

Se encuentra ubicada al N.E. del Altiplano, al pie de la cordillera Oriental, extendiéndose sobre una superficie de 508 km², hasta el punto de control ubicado en Aranjuez, con una estación hidrométrica (Ahenke, 1992). Los principales ríos que drenan la cuenca son: el río Choqueyapu, el río Orkojahuirra, el río Irpavi y el río Achumani. Topográficamente el valle de la cuenca del río La Paz presenta una orientación Norte-Sur, separada por cordones montañosos, alcanzando en su parte más elevada los 5400 m.s.n.m., cerca al nevado de Chacaltaya, y en su parte más baja a la salida en Aranjuez los 3175 m.s.n.m. El río principal de la misma es el Choqueyapu, que nace en las faldas del nevado Chacaltaya con el nombre de río Kaluyo; este río tiene una longitud aproximada de 35 Km. hasta la estación hidrométrica de Aranjuez, dando lugar a que la cuenca tenga una pendiente promedio de 7 % que caracteriza la predominancia de una topografía de cabecera de valle.

VARIABILIDAD TEMPORAL DE LA PRECIPITACION

Para estudiar la variabilidad temporal de la precipitación en la cuenca del río La Paz, se emplea la información de la estación del Observatorio de San Calixto, la cual cuenta con información meteorológica desde principios de siglo. El estudio se realizó a diferentes niveles, desde el anual hasta el horario.

Nivel anual y mensual (estación de San Calixto).- Se considera el año hidrológico de octubre a septiembre. El Cuadro 1 muestra los valores de los principales estadígrafos calculados para la serie de valores de precipitación total anual, observados en la estación de San Calixto para el período 1920-1994.

Cuadro 1 : Estadígrafos para la serie anual de San Calixto (período 1920 - 1994)

ESTADIGRAFO	NOTACION	VALOR	
Número de datos	n	70	
Media Aritmética	x	571	[mm]
Mediana	m _e	579	[mm]
Moda	m _o	527	[mm]
Desviación Standard	s	95	[mm]
Valor Mínimo	x _{min} (año:1939/40)	319	[mm]
Valor Máximo	x _{max} (año:1929/30)	793	[mm]
Sesgo	μ ₃	-0.103	
Coef. de variación	cv	17 %	

La media aritmética, la mediana y la moda tienen la siguiente relación entre ellos: $m_o < x < m_e$ que es característico en distribuciones asimétricas. El sesgo es negativo y pequeño lo que indica que existe un ligero sesgo a la izquierda.

La figura 2 muestra la acentuada variabilidad de la precipitación anual en San Calixto entre 1920 y 1994. La línea horizontal del medio corresponde al valor de la precipitación media 571 [mm], las otras líneas corresponden a los valores de la precipitación media más y menos la desviación standard s.

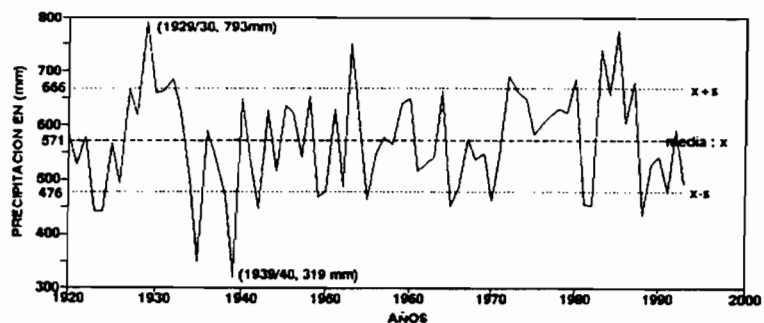


Figura 2 : Precipitación anual vs. tiempo - San Calixto (período 1920-1994)

La figura 3 muestra, para cuatro estaciones de la cuenca, la distribución mensual de la lluvia, durante el año hidrológico promedio. Las estaciones de AASANA y de Chuquiaguillo se encuentran en la parte alta de la cuenca alrededor de los 4000 m.s.n.m., la estación de San Calixto se encuentra en la parte central de la cuenca a una altitud de 3655 m.s.n.m. y la estación de Mallasa se encuentra en la parte baja de la cuenca a 3280 m.s.n.m. En cada una de las estaciones se puede ver que el mes de Enero es el más lluvioso y los meses de Junio y Julio los más secos. La época de lluvias empieza en octubre y la época seca en Abril; dentro de la época de lluvias los meses de Diciembre, Enero, Febrero y Marzo son los más lluviosos aportando en promedio alrededor del 67 % de la precipitación total anual. En la época seca los meses de Mayo, Junio, Julio y Agosto son los más secos aportando en promedio alrededor del 8 % de la precipitación total anual.

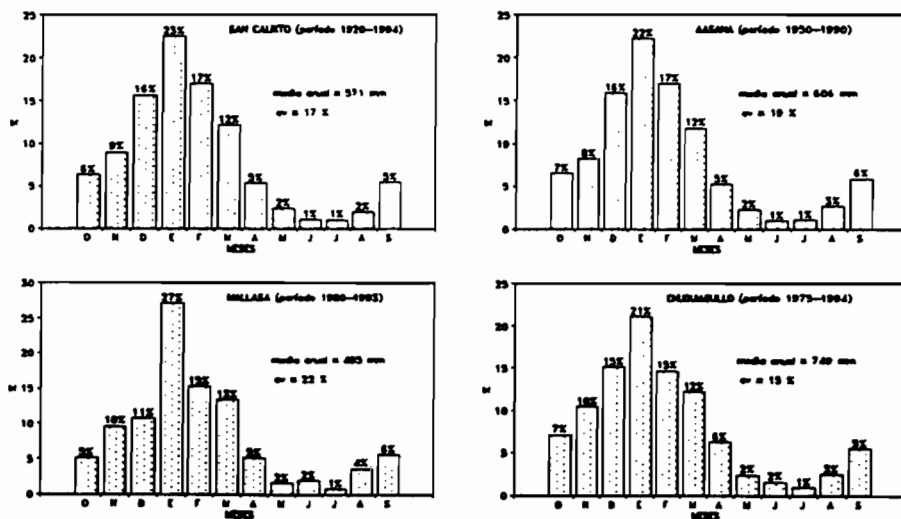


Figura 3 : Distribucion mensual de la lluvia en San Calixto (período 1920-1994)

La figura 1 muestra las isoyetas medias anuales para el período 1985-1991 cada 20 mm de lluvia. La distribución espacial a nivel anual presenta un crecimiento gradual de la precipitación en el sentido sur-norte.

Nivel diario (estación de San Calixto).- La figura 4 (a) muestra, en promedio, el número de días de lluvia por mes para el período 1920-1994. La gráfica es característica del régimen estacional que presenta la cuenca, siendo el mes de Enero, en promedio, el mes con mayor número de días de lluvia y los meses de Junio y Julio con menor número de días con lluvia.

La figura 4 (b) muestra la frecuencia con la que se presentan las precipitaciones máximas diarias en cada mes. El mes de Enero, que presenta un 35 % de frecuencia, es el mes en

el que se han producido la mayor cantidad de precipitaciones máximas. En cambio, en los meses de Mayo, Junio, Julio y Octubre no se ha registrado ni una precipitación máxima diaria. La máxima precipitación diaria durante todo el período de estudio en la estación de San Calixto, se ha producido el 28 de Diciembre de 1976 con 50.1 mm.

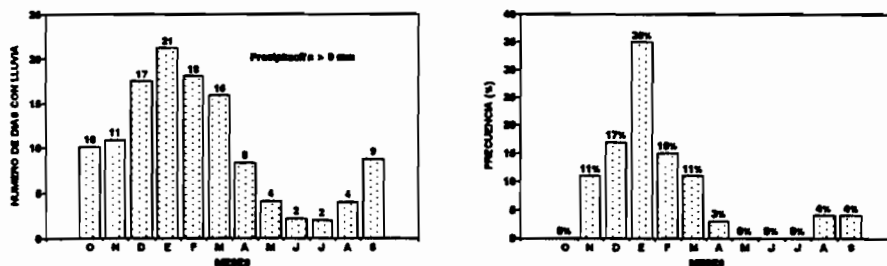


Figura 4 : a) Número de días de lluvia y b) Frecuencia con la que se presentan las precipitaciones diarias máximas anuales en cada mes en San Calixto (período 1920-1994)

Tras realizar el test de ajuste probabilístico a cuatro funciones de probabilidades, se escogió la ley de Gumbel (Benjamin y Cornell, 1981) para el ajuste de la serie de precipitaciones diarias máximas anuales a una función de probabilidades. El cuadro 2 muestra algunos valores de precipitación máxima diaria, calculados empleando el modelo probabilístico adoptado, para diferentes períodos de retorno. La figura 5 muestra las distribuciones acumuladas en forma empírica y calculadas empleando la ley de Gumbel (Chow et al, 1988).

Cuadro 2 : Valores de precipitación máxima diaria para diferentes periodos de retorno - San Calixto

$x_{10} = 39.9$ (mm)	$x_{75} = 51.8$ (mm)
$x_{25} = 45.4$ (mm)	$x_{100} = 53.4$ (mm)
$x_{50} = 49.4$ (mm)	$x_{500} = 63.0$ (mm)

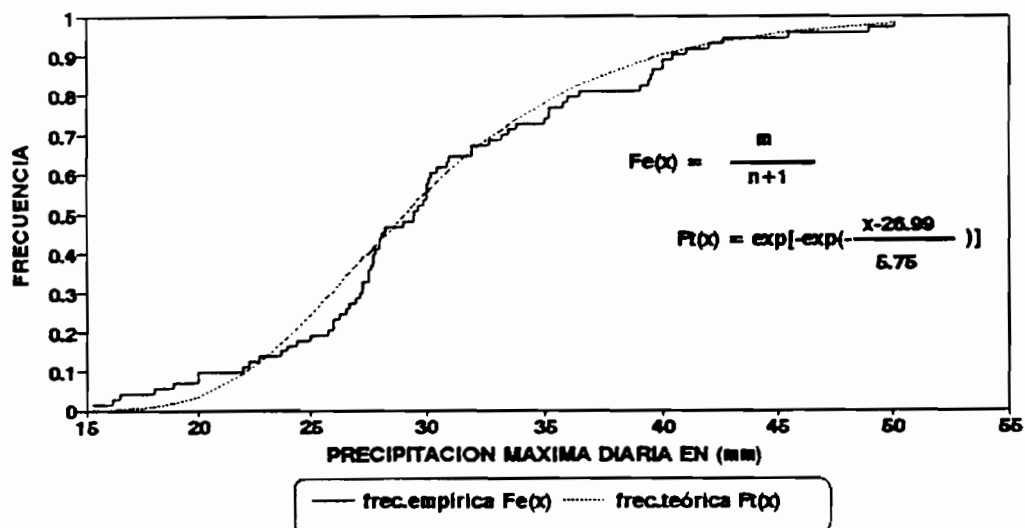


Figura 5 : frecuencias acumuladas empírica y estimada mediante la ley de Gumbel para las precipitaciones máximas diarias - San Calixto (período 1920-1991)

Nivel horario (estación de San Calixto).- En esta sección se presenta la expresión (índice de discretización horaria), deducida para la información pluviográfica de la estación de San Calixto,

que relaciona la precipitación para una duración cualquiera P_d con la precipitación del pluviómetro (precipitación de 24 horas) P_{24} . El análisis y selección de cerca a 150 tormentas registradas por el pluviógrafo de San Calixto en el período 1960-1991 (Mendoza, 1994), ha permitido obtener una función que relaciona el índice de discretización horaria P_d/P_{24} con el período de retorno T y la duración d . La mencionada función permite, estimar las máximas precipitaciones para duraciones menores a la de 24 horas, a partir del dato diario de precipitación. Si bien la función ha sido desarrollada con la información pluviográfica de la estación de San Calixto, puede ser utilizada para discretizar precipitaciones diarias en otras estaciones de la cuenca. La figura 6 muestra las curvas obtenidas a partir de la referida función, para diferentes períodos de retorno. En ella se muestra así mismo la función resultante del análisis realizado.

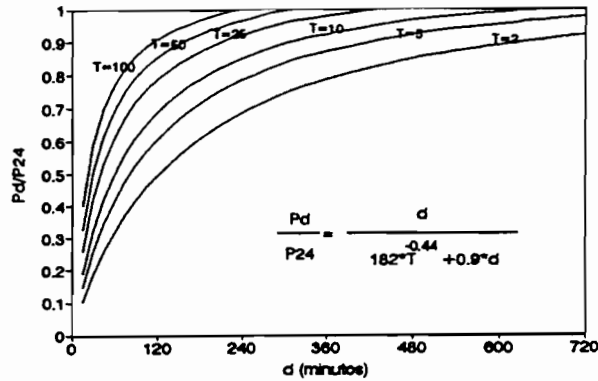


Figura 6 : curvas P_d/P_{24} vs. duración d para diferentes períodos de retorno - San Calixto

Con la información pluviográfica de la estación de San Calixto, para el período 1960-1991, se determinaron las curvas de intensidad, duración y frecuencia IDF, expresadas a través de la siguiente ecuación (Mendoza, 1994):

$$i = (101.261 * T^{0.338}) / (d^{0.629})$$

donde: i intensidad en (mm/h), T período de retorno en (años), d duración en (minutos)

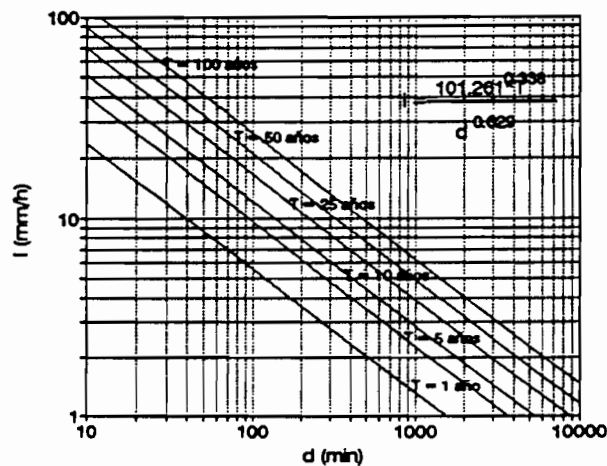


Figura 7 : Curvas intensidad - duración- frecuencia, San Calixto (período 1960-1991)

VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA PRECIPITACION

Metodología.- El estudio comienza con la recolección de la información que está basada principalmente en la base de datos pluviométricos y pluviográficos creada mediante el paquete PLUVIOM de la ORSTOM; sin embargo esta información se complementa con las observaciones de superficie registradas en las estaciones de AASANA-El Alto, San Calixto y Central La Paz. Una otra información importante es la relacionada a los mapas sinópticos que se generan diariamente en la estación de AASANA utilizada principalmente para la navegación aérea.

Si bien en la cuenca de La Paz existen alrededor de una treintena de estaciones de medición, algunas de ellas fueron clausuradas y un considerable número se encuentran densificadas en el valle del río Choqueyapu. Con la información existente, el primer paso dentro del procesamiento de la información consistió en la selección de eventos extremos, mayores a los 30 mm de precipitación en unas de las estaciones existentes. En los eventos seleccionados, si bien la estación de referencia tiene un valor mayor o igual a 30 mm, existen otras estaciones dentro de la cuenca que durante el mismo evento tienen valores de precipitación menores a los 30 mm. El siguiente paso consiste en completar para cada evento, los valores de precipitación del resto de las estaciones. Los registros que se utilizan para esta clasificación son los de pluviometría, ya que los registros pluviográficos son muy escasos puesto que las estaciones de este tipo son de un número muy reducido y con un corto período de observación salvo la estación de San Calixto.

Un evento extremo implica el analizar precipitaciones de magnitud apreciable que se presentan en toda o casi toda la cuenca, mediante lo cual, es mucho más fácil catalogar las distribuciones espaciales de la misma. Por otra parte, el poder interpretar el funcionamiento de los eventos extremos permite tener mejores criterios de diseño de obras civiles principalmente las de seguridad que se encuentran en cuenca.

Del total de eventos seleccionados, se realiza una depuración de eventos dejando solamente aquellos que cuentan con una buena cantidad de estaciones. A partir de este punto se procede complementar con la mayor información posible (mapas sinópticos, registros de superficie, etc) centrando la atención solamente sobre los eventos seleccionados con cuyos elementos se procede a realizar los análisis estadísticos y la interpretación de los mismos.

Movimiento de las masas de aire húmedo.- Se han realizado interesantes estudios relacionados a las masas de aire que circulan por el territorio boliviano principalmente en el oriente (Ronchail, 1986) pero poco se ha estudiado aún sobre las masas de aire húmedo que se presentan en el Altiplano especialmente en la cuenca del río La Paz. Sin embargo, de estos estudios se ha utilizado el mismo tipo de clasificaciones de las situaciones meteorológicas a nivel continental que afectan a Bolivia. La clasificación se basa primordialmente en la distribución y forma de las zonas de baja presión y las de alta (anticiclones) que se producen en la atmósfera sobre el territorio boliviano. Las situaciones meteorológicas más importantes se describen a continuación:

Depresión Atlántica (Dat). Corresponde a la presencia de una zona de baja presión en el Atlántico y otra sobre territorio boliviano con la presencia de un frente frío que une ambas zonas.

Vaguada (V). Es la situación meteorológica caracterizada por la presencia de una zona de baja presión en forma de vaguada que se presenta sobre el territorio.

Depresión Andina (Dan). Situación caracterizada por un zona de baja presión al interior del continente sobre territorio boliviano encerrada por zonas de alta presión.

Anticiclón Atlántico (Aat). Situación meteorológica que se caracteriza por la presencia de un anticiclón en el Atlántico que se extiende hasta territorio boliviano.

Anticiclón Pacífico Sur (Aps). Situación caracterizada por la presencia de un anticiclón sobre el Pacífico hacia el sur del continente que se extiende hasta territorio boliviano.

Anticiclón Pacífico Norte (Apn). Situación similar a la anterior pero con el anticiclón ubicado mas hacia el norte del continente.

Cabe recalcar que se admiten las combinaciones entre estos tipos de situaciones meteorológicas.

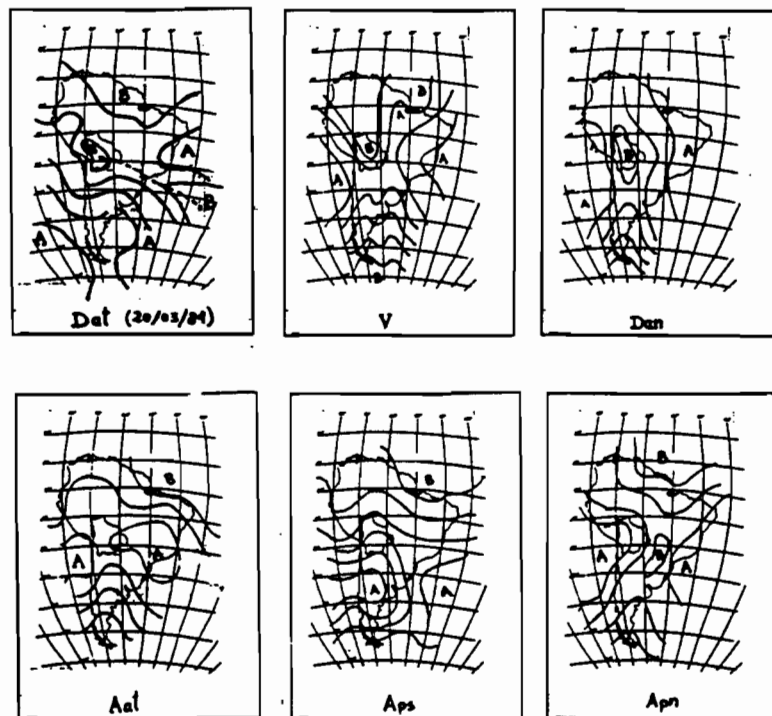


Figura 8 : Clasificación de las situaciones meteorológicas a nivel continental (Ronchail, 1986)

De los 20 eventos extremos seleccionados, solamente se encontraron los mapas sinópticos de 15 de ellos cuyas situaciones meteorológicas son las siguientes:

No.	Fecha	Tipología	No.	Fecha	Tipología
6	(19/01/1982)	Dan	14	(28/01/1990)	DatAat
7	(20/11/1982)	DatAat	15	(02/01/1990)	DanDat
8	(20/03/1984)	Dat	16	(12/01/1992)	Dan
9	(15/02/1986)	VDat	17	(16/01/1992)	DatApn
10	(19/08/1986)	VDanAat	18	(27/01/1993)	Dat
11	(25/12/1988)	Dat	19	(26/12/1993)	Dat
12	(26/12/1988)	DatAat	20	(29/12/1993)	DatAat
13	(20/02/1989)	DatAat			

De lo cual se observa que las situaciones meteorológicas analizadas de los 15 eventos se presentan con la siguiente frecuencia: DatAat (5); VDat (1); Dat (4); VDanAat (1); Dan (2); DanDat (1); DatApn (1).

Se observa que la situación meteorológica de Depresión Atlántica (Dat) se presenta en la mayoría de los casos. Esta característica muestra que los eventos extremos están muy relacionados con los fenómenos de tipo frontal, pues se debe recordar que la situación Dat se caracteriza por la presencia de frentes fríos consistentes en masas polares que provienen del sur del continente.

Se ha realizado un otro estudio centrado sobre la cuenca en análisis específicamente, orientado a comparar las direcciones predominantes de viento durante el día del evento con los valores de altura de precipitación registradas en las estaciones de AASANA-El Alto, San Calixto y Central La Paz ya sólo estas estaciones cuentan con la información necesaria y sobre todo porque se ha observado que existe un comportamiento de las precipitaciones un tanto distinto entre la ciudad de El Alto y la ciudad de La Paz. Se observó que en los eventos en los que se registró mayor precipitación en AASANA y menor en el centro de la ciudad, existe una combinación predominante de las direcciones de viento de N para AASANA y SE para San Calixto. En los eventos en los que se registraron menores (o similares) precipitaciones en AASANA y mayores en el centro se aprecia una predominancia de vientos con la combinación E para AASANA y SE para San Calixto.

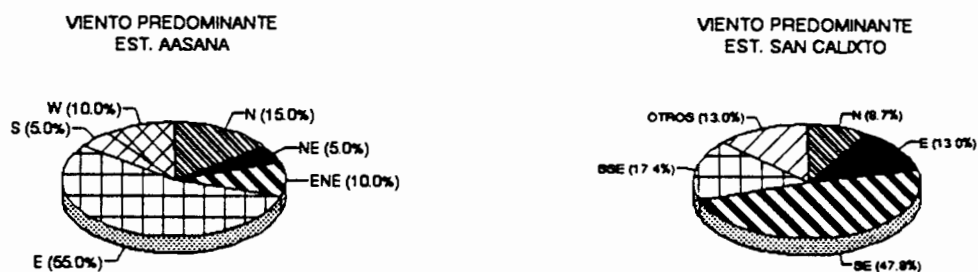


Figura 9 : Direcciones predominantes de viento durante eventos extremos

Un otro dato importante dentro del presente estudio es el conocer la posición en que se observaron las precipitaciones o más precisamente las nubes tormentosas o Cúmulo Nimbus durante los eventos extremos. Esta información fue extractada de los registros diarios de superficie que se elaboran en la estación de AASANA-El Alto para la navegación aérea. De esta información se encontraron solamente los datos de 13 de los eventos seleccionados. Se aprecia que existe una notable predominancia de observación de los cúmulo nimbus durante eventos extremos en las direcciones E y S/SW.

Correlogramas.- Una herramienta importante para el análisis de eventos extremos orientado principalmente al estudio de la relación existente entre las estaciones de medición, es la aplicación de los correlogramas, estos muestran la correlación existente entre estaciones en función ya sea de la distancia entre ellas o el desnivel existente entre éstas. Este análisis se lo realiza empleando una serie común de datos (los mismos eventos extremos) para las mismas estaciones meteorológicas de observación. Las correlaciones se obtienen mediante la ecuación de correlación simple del modelo lineal. La figura 10 muestra el correlograma para la estación de San Calixto.

Se realizó también el análisis de correlación múltiple para los parámetros distancia y diferencia de altura entre estaciones para los eventos extremos escogidos, de lo cual, se seleccionaron las ecuaciones de las estaciones que lanzaron un mejor ajuste (>al 75%). La ecuación de correlación múltiple utilizada es de la forma:

$$C = K + a(H) + b(D)$$

con C coeficiente de correlación, H diferencia de altura entre estaciones, D distancia entre estaciones, K, a, b constantes. De este análisis se obtuvieron los siguientes resultados:

Est.	K	a	b	R ² (coeficiente de ajuste)
101	0.96	-0.088	-0.000204	0.92
201	0.81	-0.053	-0.000060	0.74
205	1.10	-0.079	0.000358	0.85
211	1.06	-0.088	-0.000273	0.88
233	0.98	-0.083	-0.000133	0.87

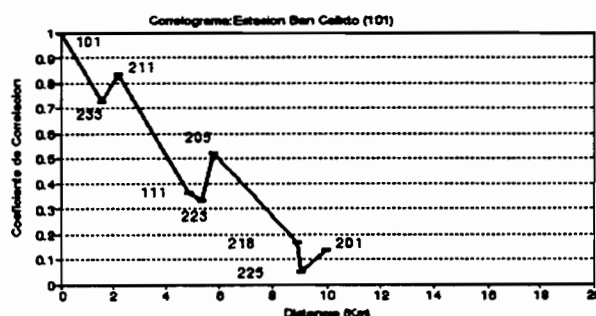


Figura 10 : correlograma para la estación de San Calixto

Un siguiente paso fue el de elaborar los correlogramas para 84 eventos de menor magnitud (>a 15mm) que se encontraron en el período 1980-1990. Del análisis de los correlogramas para eventos >30mm y los correspondientes para >15mm, se observó que para los primeros, existen mayores correlaciones entre estaciones ubicadas en la parte media de la cuenca pero bajas entre estas estaciones y las ubicadas en la parte baja de la cuenca. En el análisis de los correlogramas para los eventos >15 mm se observó que existe una correlación entre las estaciones ubicadas en el valle de Chuquiaguillo con las que se encuentran en el sector de Ovejuyo. Por otra parte se observó también que existe una correlación entre los sectores de El Alto y Achocalla que se encuentran fuera de la cuenca de estudio pero colindantes a esta por sus límites oeste y suroeste.

Variogramas.- Los variogramas son una otra herramienta perteneciente al campo de la geoestadística que permite hacer un análisis referido al comportamiento de tipo espacial de las variables estadísticas que en nuestro caso son las precipitaciones. En el análisis de variogramas se seleccionaron de los 20 eventos iniciales (>30 mm) aquellos que por la calidad de su información generaban variogramas de mayor confiabilidad. Para éstos se realizaron dos tipos de ajustes con modelos matemáticos predefinidos: el modelo exponencial y el modelo de Gauss,

$$(h) = A|h|^C \quad \text{Exponencial} \quad \text{y} \quad (h) = A(1 - e^{-(h/a)^2}) \quad \text{Gauss}$$

Tanto la determinación de los variogramas medios como la modelización de los mismos se la realizó gracias al paquete GEOSTAT desarrollado por la ORSTOM. Los siguientes gráficos muestran los dos tipos de ajustes respectivos para los mismos eventos seleccionados. De acuerdo a los ajustes según el modelo de Gauss, se observa que la distancia de decorrelación está en el orden de los 9 km.

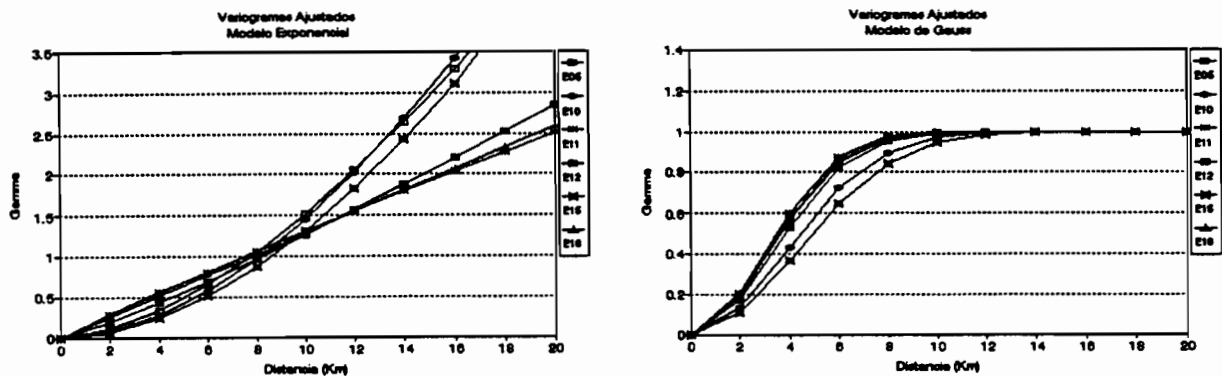


Figura 11 : Variogramas para varios eventos en la cuenca de La Paz

CONCLUSIONES

La escasa información pluviográfica existente limita el poder realizar un estudio minucioso de los eventos extremos, sin embargo, con la información encontrada se ha podido determinar que existe una notable variación en el desarrollo de los eventos a nivel temporal encontrándose que existe un retardo en la aparición de los picos en los hietogramas de eventos extremos, siguiendo un sentido de este a oeste en la cuenca. En eventos de baja intensidad, las precipitaciones se desplazan desde la parte alta hacia la parte baja y que existe una notable diferenciación entre las subcuencas, ya que al parecer, las correspondientes al Choqueyapu y Orkojahuirra pertenecen a una zona pluviométrica común y las correspondientes a Irpavi y Achumani pertenecen a otra, esto debido a que las masas húmedas de aire provienen desde la Amazonía en ingresan a la cuenca por dos sectores muy notables que están conformados por dos aberturas que se presentan entre los nevados Huayna Potosí-Cerro Rosario (al norte de la cuenca) y Cerro Rosario-Mururata (al este de la cuenca). La primera que involucra precisamente las subcuencas del Choqueyapu y Orkojahuirra y la segunda a las subcuencas de Irpavi y Achumani.

Contrariamente a lo anterior, se observa que las tormentas que aparecen durante los eventos extremos, provienen generalmente del sector SW, y que se desplazan a lo largo de la cuenca desde la parte baja hacia la parte alta. Además, este tipo de precipitaciones están relacionadas directamente a fenómenos de tipo continental vinculados a efectos del tipo frontal lo que hace una distribución de la precipitación más generalizada en toda la cuenca. Por otra parte, una característica de las precipitaciones en la cuenca de estudio, es que éstas son generalmente de corta duración pero de alta intensidad, sobre todo en eventos extremos, lo que unido al hecho de que los tiempos de concentración en la cuenca son pequeños provocan crecidas de consideración.

Agradecimientos - Los autores desean agradecer a los responsables del Observatorio de San Calixto y de AASANA del Alto por la entrega de los datos meteorológicos de las estaciones respectivas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AHENKE J.L.(1992) "Test de diversos modelos matemáticos para análisis de crecidas aplicado a la cuenca del río La Paz - Tesis de Grado UMSA"
- BOIVIN P. (1990). GEOSTAT-PC. Logiciel Interactif pour le calcul geostatistique, ORSTOM, Paris, 68p.
- BENJAMIN JACK R.y ALLIN CORNELL C. (1981) "Probabilidad y Estadística en Ingeniería Civil"
- BARRY R. (1992). Mountain Weather & Climate, 2nd edition. A volume in the Routledge Physical environment series. University of Cambridge. 402 p.
- CHOW V.T.,MAIDMENT D.R. and MAYS W.L. (1988) "Applied Hidrology"
- DESUROSNE I. (1992). Gradients d'intensites de Pluie en zones á Relief: Experimentations et Premiers modelisation des donnes d'un reseau Rhonalpin, le TPG. These de Doctorat, HYDROLOGIE-HYDRAULIQUE, Université Louis Pasteur, 255 p.
- DELHOMME J. (1976). Applications de la théorie des variables regionalisées dans les sciences de l'eau. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 160p.
- HASTENRATH S. (1991). Climate Dynamics of the Tropics. Departament of Meteorology , University of Wisconsin, Madison, U.S.A. 488p.
- MENDOZA R.J. (1994) "Estudio del Régimen Pluviométrico en la cuenca del río La Paz" - Tesis de Grado UMSA
- RONCHAIL J. (1986). Situations atmosphériques es precipitations comparées sur l'Altiplano et l'Amazonie; Bolivie. Publ. PHICAB, La Paz, 43p.