

T = Periodo de retorno.

A = Área de la sub cuenca.

$$Q = aA^{b(c+d(\log(T)))}$$

Dónde:

Q = Caudal máximo instantáneo anual (m³/s).

a,b,c,d = Parámetros regionales por determinar.

T = Periodo de retorno.

A = Área de la sub cuenca.

$$Q = aA^b$$

Dónde:

Q = Caudal máximo instantáneo anual (m³/s).

a,b= Parámetros por determinar.

La estimación de caudales máximos para diferentes periodos de retorno es uno de los principales procedimientos en hidrología, que tiene como fin la determinación del caudal de diseño para una determinada estructura hidráulica.

La metodología más común para la determinación de estos caudales máximos, es la metodología estadística lo cual ajusta los datos registrales en una estación hidrométrica a una función de distribución y determina los valores para diferentes periodos de retorno.

La regionalización de los caudales máximos se realizó para los periodos de retorno de 5, 10, 15, 20, 25, 50, 100 años los pasos que se llevaron a cabo fueron los siguientes:

- a. Análisis de información, para establecer la confiabilidad de la información de caudales máximos registrados en las estaciones hidrométricas analizadas.
- b. Función de distribución de mejor ajuste a la serie de caudales máximos adimensionales de cada región homogénea y determinación de factores para el cálculo de los caudales para cada periodo de retorno.

3.9. MÉTODO DE FULLER.

Según la información del SENAMHI, los caudales máximos del río Ilave, río Callacame y río Zapatillas son caudales máximos promedios diarios, vale decir, promedio de tres valores o lecturas anuales, y por lo tanto no son datos instantáneos, por este razón se convirtieron los caudales máximos anuales diarios a instantáneos mediante la aplicación del **Método de Fuller**, que se

fundamenta en función del área de la cuenca, y ésta información de datos instantáneos es la que sirve para el análisis de máximas avenidas.

Fórmula de Fuller:

$$Q_{inst} = Q_{m\acute{a}x} \left(1 + \frac{2.66}{A^{0.33}} \right)$$

Dónde: Q_{inst} = Caudal máximo instantáneo (m³/s).

$Q_{m\acute{a}x}$ = Caudal máximo medio diario (m³/s).

A = Área de la cuenca de interés (Km²).

Para el diseño de estructuras hidráulicas, la información hidrométrica deben ser valores máximos instantáneos, no los valores medios diarios, sabiendo que una estructura hidráulica construida en el río debe soportar a la máxima avenida instantánea.

En el registro de caudales máximos del río llave, en el año 2001 muestra menor al valor obtenido mediante el aforo realizado en el mismo año por el PELT (Proyecto Especial Binacional Lago Titicaca) y ello será reemplazado y corregido con el dato del aforo, dicho valor es instantáneo y no siendo necesario convertir con el método de Fuller.

3.10. ESTIMACIÓN DE LOS CUANTILES REGIONALES.

3.10.1. ESTIMACIÓN DE CUANTILES.

$$\lambda^R(J) = \sum_{S=1}^M \lambda(S) j. \left(\frac{NS}{L}\right)$$

Dónde:

la contribución de cada estación con N_i observaciones al promedio se pondera en función de la longitud de la serie como:

$$L = \sum_{j=1}^M N_j$$

Obtenidos los L-momentos muestrales y caracterizada a través de ellos la función de distribución acumulada, se puede plantear $x = x(F)$ para distintos períodos de retorno

y obtener los cuantiles dividiendo estos valores extremos de la variable por la media anual muestral.

3.11. MODELO REGIONAL PARA LAS DESCARGAS MÁXIMAS.

Hasta hace poco, los esfuerzos para pronosticar avenidas centraban su interés únicamente en la descarga máxima de la avenida, relacionando la ocurrencia del gasto pico con los parámetros meteorológicos y fisiográficos de una cuenca. En la actualidad se cuenta con métodos más completos que consideran la presencia de distintas condiciones meteorológicas. La principal utilidad de los métodos para la predicción de avenidas, radica en que al tener una idea anticipada de las avenidas que están por ocurrir, es posible aprovechar al máximo los mecanismos de control, como en el caso de presas.

La avenida que más interesa conocer para la protección de las obras hidráulicas y asentamientos en los valles que atraviesa un río, es la máxima instantánea. Se entiende por forma de la avenida, la distribución de los porcentajes respecto al gasto máximo de los gastos correspondientes a los tiempos transcurridos a partir del momento en que se inicia la avenida, el período de retorno (T_r), sirve para conocer el gasto máximo con el cual se proyectarán las obras hidráulicas mencionadas a lo largo del curso, eligiendo el período de retorno más adecuado tomando en cuenta la vida útil de la obra, así como su aspecto económico. Para la estimación de una avenida máxima se dispone de variadísimos métodos de cálculo, los mismos que pueden ser agrupados en términos generales en orden de importancia creciente.

- Métodos Empíricos
- Métodos Históricos.
- Métodos de Correlación Hidrológica de Cuencas.
- Métodos Estadísticos o Probabilísticos.

El modelo regional para las descargas máximas anuales se estimará mediante fórmulas empíricas. Este método es más antiguo y consiste en establecer una relación funcional entre la magnitud de una creciente y una o más variables.

El modelo que mejor explicó el caudal es el que incluye como variables independientes al área de la cuenca y precipitación media anual. Su expresión matemática es la siguiente:

$$Q = (2,67 \cdot 10^{-6}) \cdot A^{1.01} \cdot P^{1.228}$$

Sin embargo, un resultado más “parsimonioso” resulta de aplicar la ecuación que tiene en cuenta solo el área:

$$Q = C A^n$$

Dónde:

C = coeficiente de la proporcionalidad.

A = área de cuenca.

N = exponente de la regionalización.

Si se tiene los valores caudales de máximas avenidas de dos estaciones hidrométricas para diferentes periodos de retorno por ejemplo el caso de río Callacame, el río de llave y río Zapatillas, se puede obtener los valores de la exponente **n**, con la siguiente expresión.

$$n = \frac{\log(Q1/Q2)}{\log(A1/A2)}$$

Dónde:

Q1 y Q2 = Caudales máximos de la estación 1 y 2 respectivamente.

A1 y A2 = Área de la cuenca de la estación 1 y 2 respectivamente.

Se muestra la relación entre la altitud y la precipitación media anual de las diferentes estaciones pluviométricas ubicados en el ámbito de estudio.

$$Q = 0.026 \cdot A^{0.989}$$

3.11.1. REGRESION LINEAL.

La regresión lineal es la que se adecua también para estimar los caudales máximos del presente trabajo de investigación.

Ajuste lineal: $P = c + dA$.

Los cálculos del nuevo ajuste lineal podrían ser realizados en una nueva hoja de cálculo aparte, con objeto de no mezclar los cálculos con los del ajuste realizado anteriormente, el ajuste lineal así obtenido establece que $P = 3.33776 - 1.9015A$.

3.11.2. REGRESION POTENCIAL.

La regresión potencial es la más adecuada para estimar los caudales máximos, la regresión potencial para el presente trabajo de investigación el análisis regional de avenidas para distintos periodos de retorno cuyos resultados se presentan.

$$QA^{-b} = a,$$

Siendo a y b dos parámetros desconocidos. A partir de sucesivas experiencias en el laboratorio, se han recogido los siguientes datos:

Estimar los parámetros a y b realizando el ajuste de la función potencial

$$P = QA^b$$

Para comenzar nuestros cálculos, disponemos los datos observados de las magnitudes Q y A.

El planteamiento para ajustar la función potencial $P = QA^b$ es el siguiente. Vamos a considerar su forma lineal equivalente obtenida al aplicar logaritmo Neperiano en su expresión, es decir,

$$\ln(Q) = \ln(aA^b) = \ln(a) + b \ln(A) .$$

Obtenemos así la ecuación lineal $y = A + bx$, donde las nuevas magnitudes vienen dadas por $y = \ln(Q)$ y $x = \ln(A)$ y, además, el nuevo parámetro es $A = \ln(a)$. De esta forma, procederemos a ajustar el modelo lineal auxiliar anterior, obteniendo así estimaciones para los parámetros A y b . Así, la función potencial ajustada vendrá dada por las estimaciones de a y b , siendo $a = \exp(A)$. Finalmente, el grado de adecuación de un modelo $P = F(A)$ a los datos, la bondad de ajuste para dicho modelo, será cuantificado a través del error típico:

Ajuste potencial:

$$P = CA^n$$

A partir del ajuste lineal anterior, los parámetros de la función potencial son obtenidos sabiendo que $a = \exp(A)$. De esta forma, la función potencial ajustada en la Figura 1 viene dada por:

$$P = 1.01197 A^{-1.383}$$

Por tanto, el modelo potencial representa con mayor precisión, la dependencia de la potencia respecto a las descargas máximas.

3.12. LA ESTIMACIÓN DE EXPONENTES REGIONALES.

Considerando la metodología indicado en el capítulo anterior, se ha determinado los exponentes regionales para el presente trabajo de investigación a partir de análisis regional de avenidas para distintos periodos de retorno, cuyos resultados se presentan.

3.13. MODELO REGIONAL.

Para aplicar el método regional para la estimación de caudales máximos en cualquier punto del país se sigue la siguiente metodología:

Considerando la ecuación general del modelo regional para determinar descargas máximas en un punto de enteres de la cuenca del río zapatilla, río llave y río Callacame para un periodo de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 10 y 200 años los resultados de la estimación de los caudales máximos en los indicados de punto de enteres.

$$Q = C A^n$$

Dónde:

C = coeficiente de la proporcionalidad.

A = área de cuenca.

N = exponente de la regionalización.

Si se tiene valores de caudales de avenidas de dos estaciones hidrométricas para diferentes periodos de retorno por ejemplo el caso de río llave, río Callacame y río Zapatilla, se puede obtener el valor de la exponente n con la siguiente expresión.

$$n = \frac{\log\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)}{\log\left(\frac{A_1}{A_2}\right)}$$

Dónde:

Q1 y Q2 = caudales máximos de la estación 1 y 2 respectivamente.

A1 y A2 = área de la cuenca de la estación 1 y 2 respectivamente.

Se muestra la relación entre la altitud y la precipitación media anual de las diferentes estaciones pluviométricas ubicados en el ámbito de estudio.

$$Q = 0.026 \cdot A^{0.989}$$

IV. RESULTADOS.

4.1. PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS DE LAS CUENCAS DE LOS RIOS ILAVE, CALLACAME Y ZAPATILLA.

Considerando la metodología indicado en capítulo anterior, los resultados de la estimación de los parámetros geomorfológicos de la cuenca del río llave, río Calacéame y río Zapatilla son los siguientes:

a. Área de las cuencas (A).

Los trabajos para la determinación del área de la cuenca, se efectuó a partir del plano, se realizó la delimitación de la cuenca y con el apoyo del programa de Arcgis se determinó el área de la cuenca del río Callacame siendo su valor:

- Área de la cuenca del río llave: $A = 7772.59$. Km².
- Área de la cuenca del río Callacame: $A = 852.99$. Km².
- Área de la cuenca del río Zapatilla: $A = 390.71$. Km².

b. Perímetro de las cuencas (p).

De igual modo los cálculos se realizó como el caso anterior, el perímetro se determinó con el apoyo del programa Arcgis, se ha obtenido el valor de:

- Perímetro de la cuenca del río llave: $P = 3693.03$ Km.
- Perímetro de la cuenca del río Callacame: $P = 195$ Km.
- Perímetro de la cuenca del río Zapatilla: $P = 52.20$ Km.

c. Longitud mayor del río (L).

En el plano se identificó el río principal con el apoyo del programa de Arcgis, se determinó que la longitud del río principal es de:

- Longitud mayor del río llave: $L = 211$ Km.
- Longitud mayor del río Callacame: $L = 108$ Km.
- Longitud mayor del río Zapatilla: $L = 28$ Km.

d. Forma de la cuenca.

Considerando las ecuaciones indicadas en el capítulo anterior los parámetros de la forma de la cuenca de los ríos son:

d.1 Ancho promedio.

A partir de las expresiones es de $Ap = A/L$; considerando que el $A = 852.99$ Km² y la longitud es de: $L = 195$ Km, entonces el ancho promedio de la cuenca del Callacame es de:

- Ancho promedio del río llave: $Ap. = 36.8$ Km.
- Ancho promedio del río Callacame: $Ap. = 7.9$ Km.
- Ancho promedio del río Zapatilla: $Ap. = 1.8$ Km.

d.2. Coeficiente de compacidad.

Considerando la siguiente relación $Kc = 0.28 * (P/A^{1/2})$ y los parámetros $P = 195$ Km. $A = 852.99$ Km² el coeficiente de compacidad o índice de Gravelius.

- Coeficiente de compacidad del río llave: $Kc = 0.83$ °.
- Coeficiente de compacidad del río Callacame: $Kc = 1.87$ °.
- Coeficiente de compacidad del río Zapatilla: $Kc = 1.14$ °.

Una cuenca se aproxima a una forma circular cuando el valor de K_c se acerque a la unidad, cuando mayor es el valor de K_c mayor es el tiempo de concentración, y la forma de la cuenca es irregular.

d.3. Factor de forma (Ff).

Este índice se obtuvo a partir de la expresión siguiente $Ff = A_p/L$.

Río llave: $Ff = 0.17$

Río Callacame: $Ff = 0.035$

Río Zapatilla: $Ff = 0.02$

CUADRO Nº 4.1

CARACTERISTICAS MORFOLOGICAS DE LA CUENCA DEL RIO CALLACAME.

CARACTERISTICAS MORFOLOGICAS DE LA CUENCA RIO CALACÉAME										
		FORMA DE LA CUENCA					SISTEMA DE DRENAJE			
Nombre de la cuenca	Punto de interés	Área total de la cuenca Km ²	perímetro total de la cuenca Km	longitud del cauce principal Km	Ancho de la cuenca Km	Coefficiente de compacidad Kc	Factor de forma	° de ramificación	Densidad de drenaje	Pendiente promedio
Río Ilave	estación hidrológico	7772.59	3,693.03	211.00	36.8	0.83	0.17	6	0.02	0.0055
Río Callacame	estación hidrológico	853	195	108	7,9	1.87	0.035	5	0.12	0.007
Río Zapatilla	Estación hidrológico	390.71	52.20	28	1.8	1.4	0.2	3	0.07	0.005

Fuente: Elaboración propia 2014.

4.1.1. UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS SENAMHI-PUNO.

CUADRO N° 4.2

Ubicación de las estaciones meteorológicas SENAMHI-PUNO.

UBICACIÓN GEOGRAFICA DE LAS ESTACIONES DE LA DIRECCIÓN REGIONAL DE PUNO												
Red de estaciones del Servicio Nacional Meteorología Hidrología SENAMHI.												
N°	CODIGO	ESTACION	CAT.	SISTEMA	CUENCA	DEPAR.	PROVINCIA	DISTRITO	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD	FECHA
				HIDROGRAFICO							M.S.N.M.	DE INICIO
1	210301	Pte. car. llave	HLG	Titicaca	llave	Puno	El Collao	llave	16 5 17.7	69 37 33.3	3850	1957
2	210502	Pte. Yoroco	HLG	Titicaca	Callacame	Puno	Chucuito	Huacullani	16 34 15.5	69 19 21 3	3851	1994
3	210801	Pte. Zapatilla	HLG	Titicaca	llave	Puno	El Collao	llave	16 8 25.4	69 34 15.4	3840	1967

Fuente: Elaboración propia 2014.

4.1.2. MÉTODO DE FULLER.

Según la información del SENAMHI, los caudales máximos del río llave, río Callacame y río Zapatillas son caudales máximos promedios diarios, vale decir, promedio de tres valores o lecturas diarias, y por lo tanto no son datos instantáneos, por este razón se convirtieron los caudales máximos medios diarios a instantáneos mediante la aplicación del **Método de Fuller**, que se fundamenta en función del área de la cuenca, y ésta información de datos instantáneos es la que sirve para el análisis de máximas avenidas.

Fórmula de Fuller:
$$Q_{inst} = Q_{m\acute{a}x} \left(1 + \frac{2.66}{A^{0.33}} \right)$$

Dónde: Q_{inst} = Caudal máximo instantáneo (m3/s).

$Q_{m\acute{a}x}$ = Caudal máximo medio diario (m3/s).

A = Área de la cuenca de interés (Km2).

- Reemplazando el área de la cuenca del río llave (7771.50) Km2, área a la estación hidrométrica), se obtiene un factor de 1.2 aproximadamente, se representa así:

$$Q_{inst} = 1.2 Q_{m\acute{a}x}$$

Reemplazando el área de la cuenca del río Callacame (852.99) Km2, área a la estación hidrométrica), se obtiene un factor de 1.3 aproximadamente, se representa así:

$$Q_{inst} = 1.3Q_{m\acute{a}x}$$

Reemplazando el área de la cuenca del río Zapatilla (390.71) Km², área a la estación hidrométrica), se obtiene un factor de 1.4 aproximadamente, se representa así:

$$Q_{inst} = 1.4Q_{m\acute{a}x}$$

4.1.3. DATOS DE LOS DESCARGAS MÁXIMOS ANUALES Y PROMEDIOS HISTÓRICOS.

Para contar con datos de las descargas máximas anuales se ha utilizado las estaciones hidrográficas de los ríos: llave Calacéame y Zapatilla. Los datos hidrométricos son de SENAMHI, es la institución que cuenta con los datos registrados hasta el momento.

CUADRO Nº 4. 3

REGISTRO DE SERIE ANUAL DE CAUDALES MÁXIMOS DIAREOS DEL RÍO ILAVE

PERIODO: 1960 AL 2007.

ESTACION HIDROMÉTRICA PUENTE ILAVE							
Nº	AÑO	HISTORICOS	INSTANTANEOS	Nº	AÑO	HISTORICOS	INSTANTANEOS
1	1960	278,0	333,6	26	1989	187,1	224,5
2	1961	167,66	201,2	27	1990	50,5	60,6
3	1962	512,0	614,4	28	1991	161,9	194,3
4	1963	779,0	934,8	29	1992	69,1	82,9
5	1964	184,0	220,8	30	1993	90,9	109,1
6	1965	69,0	82,8	31	1994	367,1	440,5
7	1966	58,8	70,6	32	1995	87,1	104,5
8	1967	413,8	496,6	33	1996	125,6	150,7
9	1968	295,0	354,0	34	1997	316,0	379,2
10	1969	298,0	357,6	35	1998	42,5	51,0
11	1970	341,0	409,2	36	1999	119,9	143,9
12	1971	475,0	570,0	37	2000	661,2	793,4
13	1972	328,0	393,6	38	2001	449,9	539,9
14	1973	493,0	591,6	39	2002	295,8	355,0
15	1974	732,6	879,1	40	2003	125,6	150,7
16	1975	692,4	830,9	41	2004	389,0	466,8
17	1976	626,9	752,3	42	2005	299,9	359,9
18	1977	325,1	390,1	43	2006	458,7	550,4
19	1978	441,8	530,2	44	2007	153,1	183,7
20	1979	227,6	273,1	Promedio		234,3	281,1
21	1984	735,6	882,7	Des. Estándar		166,4	199,7
22	1985	387,9	465,5				
23	1986	907,0	1088,4	Máximo		661,2	793,4
24	1987	571,0	685,2	Mínimo		42,5	51,0
25	1988	355,0	426,0				

- Caudales máximos diarios promedios históricos.

CUADRO N° 4,4

REGISTRO DE SERIE ANUAL DE CAUDALES MÁXIMOS DIAREOS DEL RÍO
CALLACAME

PERIODO: 1995 AL 2011.

ESTACIÓN HIDROMÉTRICA DEL PUENTE YOROCO.

ESTACIÓN HIDROMÉTRICA PUENTE
CALLACAME.

CAUDALES MÁXIMOS DIARIOS (m3/s)			
Nº	AÑO	HISTORICOS	INSTANTANEOS
1	1995	10,57	13,741
2	1996	4,1	5,33
3	1997	25,7	33,41
4	1999	54,66	71,058
5	2000	55,83	72,579
6	2001	213,19	277,147
7	2002	27,78	36,114
8	2003	46,38	60,294
9	2004	48,67	63,271
10	2005	18,6	24,18
11	2006	106,57	138,541
12	2007	9,7	12,61
13	2008	5,55	7,215
14	2009	32,97	42,861
15	2010	21,37	27,781
16	2011	33,66	43,758
Promedio		44,7063	58,11813
Des. Estándar		50,1009	65,1312
Máximo		213,19	277,147
Mínimo		4,1	5,33

- Caudales máximos diarios promedios histórico

CUADRO N° 4,5

REGISTRO DE SERIE ANUAL DE CAUDALES MÁXIMOS DIARIOS DEL RÍO ZAPATILLAS

PERIODO: 1992 AL 2011.

ESTACIÓN HIDROMÉTRICA DEL PUENTE ZAPATILLAS.

ESTACIÓN HIDROMÉTRICA PUENTE

ZAPATILLA

CAUDALES MÁXIMOS DIARIOS (m3/s)			
Nº	AÑO	HISTORICOS	INSTANTANEOS
1	1992	0,67	0,94
2	1993	1,21	1,69
3	1994	3,46	4,84
4	1995	1,51	2,11
5	1996	1,97	2,76
6	1997	8,5	11,90
7	1998	2,2	3,08
8	1999	2,31	3,23
9	2000	3,92	5,49
10	2001	33,46	46,84
11	2002	6,12	8,57
12	2003	8,94	12,52
13	2004	11,48	16,07
14	2005	2,13	2,98
15	2006	44,64	62,50
16	2007	12,4	17,36
17	2008	8,77	12,28
18	2009	2,54	3,56
19	2010	6,46	9,04
20	2011	19,05	26,67
Promedio		9,09	12,72
Des. Estándar		11,12	15,57
Máximo		44,64	62,50
Mínimo		0,67	0,94

- Caudales máximos diarios promedios históricos.

4.2. FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE MEJOR AJUSTE CON LOS DATOS HIDROLÓGICOS PARA LOS CAUDALES MÁXIMOS.

El método de regionalización se asume con una única muestra hidrológica por región, para lo cual los datos de caudales máximas avenidas de cada estación dentro de la región son divididos por su valor de caudal medio (el promedio de los caudales máximos), y se ajustan todos los datos de las estaciones de la región como la muestra hidrológica.

- El mejor ajuste de la prueba de Kolmogorov Smirnov del río llave es la distribución Gama de 3 parámetros, el valor calculado es igual a: 0.070 del delta teórico es el menor de todas las pruebas de distribución.

CUADRO N° 4.6 Resultados de la prueba de ajuste Kolmogorov – Smirnov río llave 2014.

Distribución	Delta teórica	Delta tabular	Diferencia	Se ajusta
Normal	0,099	0,1923	0,0928	Bueno
Log normal 2 pará.	0,081	0,1923	0,1106	Bueno
Log normal 3 par.	0,086	0,1923	0,1056	Bueno
Gama 2 parámetros	0,084	0,1923	0,1077	Bueno
Gama 3 parámetros	0,07	0,1923	0,1217	Bueno
Log Pearson tipo III	0,083	0,1923	0,1093	Bueno
Gumbel	0,088	0,1923	0,1036	Bueno

Fuente: Elaboración propia 2014.

El mejor ajuste de la prueba de Kolmogorov Smirnov del río Callacame es la distribución Gama de 3 parámetros, el valor calculado es igual a: 0.070 del delta teórico es el menor de todas las pruebas de distribución.

CUADRO N° 4.7 Resultados de la prueba de ajuste Kolmogorov - Smirnov 2014, del río Callacame.

Distribución	Delta teórica	Delta tabular	Diferencia	se ajusta
Normal	0,238	0,34	0,102	Bueno
Log normal 2 parámetros	0,071	0,34	0,270	Bueno
Log normal 3 parámetros	0,070	0,34	0,269	Bueno
Gama 2 parámetros	0,110	0,34	0,229	Bueno
Gama 3 parámetros	0,070	0,34	0,27	Bueno
Log Pearson tipo III	No se aj.	No se aj.	No se aj.	No se aj.
Gumbel	0,135	0,34	0,204	Bueno

Fuente: Elaboración propia 2014.

- El mejor ajuste de la prueba de Kolmogorov Smirnov del río Zapatillas es la distribución Normal de 2 parámetros, el valor calculado es igual a: 0.119 del delta teórico es el menor de todas las pruebas de distribución.

CUADRO N° 4.8 Resultados de la prueba de ajuste Kolmogorov - Smirnov 2014, del río Zapatilla.

Distribución	Delta teórica	Delta tabular	Diferencia	Se ajusta
Normal	0,219	0,312	0,092	Bueno
Log normal 2 parámetros	0,119	0,312	0,192	Bueno
Log normal 3 parámetros	0,126	0,312	0,185	Bueno
Gama 2 parámetros	0,129	0,312	0,182	Bueno
Gama 3 parámetros	0,172	0,312	0,139	Bueno
Log Pearson tipo III	0,113	0,312	0,198	Bueno
Gumbel	0,187	0,312	0,125	Bueno

Fuente: Elaboración propia 2014.

4.2.1. DETERMINACION DE LAS MÁXIMAS AVENIDAS DE DISEÑO MEDIANTE LA UTILIZACION DE MÉTODOS PROBABILÍSTICOS PARA LOS CAUDALES MÁXIMOS.

Los caudales máximos del río llave, río Callacame y río Zapatilla fueron estimados para periodos de retorne (T_r) de 2, 5, 10, 50, 100, y 200 años respectivamente, mediante la distribución de probabilidad teórica: Normal, Log Normal 2 parámetros, Log Normal 3 parámetros, Gama 2 parámetros, Gama 3 parámetros, Pearson tipo III y Gumbel, Log Gumbel, se utilizó el programa computacional HIDROESTA 2.

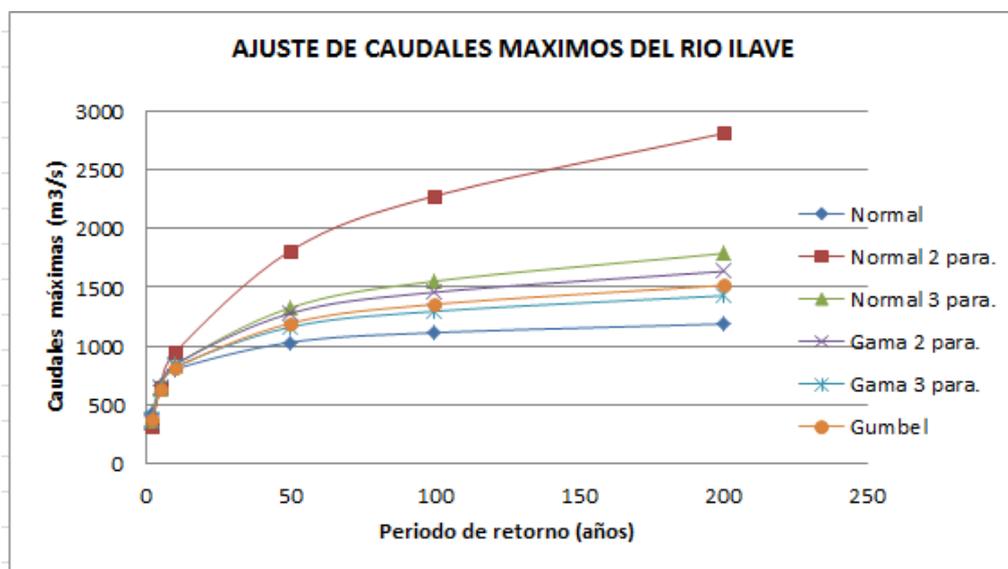
- Los resultados obtenidos mediante las aplicaciones de HIDROESTA 2, se determinaron mediante la distribución de probabilidad para el río llave, el que se ajusta más es la distribución Gama de 3 parámetros.

CUADRO Nº 4.9 RESULTADOS DE AJUSTE DE CAUDALES MÁXIMOS APLICANDO LA DISTRIBUCIÓN HIDROESTA DEL RIO ILAVE

Tr	Q máximo m ³ /s							
	Normal	Log normal 2 parámetros	Log normal 3 parámetros	Gama 2 parámetros	Gama 3 parámetros	Gumbel	Log Gumbel	Promedio
2	420,04	321,83	358,46	356,15	386,61	380,42	280,32	307,18
5	671,53	652,88	636,76	646,49	657,14	641,61	589,23	544,13
10	803,12	945,29	838,87	845,45	824,4	814,54	963,60	709,52
50	1033,49	1809,56	1327,3	1279,2	1163,03	1195,13	2844,57	1102,10
100	1115,46	2275,56	1552,2	1458,9	1296,53	1356,03	4495,33	1283,11
200	1190,01	2806,47	1787,9	1635,2	1429,83	1516,34	7092,23	1474,90

Fuente: Elaboración propia 2014.

GRAFICO Nº 4.1 AJUSTE DE CAUDALES MAXIMOS.



Fuente: Elaboración propia 2014.

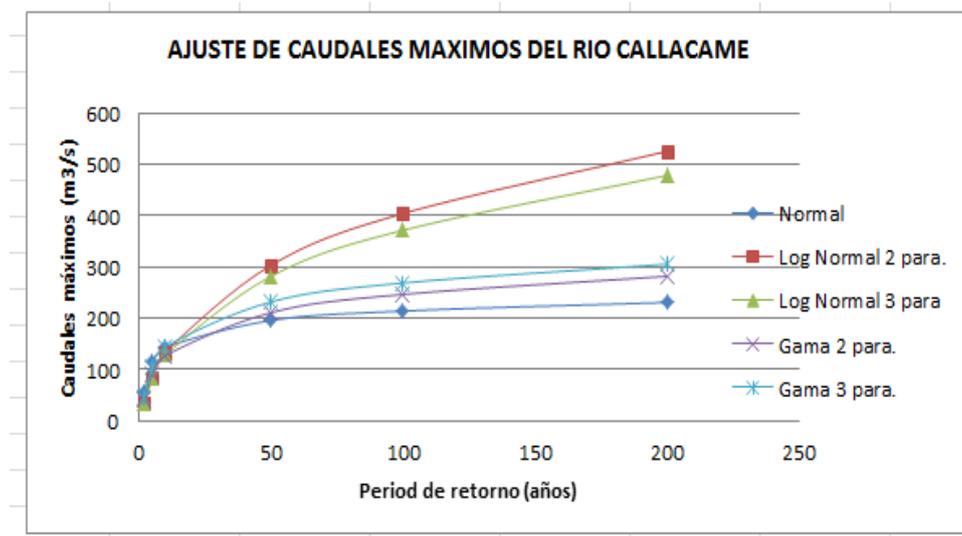
- Los resultados obtenidos mediante las aplicaciones de HIDROESTA 2, se determinaron mediante la distribución de probabilidad para el río Callacame, el que se ajusta más es la distribución Gama de 3 parámetros.

CUADRO Nº 4.10 RESULTADOS DE AJUSTE DE CAUDALES MÁXIMOS APLICANDO LA DISTRIBUCIÓN HIDROESTA DEL RIO CALLACAME.

Q Máximo (m3/s)						
(Tr)	Normal	Log normal 2 parámetros	Log normal 3 parámetros	Gama 2 parámetros	Gama 3 parámetros	Gumbel
2	57,44	35,01	35,07	41,88	46,36	29,45
5	114,15	84,79	82,42	91,32	105,93	74,58
10	143,83	134,71	128,81	127,8	145,37	137,98
50	195,89	303,46	281,9	211,19	232,16	534,3
100	214,27	404,17	371,62	246,73	268,85	947,02
200	231,08	525,37	478,52	282	305,41	1675,05

Fuente: Elaboración propia 2014.

GRAFICO Nº 4.2 AJUSTE DE CAUDALES MAXIMOS



Fuente: Elaboración propia 2014.

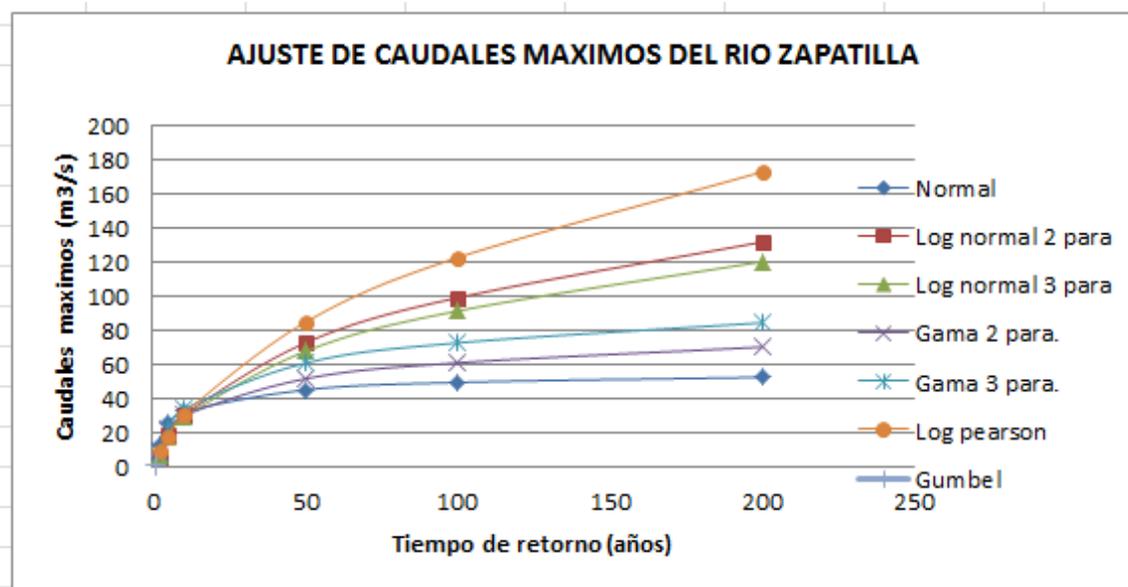
- Los resultados obtenidos mediante las aplicaciones de HIDROESTA 2, se determinaron mediante la distribución de probabilidad para el río Zapatillas, el que se ajusta más es la distribución Log Normal de 2 parámetros.

CUADRO Nº 4.11 RESULTADOS DE AJUSTE DE CAUDALES MÁXIMOS APLICANDO LA DISTRIBUCIÓN HIDROESTA DEL RIO ZAPATILLA.

Tr	Q máximo m3/s							
	Normal	Log Normal 2 parámetros	Log Normal 3 parámetros	Gama 2 parámetros	Gama 3 parámetros	Log Pearson tipo III	Gumbel	Promedio
2	12,2	6	6,98	8,7	7,54	9	10,19	8,66
5	25,15	18,15	17,7	20,76	22,13	17,85	24,43	20,88
10	32,16	30	28,78	29,97	33,56	30,84	33,38	31,24
50	44,98	72,43	67,47	51,48	60,66	84,48	54,65	62,31
100	49,32	98,85	91,12	60,75	72,44	122,3	63,43	79,74
200	52,31	131,4	119,95	70	84,23	172,44	72,18	100,36

Fuente: elaboración propia 2014.

GRAFICO Nº 4.3 AJUSTE DE CAUDALES MAXIMOS.



Fuente: Elaboración propia 2014.

4.2.2. DETERMINACIÓN DE LOS CAUDALES MÁXIMOS PARA DIFERENTES ESTACIONES.

Según el análisis de frecuencia resulta que la serie anual de caudales máximos instantáneos del río llave, río Callacame y río Zapatilla. Se ajusta mejor a la distribución Gama 3 parámetros, Gama 3 parámetros y Log Normal 2 parámetros (métodos probabilísticos), por mostrar menor porcentaje de error estándar que otras distribuciones teóricas. A continuación se muestran los caudales máximos instantáneos de diseño para diferentes períodos de retorno.

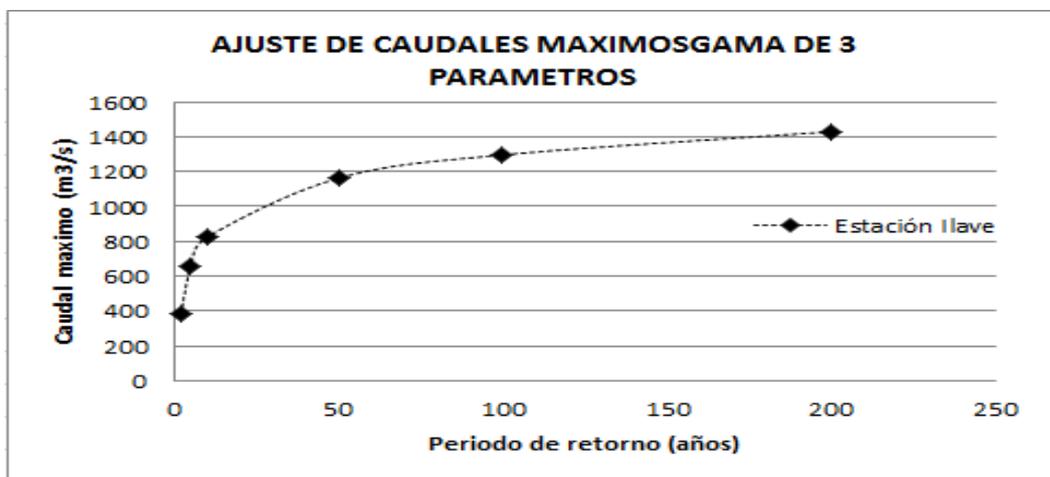
CUADRO N° 4.12 Descargas máximas avenidas de los ríos de llave, Callacame y Zapatillas.

Q.Max i.(m ³ /s)			
Estación	llave	Calacéame	Zapatilla
(Tr)	Gama 3	Gama de 3	Log Normal
años	parámetros	parámetros.	2 parámetros
2	386,6	46,36	6,0
5	657,1	106,93	18,1
10	824,4	145,37	30,0
50	1163	232,16	72,4
100	1296,5	268,85	98,8
200	1429,8	305,41	131,4

Fuente: Elaboración propia 2014.

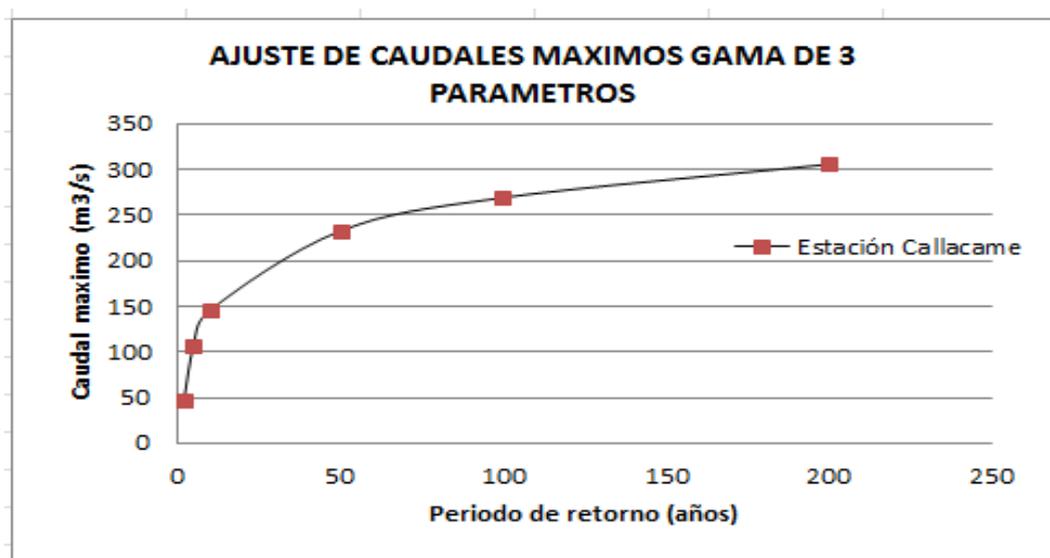
Los caudales máximos estimados para los ríos: llave, Callacame y Zapatilla; para los diferentes periodos de retorno: 2, 5, 10, 50,100 y 200 años respectivamente, mediante las distribuciones de probabilidades teóricas: Se utilizó el programa computacional HIDROESTA 2.

- GRAFICO Nº 4.4 Curva de frecuencia de las descargas máximas diarios. Estación de la cuenca llave, (ajuste distribución de metodos probabilisticos).



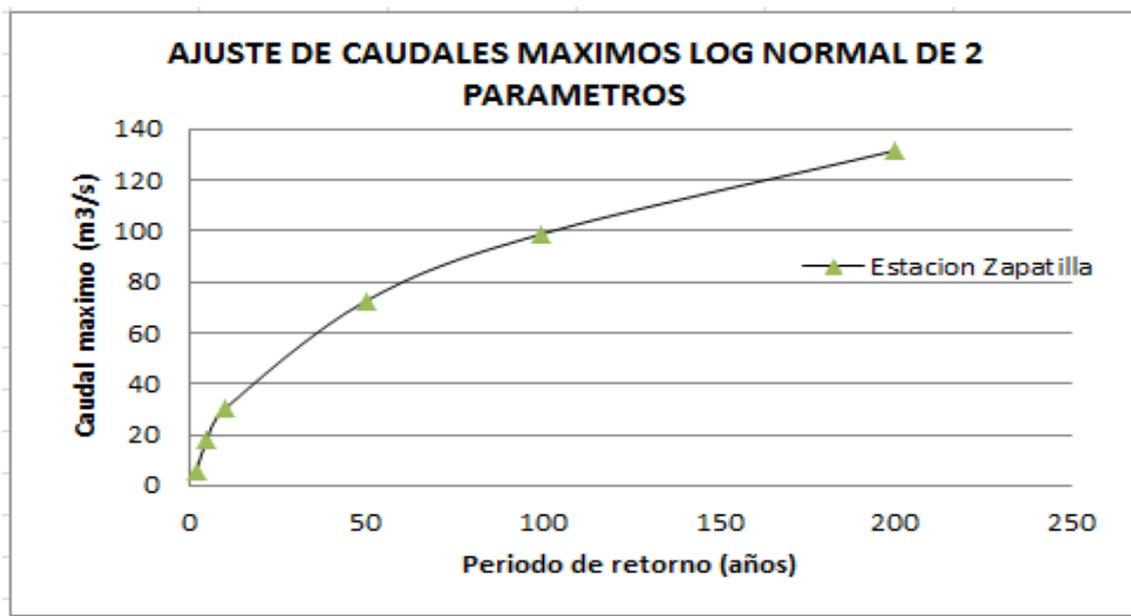
Fuente: Elaboración propia 2014.

- GRAFICO Nº 4.5 Curva de frecuencia de las descargas máximas diarios. Estacion de la cuenca Callacame, (ajuste distribución de metodos probabilisticos).



Fuente: Elaboración propia 2014.

- GRAFICO Nº 4.6 Curva de frecuencia de las descargas máximas diarios. Estacion de la cuenca Zapatilla, (ajuste distribución de metodos probabilisticos).



Fuente: Elaboración propia 2014.

4.3. DETERMINACION DE LAS MAXIMAS AVENIDAS DE DISEÑO MEDIANTE LA UTILIZACION DE LOS CUANTILES REGIONAALES MODELO REGIONAL.

Con la finalidad de verificar la bondad de la metodología propuesta, se realizó el cálculo de eventos máximos, se comparan los valores calculados con el análisis regional, obtenidos para la región hidrográfica del sur de la región de Puno. Para los diferentes ríos: ILAVE, CALLACAME Y ZAPATILLA; y para diferentes periodos de retorno como son: 2, 5, 10, 50, 100 y 200 años respectivamente.

4.3.1. MODELO POTENCIAL.

La comparación entre las descargas máximas estimados con los modelos probabilísticos y el modelo regional se presenta comparaciones de las predicciones de descargas para las 3 estaciones hidrográficas de la región sur de Puno, el grafico contiene de los 3 estaciones.

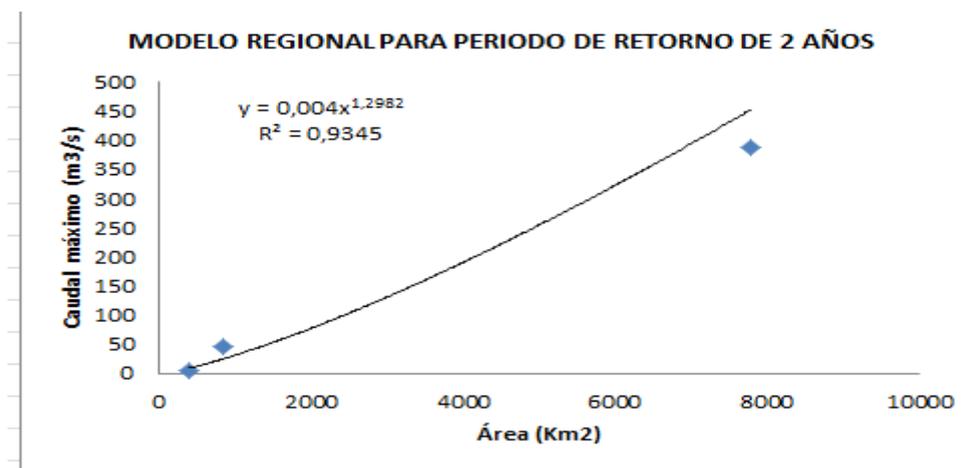
- Los resultados se muestran los valores de las descargas máximas instantáneas obtenidos mediante el modelo probabilístico y los valores de las descargas máximas instantáneas obtenidas mediante el modelo regional y para periodo de retorno de 2 años.

CUADRO N° 4.13 Los resultados de modelo regional, $Q=CA^n$

(Tr), tiempo de retorno de 2 años			
Cuenca	Área (Km ²)	Caudal Q.	Q regional
Ilave	7772,59	386,6	337,2
Callacame	852,99	46,4	19,1
Zapatilla	390,71	6	6,9

Fuente: Elaboración propia 2014.

GRAFICO Nº 4.7 En el siguiente grafico se comparan los valores calculados con el análisis regional, para las estaciones río llave, río Calacéame y río Zapatilla, para periodos de retorno de 2 años. El resultado de análisis es: $R^2 = 0.9345$



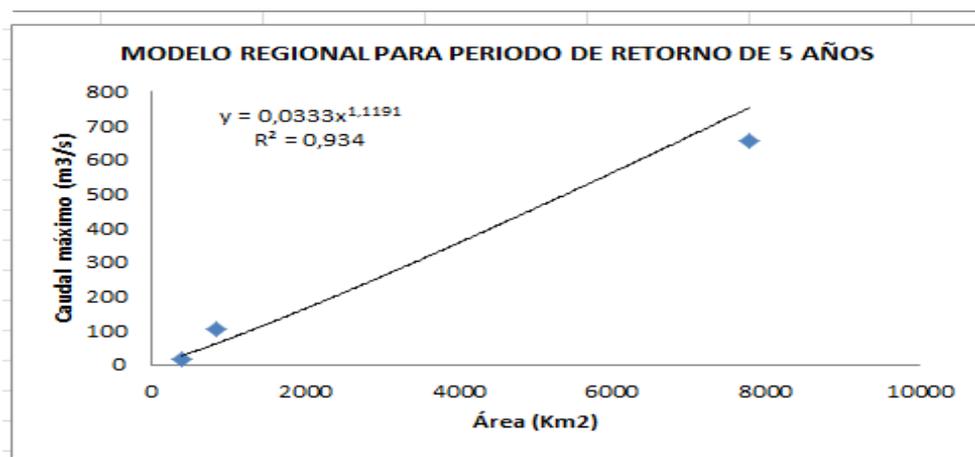
Fuente: Elaboración propia 2014.

- CUADRO Nº 4.14 Los resultados se muestran los valores de las descargas máximas instantáneas obtenidos mediante el modelo probabilístico y los valores de las descargas máximas instantáneas obtenidas mediante el modelo regional y para periodo de retorno de 5 años.

(Tr), tiempo de retorno de 5 años			
Cuenca	Área (Km ²)	Caudal Q.	Q regional
Ilave	7772,59	657,1	752,3
Callacame	852,99	105,9	63,5
Zapatilla	390,71	18,1	26,5

Fuente: Elaboración propia 2014.

- GRAFICO N° 4.8 En el siguiente grafico se comparan los valores calculados con el análisis regional, para las estaciones río llave, río Callacame y río Zapatilla, para periodos de retorno de 5 años. El resultado de análisis es: $R^2 = 0.934$



Fuente: Elaboración propia 2014.

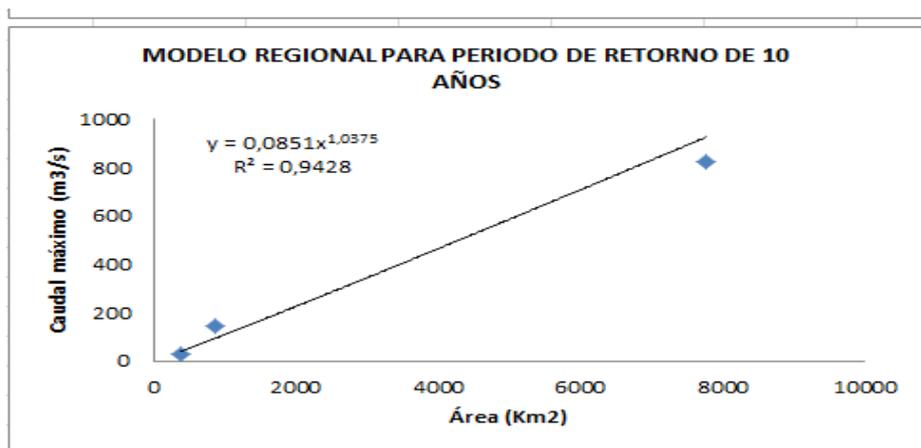
- CUADRO N° 4.15 Los resultados se muestran los valores de las descargas máximas instantáneas obtenidos mediante el modelo probabilístico y los valores de las descargas máximas instantáneas obtenidas mediante el modelo regional y para periodo de retorno de 10 años.

(Tr), tiempo de retorno de 10 años			
Cuenca	Área (Km2)	Caudal Q.	Q regional
llave	7772,59	824,4	925,5
Callacame	852,99	145,3	93,5
Zapatilla	390,71	30	41,6

Fuente: Elaboración propia 2014.

- GRAFICO N° 4.9 En el siguiente grafico se comparan los valores calculados con el análisis regional, para las estaciones río llave, río Callacame y río Zapatilla, para periodos de retorno de 10 años. El resultado de análisis es:

$$R^2 = 0.9428$$



Fuente: Elaboración propia 2014.

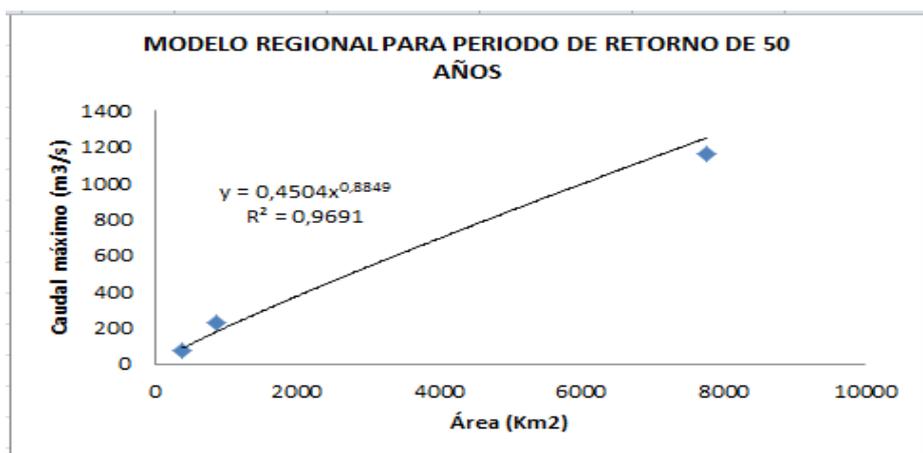
- CUADRO N° 4.16 Los resultados se muestran los valores de las descargas máximas instantáneas obtenidos mediante el modelo probabilístico y los valores de las descargas máximas instantáneas obtenidas mediante el modelo regional y para periodo de retorno de 50 años.

(Tr), tiempo de retorno de 50 años			
Cuenca	Área (Km ²)	Caudal Q.	Q regional
Ilave	7772,59	1163	1248,4
Callacame	852,99	232,1	176,7
Zapatilla	390,71	72,4	88,5

Fuente: Elaboración propia 2014.

- GRAFICO N° 4.10 En el siguiente grafico se comparan los valores calculados con el análisis regional, para las estaciones río llave, río Callacame y río Zapatilla, para periodos de retorno de 50 años. El resultado de análisis es:

$$R^2 = 0.9691$$



Fuente: Elaboración propia 2014.

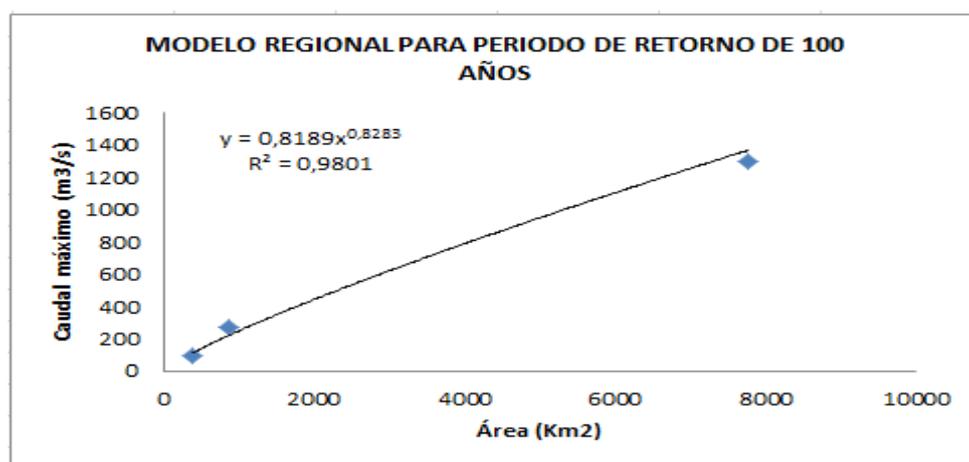
- CUADRO N° 4.17 Los resultados se muestran los valores de las descargas máximas instantáneas obtenidos mediante el modelo probabilístico y los valores de las descargas máximas instantáneas obtenidas mediante el modelo regional y para periodo de retorno de 100 años.

(Tr), tiempo de retorno de 100 años			
Cuenca	Área (Km ²)	Caudal Q.	Q regional
llave	7772,59	1296,5	1367,1
Callacame	852,99	268,8	219,2
Zapatilla	390,71	98,8	114,8

Fuente: Elaboración propia 2014.

- GRTAFICO N° 4. 11 En el siguiente grafico se comparan los valores calculados con el análisis regional, para las estaciones río llave, río Callacame y río Zapatilla, para periodos de retorno de 100 años. El resultado de análisis es:

$$R^2 = 0.9801$$



Fuente: Elaboración propia 2014.

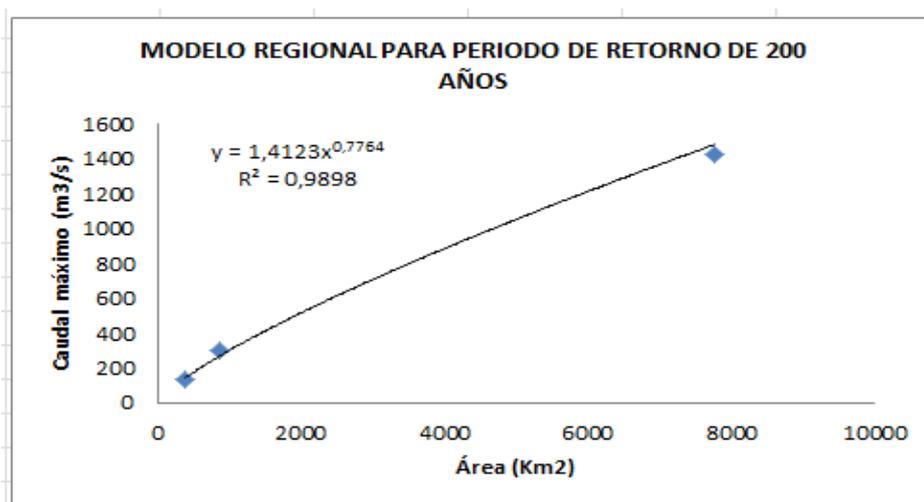
- CUADRO N° 4.18 Los resultados se muestran los valores de las descargas máximas instantáneas obtenidos mediante el modelo probabilístico y los valores de las descargas máximas instantáneas obtenidas mediante el modelo regional y para periodo de retorno de 200 años.

(Tr), tiempo de retorno de 200 años			
Cuenca	Área (Km ²)	Caudal Q.	Q REGIONAL
llave	7772,59	1429,8	1481,0
Callacame	852,99	305,4	266,4
Zapatilla	390,71	131,4	145,3

Fuente: Elaboración propia 2014.

- GRAFICO N° 4.12 En el siguiente grafico se comparan los valores calculados con el análisis regional, para las estaciones río llave, río Callacame y río Zapatilla, para periodos de retorno de 200 años. El resultado de análisis es:

$$R^2 = 0.9898$$



Fuente: Elaboración propia 2014.

4.3.2. COMPARACION DE MODELO PROBABILISTICO Y MODELO REGIONAL.

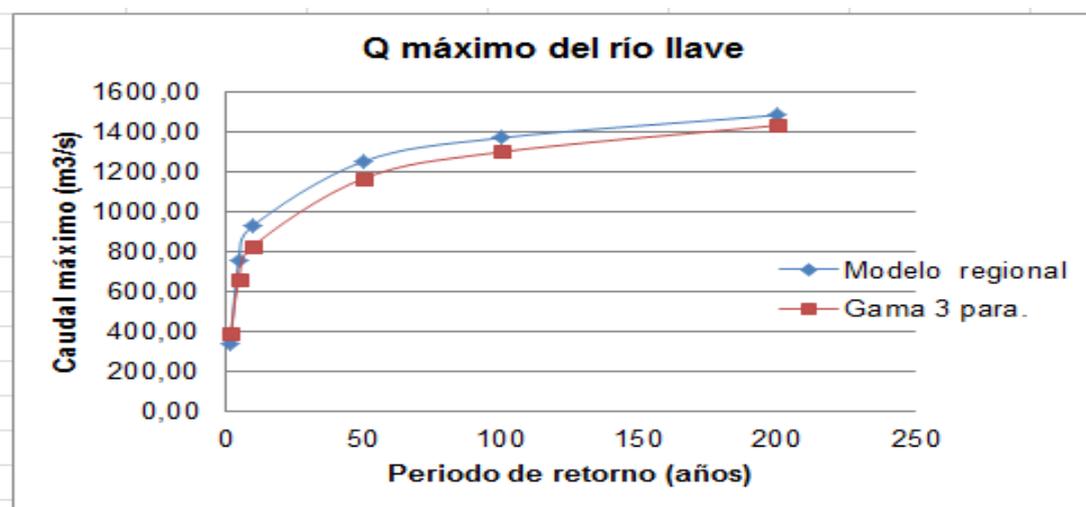
CUADRO N° 4.19

COMPARACION DEL MODELO PROBABILISTICO Y MODELO REGIONAL

Q. Max i.(m3/s)						
Estación	Ilave		Callacame		Zapatilla	
(Tr)	Gama 3 parámetros	Modelo regional	Gama parámetros.	Q regional	Log Normal 2 parámetros.	Q regional
2	386,6	337,17	46,4	19,1	6	6,9
5	657,1	752,27	109,36	63,5	18,1	26,5
10	824,4	925,50	145,37	93,5	30	41,6
50	1163	1248,40	232,16	176,7	72,4	88,5
100	1296,5	1367,06	269,85	219,2	98,8	114,8
200	1429,8	1481,02	305,41	266,4	131,4	145,3

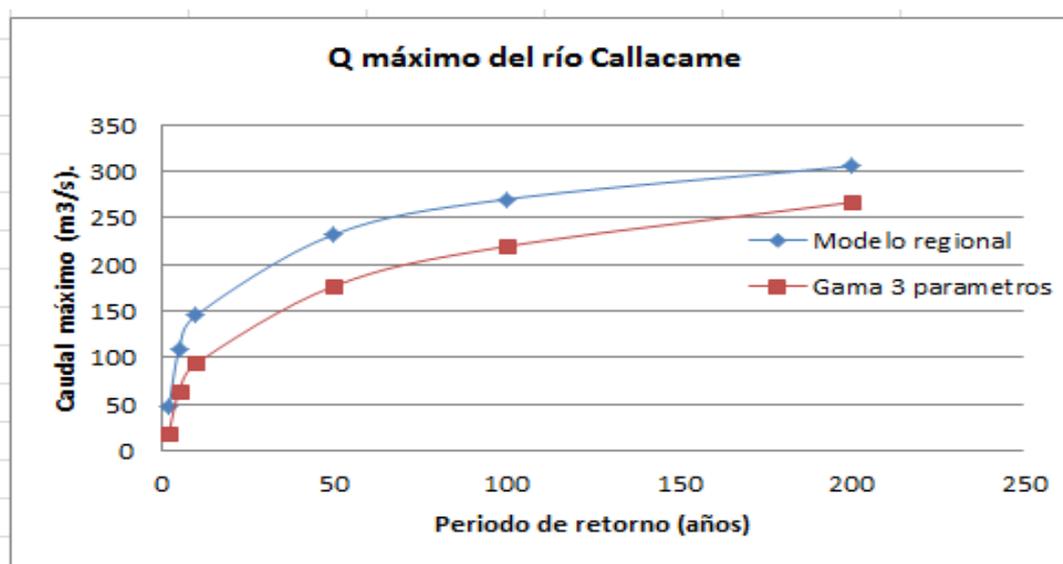
Fuente: Elaboración propia 2014.

- GRAFICO N° 4.13 El resultados de los análisis de caudales máximos instantáneos del modelo probabilístico, (Gama de 3 parámetros) y el modelo regional, para diferentes periodos de retorno del río llave es buena.



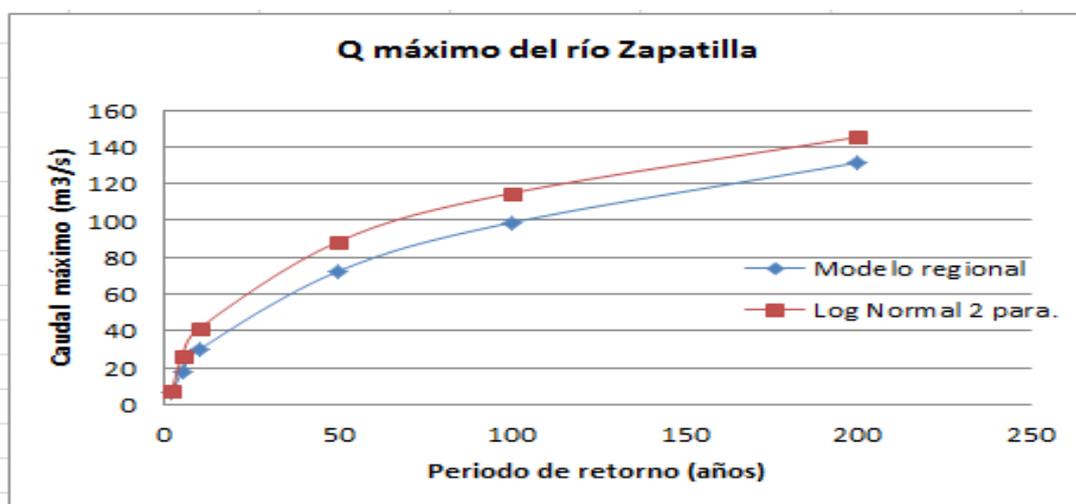
Fuente: Elaboración propia 2014.

- GRAFICO N° 4.14 El resultados de los análisis de caudales máximos instantáneos del modelo probabilístico, (Gama de 3 parámetros) y el modelo regional, para diferentes periodos de retorno del río Callacame es buena,



Fuente: Elaboración propia 2014.

- GRAFICO N° 4. 15 El resultados de los análisis de caudales máximos instantáneos del modelo probabilístico, (Log Normal 2 parámetros) y el modelo regional, para diferentes periodos de retorno del río Zapatilla es buena.



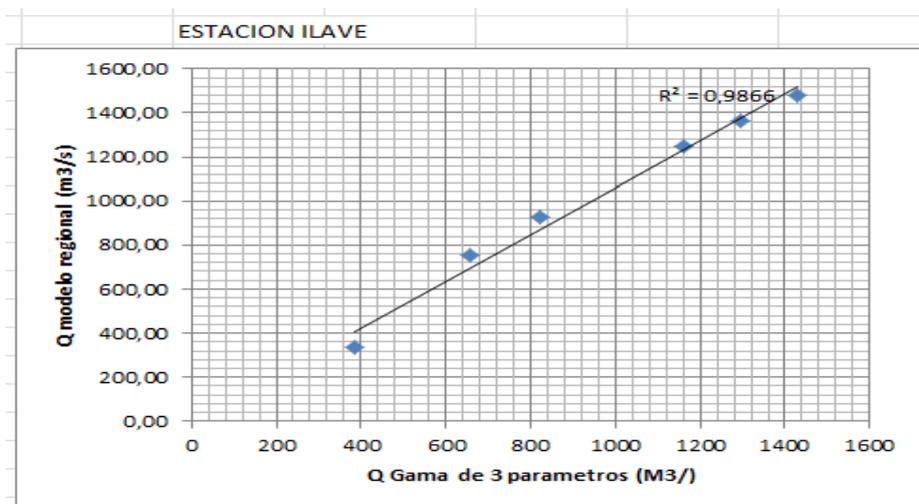
Fuente: Elaboración propia 2014.

4.3.3. EVALUACIÓN DEL MODELO REGIONAL.

La comparación entre las descargas máximas estimados con los modelo probabilístico y el modelo regional se presenta comparaciones de las predicciones de descargas para las 3 estaciones hidrográficas de la región sur de Puno.

- La más adecuada para estimar las descargas máximas, para el presente trabajo de investigación a partir de análisis regional de avenidas para distintos periodos de retorno cuyos resultados se presentan para cada estación. Para estación llave es de: $R^2 = 0.9998$.

GRAFICO N° 4.16 Diagrama de dispersión.

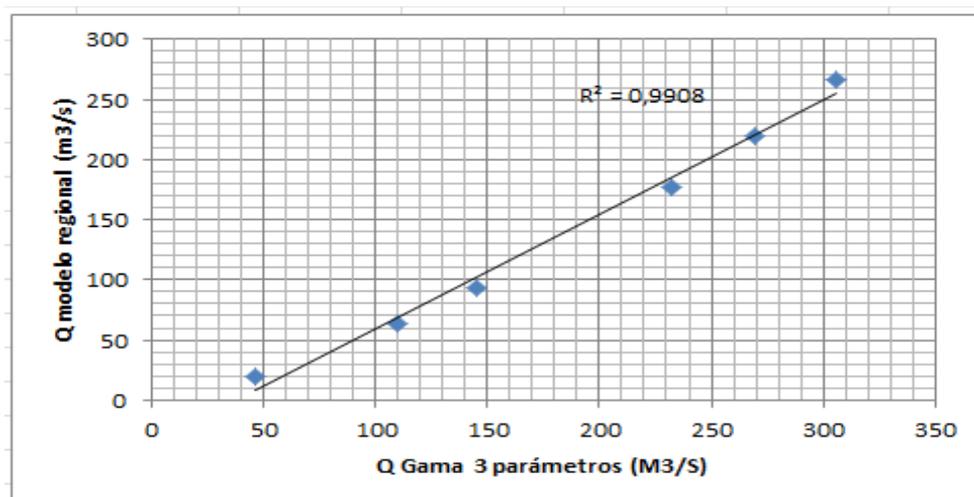


Fuente: Elaboración propia 2014.

- La más adecuada para estimar las descargas máximas, a partir de análisis regional de avenidas para distintos periodos de retorno cuyos resultados se presentan: Para estación Callacame es de: $R^2 = 0.9998$.

GRAFICO N° 4.17 Diagrama de dispersión.

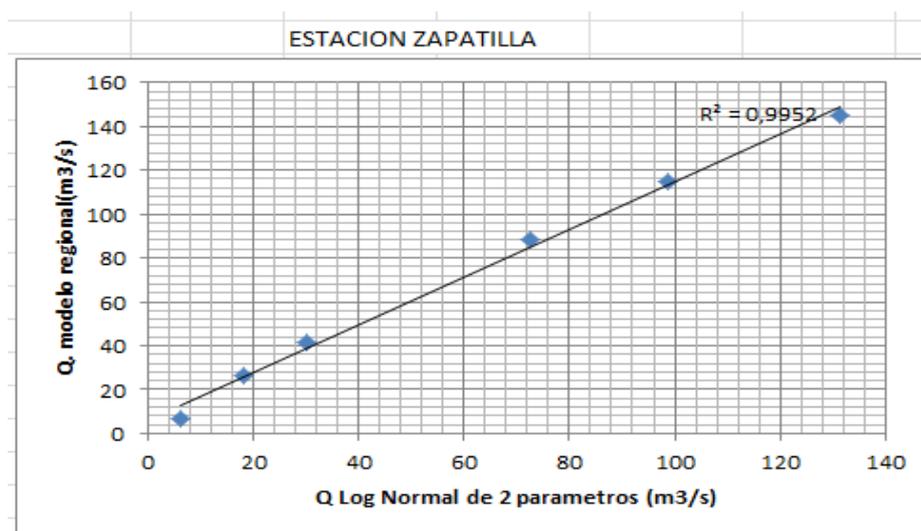
ESTACION CALLACAME.



Fuente: Elaboración propia 2014.

- La más adecuada para estimar las descargas máximas, para el presente trabajo de investigación a partir de análisis regional de avenidas para distintos periodos de retorno cuyos resultados se presentan es de: $R^2 = 0.9998$.

GRAFICO N° 4.18 Diagrama de dispersión.

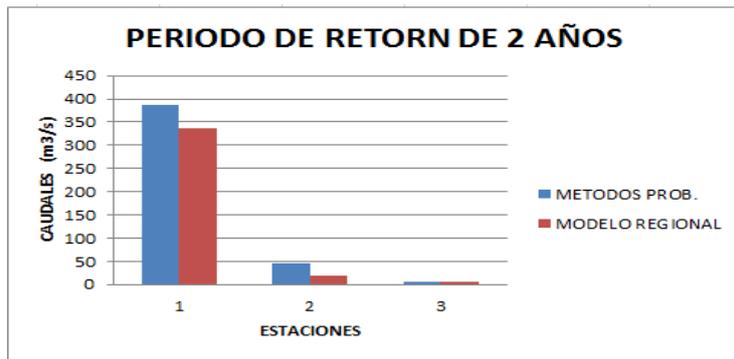


Fuente: Elaboración propia 2014.

4.3.4. LA DIFERENCIA DE LOS RESULTADOS DE CAUDALES MÁXIMOS OBTENIDOS MEDIANTE EL MÉTODO PROBABILÍSTICO Y EL MODELO REGIONAL.

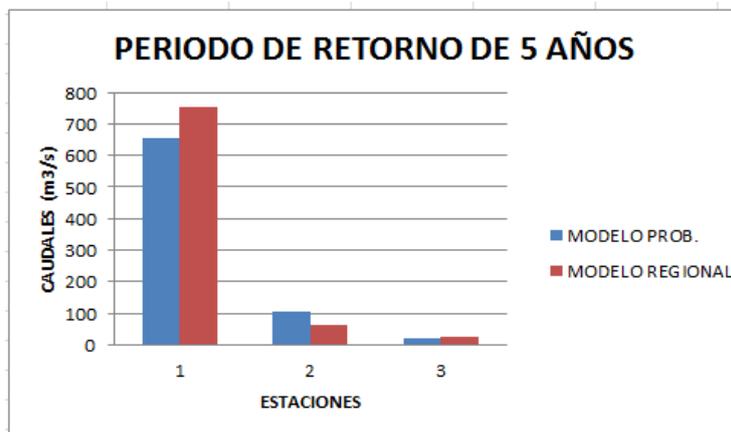
Los resultados de análisis comparativo de las estimaciones del método probabilístico y el modelo regional de las descargas máximas en punto de interés de las cuenca del río llave, río Callacame y río Zapatilla.

GRAFICO N° 4.19



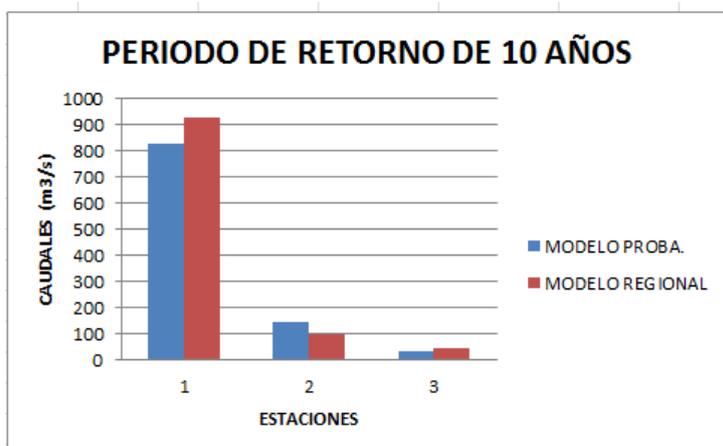
Fuente: Elaboración propia 2014.

GRAFICO N° 4.20



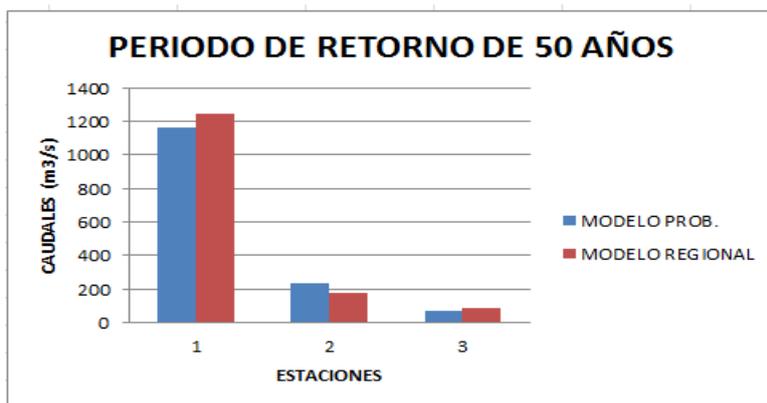
Fuente: Elaboración propia 2014.

GRAFICO N° 4. 21



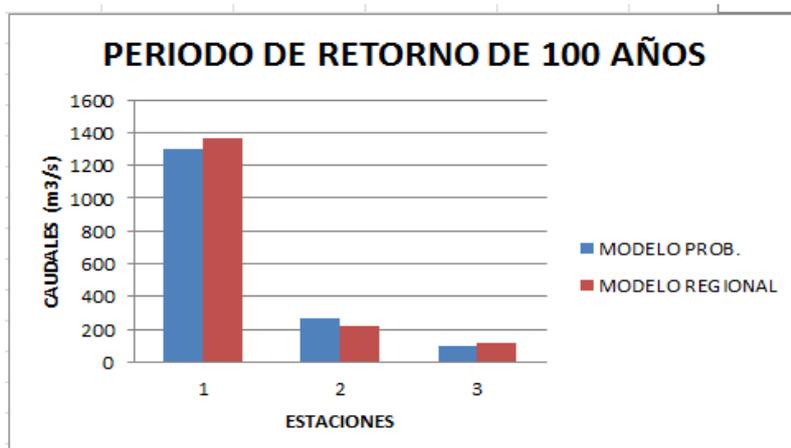
Fuente: Elaboración propia 2014.

GRAFICO N° 4.22



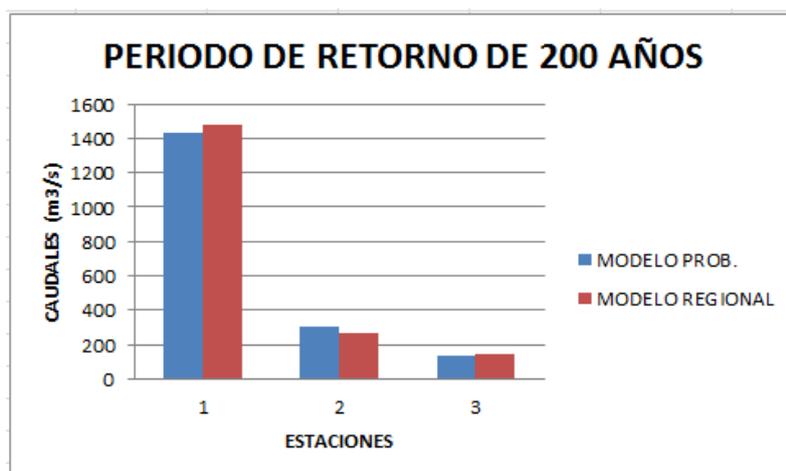
Fuente: Elaboración propia 2014.

GRAFICO N° 4.23



Fuente: Elaboración propia 2014.

GRAFICO N° 4.24



Fuente: Elaboración propia 2014.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. CONCLUSIONES.

La caracterización efectuada de las cuencas nos indica que son muy limitados los recursos hídricos para la población actual y futura potenciada por los cambios en el uso del suelo que se esperan y que generaran mayores consumos, las áreas de las cuencas son: río llave A = 7772.59 Km², río Callacame A = 852.99 Km² y río Zapatilla A = 390.71 Km². Como en el caso del agua para el consumo humano.

El modelo probabilístico es el modelo adecuado para explicar el comportamiento de las descargas máximas de las cuencas se ajustan a la serie de caudales máximas del río llave la distribución Gama de 3 parámetros, río Callacame la distribución Gama de 3 parámetros y río Zapatilla la distribución Log Normal 2 parámetros. Al realizar la prueba de ajuste Kolmogorov – Smirnov, para todas las distribuciones probabilísticos, calculados los valores de delta teórico son menores que los valores de delta tabular.

Los cuantiles regionales se estimaron mediante los modelos regionales y según la evaluación la estación río llave tiene un coeficiente de determinación: $R^2 = 0.98$, para estación río Callacame tiene un coeficiente de determinación: $R^2 = 0.99$, para estación río Zapatilla tiene un coeficiente de determinación: $R^2 = 0.99$.

Actualmente se considera que las predicciones obtenidas son más confiables, el modelo regional es el modelo más apropiado para estimar los caudales máximas

instantáneas, con diferentes periodos de retorno, lo cual es adecuado para estimar los caudales para el diseño de infraestructuras hidráulicas. Los resultados se muestran a continuación: con periodos de retorno de 2 años (337.17, 19.1, 6.9), para 5 años (752.2, 63.5, 26.5), para 10 años (925.5, 93.5, 41.6), para 50 años (1248.4, 176.7, 88.5), para 100 años (1367.0, 219.2, 114.89), para 200 años (1481.0, 266.4, 145.3)m³/s. El coeficiente de correlación de la ecuación potencial es $r^2 = 0.93, 0.93, 0.94, 0.96, 0.98$ y 0.98 para las estaciones de: río llave, río Callacame y río Zapatilla.

5.2. RECOMENDACIONES.

Se recomienda usar el modelo regional en la determinación de máximas avenidas de diseño en cuencas que no cuenten con los aforos históricos de caudales y usar el periodo de retorno como máximo 100 años, para el diseño estructuras hidráulicas de menor envergadura.

- BIBLIOGRAFIA.

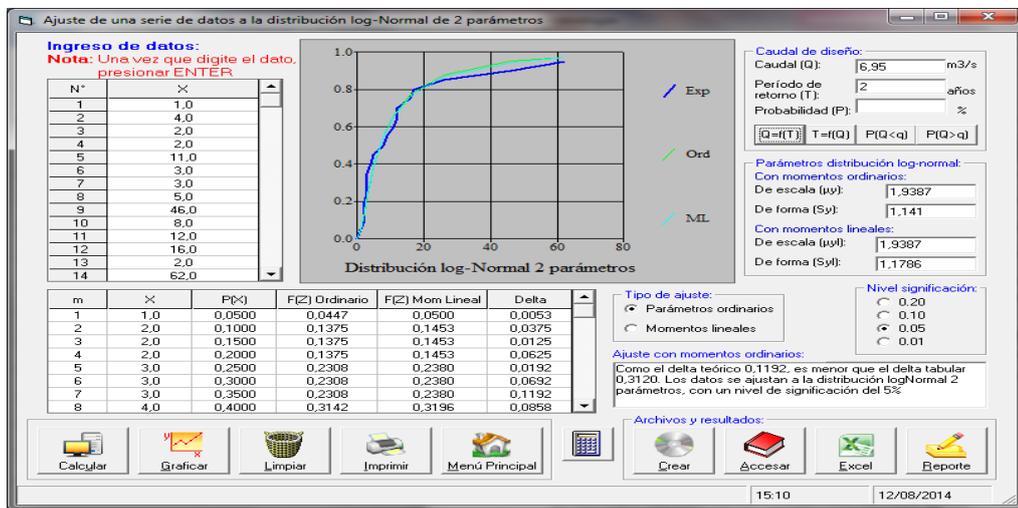
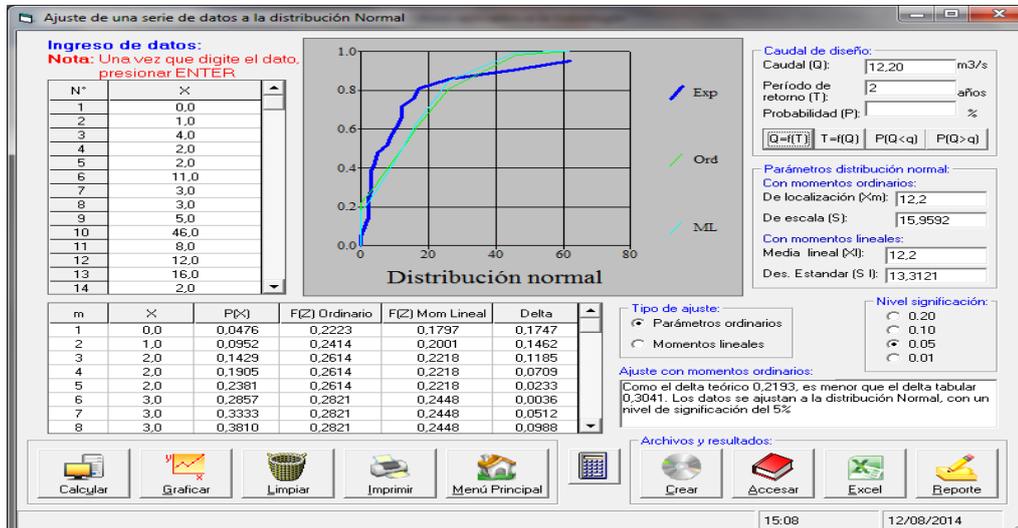
- Aparicio M., Francisco Javier (1997) "Fundamentos de Hidrología de Superficie", Editorial Limusa, México
- Bolaños, H. (1995). Regionalización de caudales mínimos en el departamento de Antioquia. Trabajo de grado Ingeniería Civil. Facultad Nacional de Minas. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 150p.
- Barría, S. (2010). Pronóstico de Caudales Medios Mensuales en las Cuencas de los Ríos Baker y Pascua. Memoria para optar el título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile: Santiago.
- Cortés, L. (2003). Regionalización de tormentas de diseño en la cuenca del valle de México. Universidad Autónoma Metropolitana, México.
- Chereque, M. W. (1989). "Hidrología" CONCYTEC Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima – Perú. Pág 146.
- Escalante S. y L. Reyes C. (2005). "Técnicas Estadísticas en Hidrología". Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de Madrid. 2da Edición 298p.
- Facundo, Matías y Ganancias Martínez (2010). Tesis doctoral. Evaluación de metodologías de regionalización hidrológica: Aplicación a los caudales máximos de cuencas representativas de la región Sur-Oeste.
- Monsalve Sáenz, G. (1995). Hidrología en ingeniería santa fé Bogotá, editores del tercer mundo.
- Mejía Marcacuzco J. (1999). Análisis de máximas avenidas, Universidad Nacional Agraria la Molina. Publirat. LIMA, 28p.

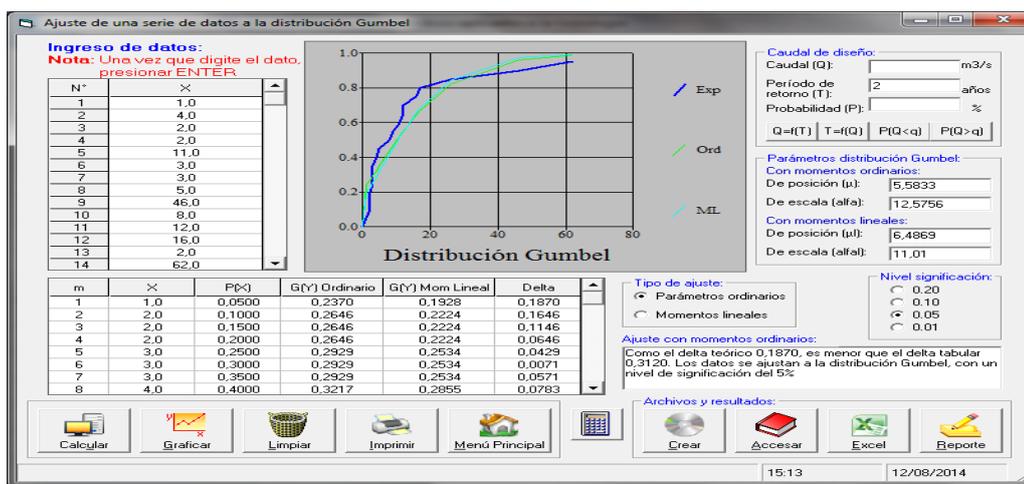
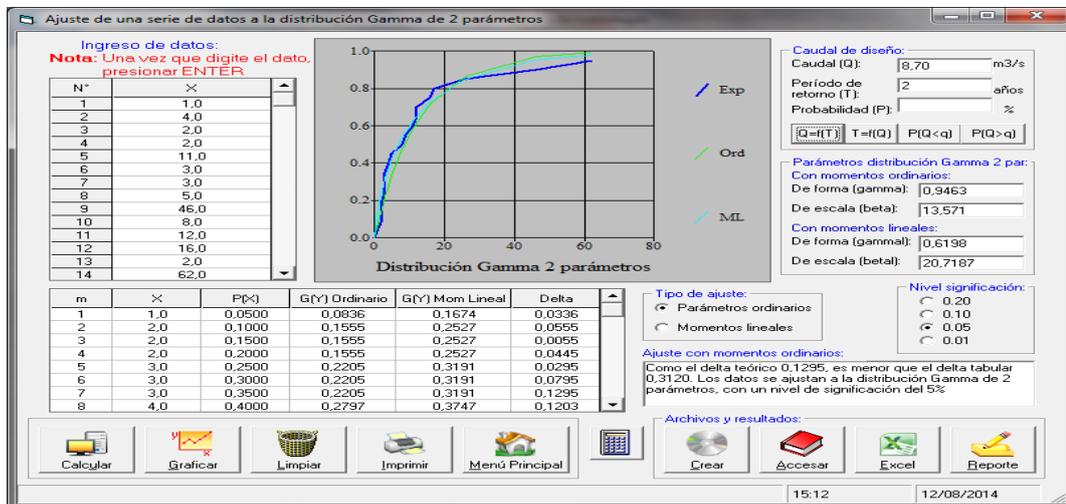
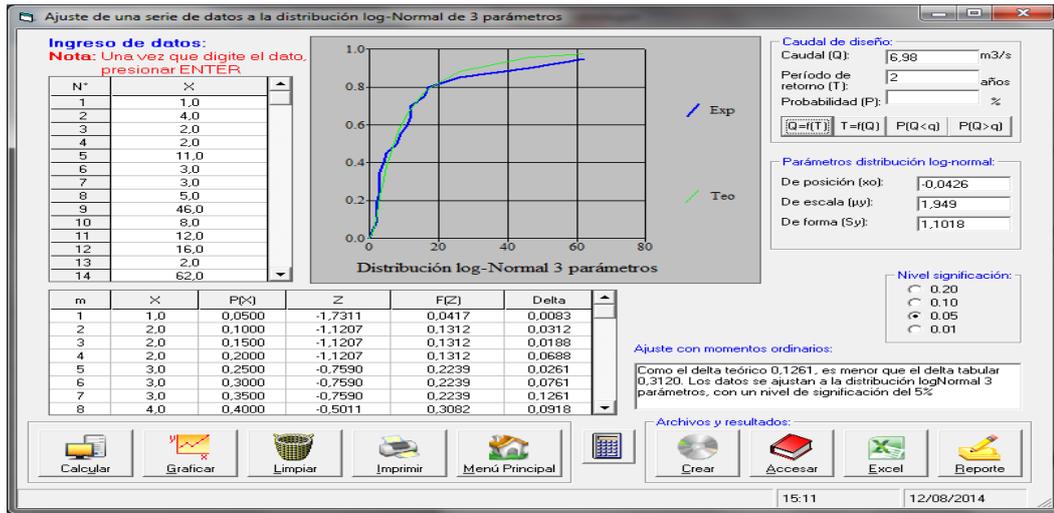
- Mijares, Aparicio (1996). “Fundamentos de Hidrología de Superficie”. Primera edición. Editorial: Limusa. México. Pag. 203, Pag. 206 – 208, Pag. 252..
- Mejía, A. (2005). Hidrología Aplicada. UNA La Molina, CIP-FIA, Lima, Peru.
- Revista, Comunicaciones Científicas y Tecnológicas (2000) Regionalización de caudales en la Región del Alto Uruguay Río Grande do Sul – Brasil.
- Mintegui Aguirre, Juan Ángel y Robredo Sánchez José Carlos (1994). Unidad de Hidráulica e Hidrología. Departamento de Ingeniería Forestal Universidad Politécnica de Madrid E.T.S. Ingenieros de Montes Ingeniería del Agua. Vol. 1 Num. 2 (1994) p. **69**
- Revista Chilena de Ingeniería, Arica (2013), un método de análisis de frecuencia regional de lluvias máximas diarias aplicación en los andes Bolivianas.
- Villalobos, M. (2005). Diseño de drenaje superficial. Editorial: Tecnológica de Costa Rica.
- Villón, M. (2005), Hidrología Estadística. Tercera edición Editorial: Villón. Lima Perú.
- Villón, M. (2002), HidroEsta Segunda edición, editorial: Villón. Lima Perú.
- Villón, M. (2002) “Hidrológia” Segunda edición, Editorial: Villón. Lima-Perú.

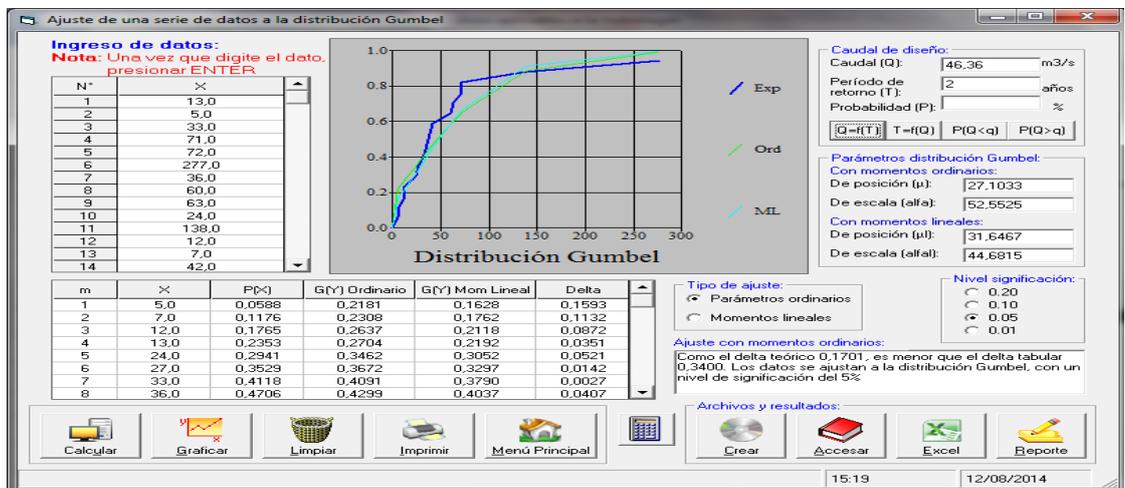
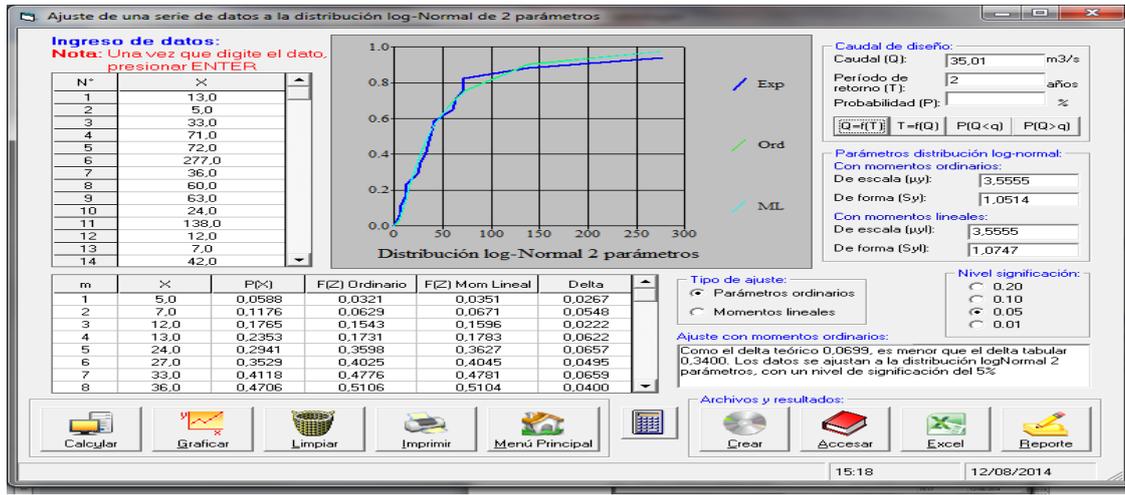
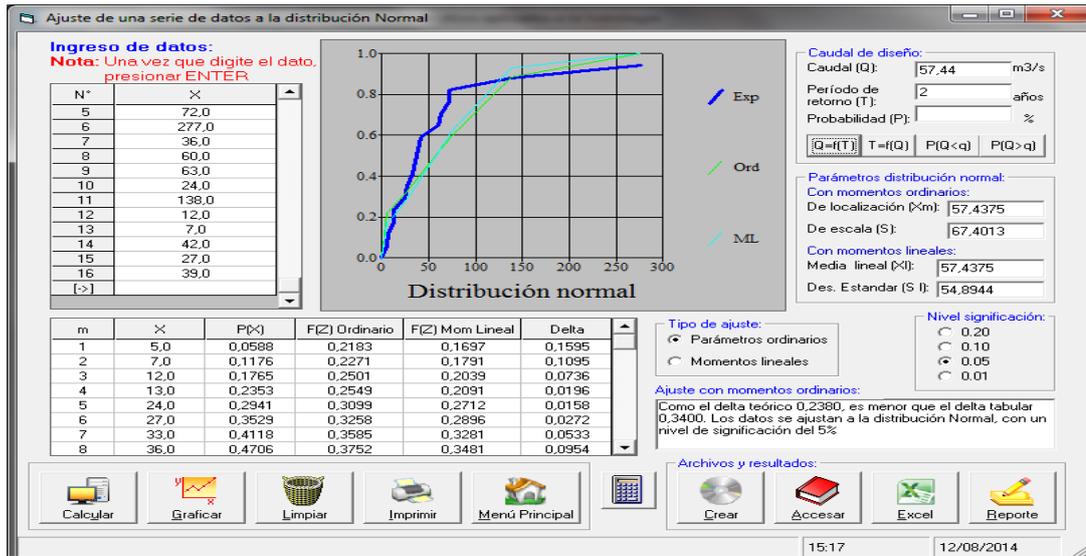


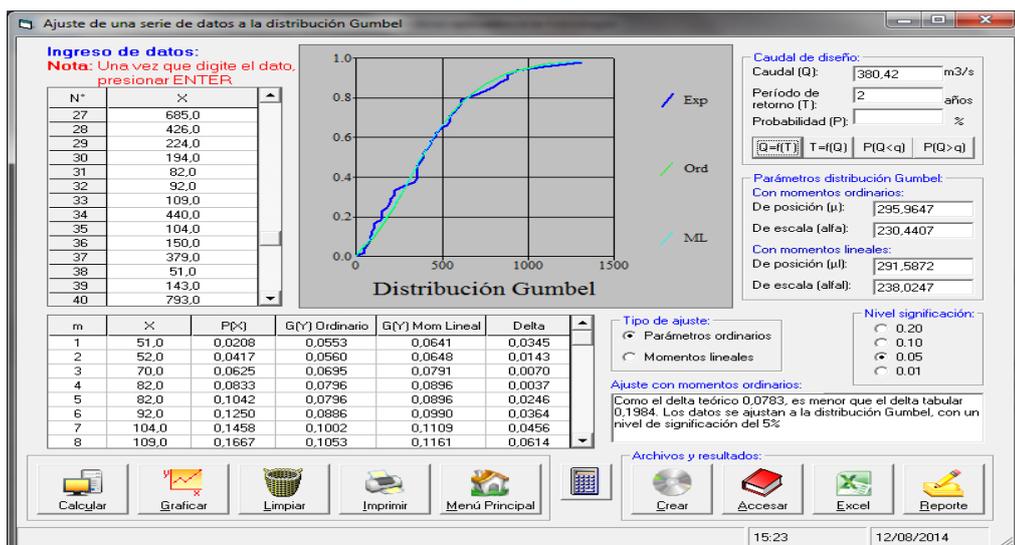
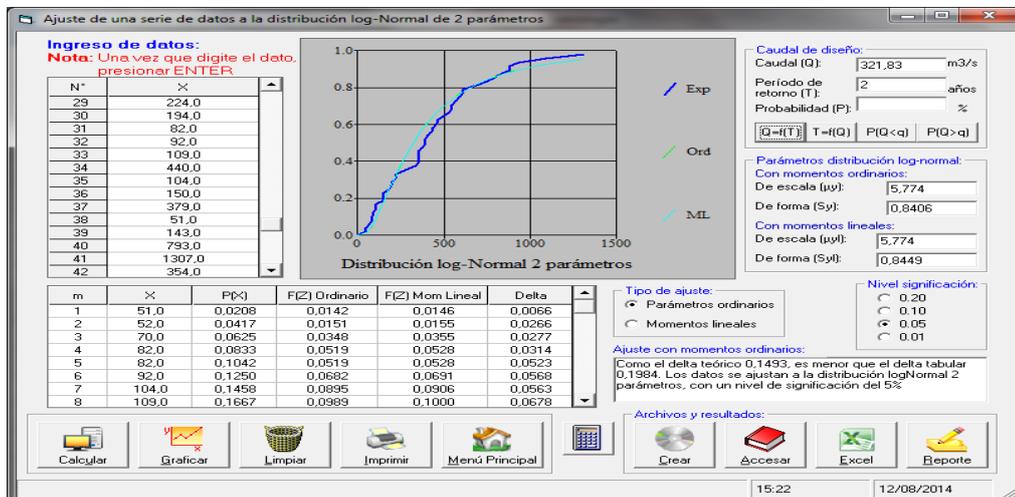
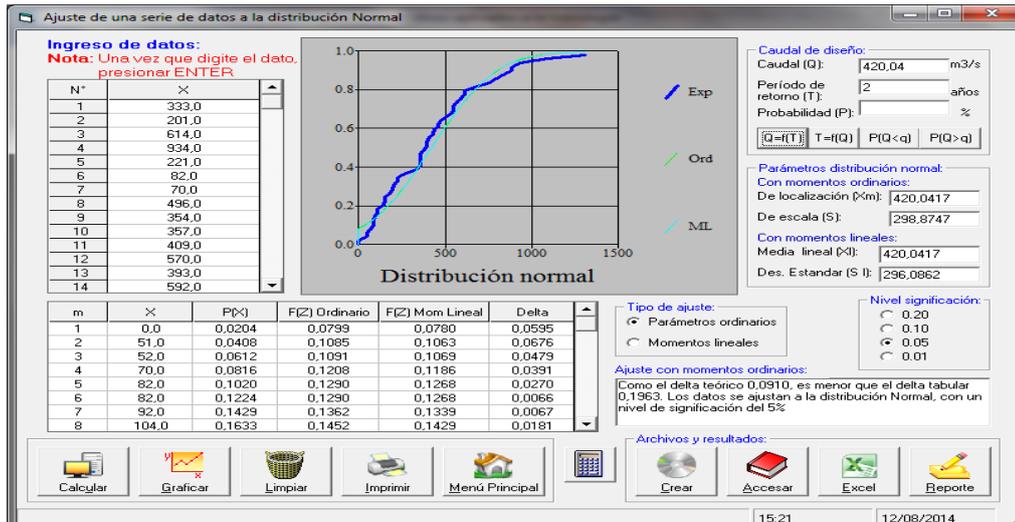
ANEXO

ANEXO N° 01PRUEBA DE AJUSTE DE KOLMOGOROV SMIRNOV PARA LAS MAXIMAS AVENIDAS DE LA CUENCAS DEL ESTUDIO.









ANEXO N° 02 DE LAS CUENCAS HIDROGRAFICAS.

CUENCA HIDROGRAFICA DEL RIO ILAVE



MAPA DE LA CUENCA DEL RÍO CALLACAME.



CUENCA HIDROGRAFICA DEL RIO ZAPATILLA.

