

ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LLUVIA EN CUENCAS DE MONTAÑA

P. Torres¹, R. Céleri^{1,2}, F. Cisneros¹, J. Feyen^{1,2}

En la cuenca del río Paute, sur del Ecuador, no se ha realizado una investigación integral sobre la distribución espacial de lluvia; preguntas sobre la adecuada densidad y ubicación de estaciones no ha sido contestadas con certeza. El presente trabajo contribuye al conocimiento de la distribución espacial de lluvia en la cuenca del río Paute en base al análisis de la información histórica de 60 estaciones de registro. La investigación incluye el procesamiento y análisis de la calidad y consistencia de la información pluviográfica de varias estaciones. Tres zonas de pluviografía diferente son delimitadas en el análisis, así como la confirmación de la influencia de los regímenes oriental y occidental en la distribución espacial de lluvia en la cuenca. Finalmente se determina gráficas que sirve para establecer recomendaciones sobre la ubicación y densidad de estaciones pluviográficas para la obtención de una adecuada caracterización de la distribución espacial de lluvia.

1 INTRODUCCION

1.1 Antecedentes y justificación

La consideración de la caracterización espacial y temporal de la lluvia ha venido incrementándose en importancia para procesos de manejo de cuencas hidrográficas, análisis de producción de cuencas, modelación hidrológica, diseño y manejo de riego, entre otras. El uso de la lluvia espacial y temporal es indispensable para producir una buena representación de la hidrología superficial y procesos de escorrentía. Mediante la modelación espacial se puede generar datos de lluvia en localidades donde no existen mediciones; sin embargo, la calidad de las estimaciones no solamente depende de los métodos usados para interpolación sino también de la calidad natural de datos y/o de la buena calibración del modelo que se emplee. Esto es de suma importancia, en especial cuando se utilizan modelos hidrológicos distribuidos para la predicción del caudal de ríos.

En la cuenca del río Paute, de vital importancia para el Ecuador; ya que en ella se desarrollan varios proyectos hidroeléctricos importantes que aportan con el 50% de la energía eléctrica del país y en la que se encuentra la ciudad de Cuenca, tercera ciudad en importancia política, varias son las instituciones que realizan actividades de desarrollo empleando la distribución espacial de lluvia. Sin embargo, la caracterización de la precipitación en la cuenca hasta el momento no ha sido analizada en una manera integral, cada institución realiza cálculos de intensidades de lluvia en un ámbito local en referencia a la zona en la que esta trabajando, sin considerar el aspecto general de la cuenca del Paute, en la que muchos son los factores particulares que pueden influenciar a la distribución espacial de lluvia.

Para el desarrollo de un variado número de estudios hidrológicos en una cuenca, la estimación de la precipitación media debe ser determinada con anticipación; una mala estimación de la distribución espacial de lluvia puede conducir a errores muy significativos en las actividades en la que se utiliza, con la consecuente pérdida de recursos económicos de escasa

¹ Programa para el Manejo del Agua y del Suelo, PROMAS. Universidad de Cuenca. promas@ucuenca.edu.ec

² Departament of Land Management and Economics, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.

disponibilidad en la economía del país, una posible solución a este problema sería el presentar la densidad y ubicación apropiada de pluviómetros para tener una adecuada caracterización de la precipitación en la cuenca hidrográfica.

La adecuada ubicación de estaciones de medida de lluvia está estrechamente relacionada a la variación normal de la lluvia en una región específica. En algunas regiones de Estados Unidos por ejemplo se ubica 1 pluviómetro por cada 650-900 Km². Con este espaciamiento, investigaciones (Technical Engineering and Design Guides, 1997, pp. 19-20) estiman que la desviación media en la determinación de la precipitación anual en una cuenca de 256 Km² es de alrededor del 20%. En 1990, Goodrich determinó, a través de la calibración de un modelo lluvia-escorrentía en dos pequeñas cuencas de 0.44 ha y 4.4 ha de área, que la influencia del número de pluviómetros usado en el cálculo del caudal estimado de salida, produjo variaciones de hasta 43% en resultados de picos medidos, En Australia la determinación de la precipitación media de cuencas a través de información de estaciones en campo, en comparación con estimaciones a partir de datos obtenidos por radar dieron como resultados diferencias en estimaciones para la media de la cuenca de hasta 69 % (Bartolini 1999).

Muchos son los análisis que se han realizado sobre los efectos que produce la densidad de mediciones en los resultados de distintos cálculos hidrológicos (Dawdy and Bergman 1969, Beven and Hornberger 1982, Restrepo 1994, Govindaraju 1994, Faures et al. 1995, Pardo-Igúzquiza 1998, Bartolini et al. 1999, Willems 1999, Said 2002); así como varias son las recomendaciones sobre los espaciamientos óptimos entre mediciones según las características propias de las zonas en las cuales se ha investigado (Goodrich 1990, Govindaraju 1994, Restrepo 1994, Pardo-Igúzquiza 1998, Willems y Berlamont 2002).

En terrenos con fuerte variación de elevación, la lluvia puede variar fuertemente de localidad en localidad. Investigaciones (Bacchi et al. 1995, Prudhomme 1999, Goovaerts 1999, Holawe et al. 1999, Wotling et al. 2000, Christen 2003, Marquínez 2003) demuestran la influencia que puede tener en la distribución espacial de lluvia, ciertos aspectos relacionados con factores característicos de la cuenca como: distancias, gradientes climáticos o topográficos, dirección del viento, pendientes, entre otros. En el ámbito local, en la provincial del Azuay y en la cuenca del río Paute, pocos son las investigaciones realizadas sobre la distribución espacial de lluvia y por consiguiente escasas las recomendaciones sobre la densidad y ubicación de estaciones de medida. Restrepo en el 1994 basado en un estudio estadístico, presenta una recomendación sobre la ubicación de 35 estaciones de lluvia en la cuenca. Por otro lado, varios son los autores (Dercon et al. 1998, Bacuilima et al. 1999) que mantienen que la variación en la distribución de lluvia dentro de la cuenca del río Paute, se debe a la acción de la influencia de las épocas lluviosas que se presentan en el sector oriental y occidental de la cordillera en combinación con la variación altitudinal de la zona. Dercon et al. (1998), en la "Zonificación Agroecológica del Austro Ecuatoriano", manifiestan la influencia de Costa y Oriente en la presencia de dos picos de precipitación en la distribución mensual de lluvia de la región. Bacuilima et al. (1999), plantean una relación para la determinación de la lluvia puntual en función de la altura del terreno con referencia al nivel medio del mar. Sin embargo, como anteriormente se manifestó, la variabilidad de la lluvia no solamente está influenciada por el factor altura, sino por un variado número de parámetros geográficos o climáticos. En tal virtud, es importante iniciar el estudio sobre la influencia que pueden tener sobre la precipitación, los parámetros topográficos de la zona, con la finalidad de determinar en un

futuro modelos de predicción de lluvia que tomen en cuenta el efecto producido por los distintos parámetros característicos de la región.

2 TEORIA Y METODOS

Varias son las metodologías que se han utilizado para el estudio de la densidad y ubicación de estaciones pluviográficas en una cuenca hidrográfica. Entre las principales podemos mencionar la desarrollada por Goodrich en 1990 y replicada por Faures et al. en 1995, este procedimiento se basa en la calibración de un modelo lluvia-escorrentía para la determinación del caudal producido por una cuenca, el análisis del efecto que produce la variación del número o ubicación de estaciones de lluvia es evaluado estadísticamente a través de la determinación de la variación en el caudal generado por el modelo. Similares procedimiento es utilizado por Dawdy et al. (1969) con la comparación de los caudales producido por una cuenca y el estimado a partir de los valores de precipitación media obtenida en base a las mediciones de lluvia de un diferente número de pluviógrafos.

En el ámbito local, Restrepo en 1994, para el diseño de la red de pluviógrafos en la cuenca del río Paute plantea una metodología que como manifestó “se basa en una técnica de estimación espacial óptima llamada Kriging”; el procedimiento utilizado consistió en un estudio iterativo con el aumento, disminución y/o modificación de la ubicación de estaciones de lluvia existentes en la cuenca con la finalidad de minimizar el error espacial de estimación generado a través del estimador lineal de Kriging.

Por otro lado, Pardo-Igúzquiza en 1998, similar al procedimiento de Restrepo, plantea para el establecimiento de un diseño óptimo de una red de pluviógrafos para la estimación de promedios de eventos de lluvia, un método que consiste en la minimización de una función objetivo que incluye la calidad de la estimación media (expresada por la varianza de estimación por interpolación a través de Kriging) y los costos económicos de la recolección de datos. Este procedimiento implica un buen conocimiento de geoestadística a fin de aplicar métodos de reducción de varianza en combinación de simulaciones con algoritmos de minimización.

Otra técnica utilizada que toma en cuenta el análisis de estaciones pluviográficas existentes en una cuenca hidrográfica, es la desarrollada a través de un análisis de correlación espacial en función de diferentes parámetros climáticos y/u orográficos característicos de la zona de estudio, determinando su buena o mala ubicación en función de la variabilidad que presenta con las estaciones cercanas a su ubicación. Esta técnica ha sido utilizada con buenos resultados por Bacchi et al. (1995) en Lombardía al norte de Italia y por Witold et al. (2003) en cinco localidades alrededor del mundo (Brasil, Florida, Iowa, Oklahoma, Guam).

Said en el 2002 utilizó una metodología que implica la calibración de un modelo de generación de lluvia en una cuenca hidrográfica, el procedimiento que siguió consiste en comparar estadísticamente las precipitaciones medias de varios eventos de lluvia determinados por el modelo y las distintas redes de pluviógrafos establecidas.

Es importante recalcar que la aplicación de las técnicas mencionadas en su gran mayoría han sido aplicadas en zonas de topografía plana y con elevaciones que no sobrepasan los 1300 metros de altura respecto al nivel medio del mar.

2.1 Metodología a utilizar

La alta disponibilidad de información pluviográfica, con la existencia de 60 estaciones de medida, con series de datos entre 1 y 22 años, tanto en escalas de tiempo diaria y mensual, así como su distribución en la cuenca con diferencias de ubicación en distancia, desde 0.5 Km entre las mas cercanas, hasta 32 Km entre las mas lejanas y con diferencias de elevación entre 0 y 3100 metros, nos condujo a utilizar un método de investigación que combine todas estas características y disponibilidad de información. La metodología escogida se basa en el análisis de series de datos mediante la determinación de un coeficiente de correlación entre pares de registros de estaciones. Este coeficiente de correlación es un parámetro estadístico utilizado para determinar la relación entre dos propiedades; al analizar dos series de datos podemos determinar que las dos varían juntas en cierto momento, pero no necesariamente existe una relación de causa a efecto. Lo que encontramos con el coeficiente de correlación es una medida que indique el grado de covariabilidad que existe entre las series.

Esta metodología con ayuda de un análisis gráfico en función de factores como:

- la distancia entre estaciones, y
- la diferencia de elevaciones entre estaciones

nos proporciona indicios sobre las características actuales de la distribución espacial de lluvia en la cuenca, ayudándonos de esta manera, a determinar recomendaciones sobre la adecuada densidad y ubicación de estaciones en la cuenca del río Paute.

2.2 Fundamento teórico básico

Una de las técnicas más usadas en estadística para el análisis de datos es la correlación; este parámetro se puede analizar desde dos puntos de vista:

como medida de la covariabilidad de dos variables X e Y, y como la medida de la bondad de ajuste de una recta de regresión a la distribución de las observaciones.

En la presente investigación se analiza el coeficiente de correlación como medida de covariabilidad entre variables y esta dado por la relación:

$$\rho = Cov(X,Y) / \sigma_X \sigma_Y \quad (2.1)$$

Donde:

ρ	coeficiente de correlación
$Cov(X,Y)$	covarianza de X e Y
$\sigma_X \sigma_Y$	varianza de X e Y

Los valores de X e Y se convierten en la población analizada estadísticamente, que para el presente caso se convierten en los valores de la precipitación de dos diferentes estaciones. Esta información no corresponde a valores fijos, sino que varían conjuntamente en el tiempo, por lo que se puede clasificar como una población con una distribución di-variada (Fisher et al., 1982, pp. 254-255)

El coeficiente de correlación toma valores entre -1 y 1; valores cercanos a la unidad significa una perfecta correlación, mientras valores cercanos a 0 indica la no existencia de correlación; un aspecto importante en la determinación del coeficiente de correlación, es que el análisis de la información debe realizarse en períodos de tiempo comunes, con similar intervalo de medición e igual número de registros. Es importante aclarar que el coeficiente de correlación trata solo de la asociación entre las variables y no de su independencia o dependencia.

3 MATERIALES

3.1 Delimitación de la zona de estudio

La investigación se realizada en la cuenca del río Paute, ubicada en la Sierra sur de los Andes Ecuatorianos entre las cordilleras Oriental y Occidental, en la unión de las provincias de Azuay y Cañar. Posee un área aproximada de 5000 km²; su relieve es muy irregular con cotas que van desde los 1600 ms.n.m. hasta los 4600 ms.n.m. Presenta diferentes pisos climáticos que provocan que la vegetación sea muy variada con extensas áreas de páramo en las partes altas de la cordillera; en ella se desarrolla la ciudad de Cuenca tercera ciudad del país y capital de la provincia del Azuay, así como la ciudad de Azogues capital de la provincia de Cañar. En sus cursos fluviales se levantan varios proyectos hidroeléctricos de importancia como el proyecto hidroeléctrico Paute con la represa Daniel Palacios que aporta aproximadamente el 50% de la electricidad del país.

3.2 Series de datos de lluvia disponibles

Para la investigación se ha utilizado la información de 60 estaciones pluviográficas y pluviométricas que han funcionado y/o funcionan en la zona de estudio. La información ha sido obtenida de dos fuentes principales: de la Universidad de Cuenca a través del Programa para el Manejo del Agua y del Suelo (PROMAS) y de la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca (ETAPA). En la Figura 3.1 se aprecia la ubicación de las estaciones utilizadas. Adicionalmente en la Tabla 3.1 se presentan algunas características de las estaciones dentro de la cuenca hidrográfica.

No. Estaciones:	60		
Area de la Cuenca:	5000 Km ²		
	Distancia entre estaciones (Km)	Diferencia altitudinal entre estaciones (m)	Cota de estaciones (ms.n.m.)
Media	34.66	397	2882
Mínima	0.04	0	2000
Máxima	93.13	1640	3960

Tabla 3.1. Características generales de las estaciones en la cuenca del río Paute.

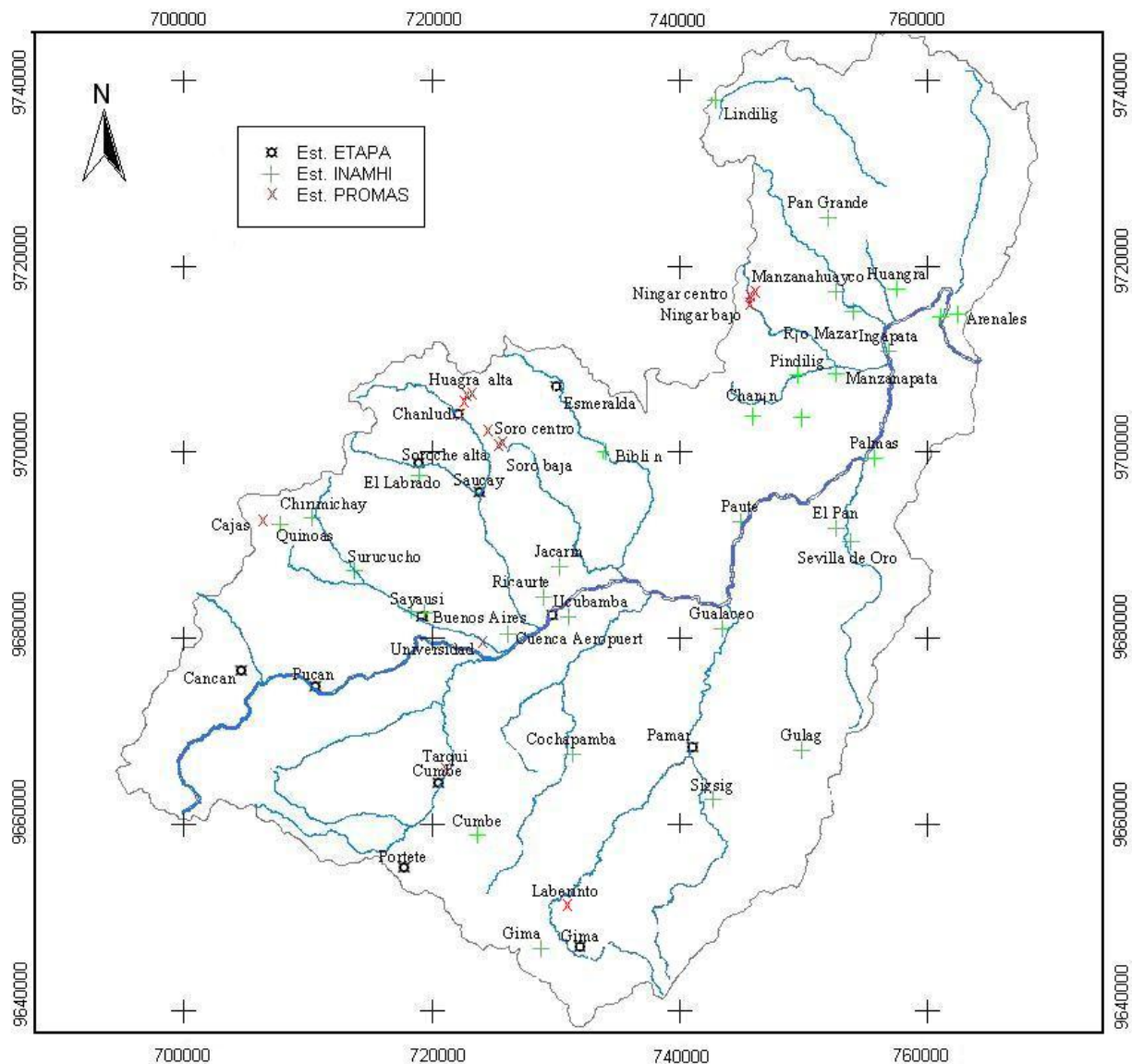


Figura 3.1. Ubicación de estaciones en la cuenca del Paute.

3.2.1 Estaciones de PROMAS-INAMHI

La información corresponde a 48 estaciones de medida, 34 de las cuales pertenecen a información pluviométrica almacenada en su base de datos. Esta información ha sido adquirida por la institución en el ámbito de convenios y consultorías realizados con varias instituciones que ha su vez han recopilado información de INAMHI (Instituta Nacional de Meteorología e Hidrología). Las estaciones presentan registros a escala de tiempo diaria y mensual; 3 estaciones presentan series de 30 años (1963 – 1993) con un porcentaje alrededor del 6% de datos perdidos, 6 con series entre 20 y 29 años, 21 estaciones con rangos de información de 10 años y 4 con datos de menos de 4 años.

Las 14 estaciones restantes son manejadas por el PROMAS. La información es almacenada a través de estaciones de tipo automática. No presentan la característica de retransmisión de información en tiempo real; la lectura se hace en períodos de tiempo entre de 2 y 3 meses.

La mayor parte de las estaciones manejadas por PROMAS, 11 de ellas, están ubicadas en la parte alta de la cuenca y las restantes 3 en la parte media. Estas estaciones presentan series de datos cortas por su reciente implementación; una de ellas presenta registros desde el año 2000 (4 años de información), 5 desde el año 2001 y las restantes con información desde el año 2002.

3.2.2 Estaciones de ETAPA

ETAPA es una empresa municipal que trabaja en el cantón Cuenca. A fines de 1998 suscribe un contrato de comodato para la operación y mantenimiento de una red pluviográfica y limnigráfica de tipo automática denominada: Red Hidrometeorológica Unificada de la Cuenca del río Paute (RHUP) con el fin de estudiar y monitorear los diferentes fenómenos naturales que pudieran afectar la cuenca del río Paute (ETAPA, Red Hidrometeorológica Unificada de la cuenca del río Paute, 2000). La RHUP posee información de 12 estaciones pluviográficas de tipo automática, 7 ubicadas en las cabeceras de la cuenca y 5 en la cuenca media. La red de estaciones posee la característica de retransmisión en tiempo real.

De las 12 estaciones pluviográficas, 9 de ellas presentan información desde agosto de 1997 hasta julio del 2003, con una serie de 6 años de información; las restantes estaciones poseen información a partir del año 2002, con series de información de 1.5 años

3.3 Procesamiento de datos

La información correspondiente a estaciones con series históricas (INAMHI) fue obtenida en dos escalas de tiempo: diaria y mensual. Para el caso de las series mensuales, los registros presentaron un procesamiento y verificación previo (Bacuilima et al., 1999) mientras para el caso de las series de precipitación diarias, se procedió a realizar un procesamiento consistente en el ordenamiento cronológico de sus registros y la posterior depuración de errores con la detección de registros faltantes, duplicados o erróneos. Es importante el recalcar que el volumen de datos manejado fue muy elevado lo que requirió una alta inversión en tiempo y esfuerzo para su manejo y procesamiento y estudio.

En lo referente a las series de precipitación de estaciones automáticas, tanto de ETAPA como de PROMAS fue recopilada a nivel de los registros bases almacenadas por las estaciones, estos formatos no presentan un formato y ordenamiento de información que permita el empleo directo de los registros de lluvia, por lo que se sometieron a un procesamiento para su ordenamiento y conversión a formatos en tres escalas de tiempo: horarios, diarios y mensuales. Este procesamiento de los registros base se realizó con la ayuda de una hoja electrónica con el empleo de macros y filtros. Una descripción de los formatos de la información recopilada y procesada se los encuentra en el Anexo D. Posterior al procesamiento de la información en las diferentes escalas de tiempo, se procedió a realizar un análisis de consistencia y homogeneidad de la información. El análisis se desarrollo través del empleo del método de dobles acumulaciones (Rodríguez, 2000), tal como se aprecia en la Figura 3.2 para las estaciones de Cancan, Pucan, y Sayausí.

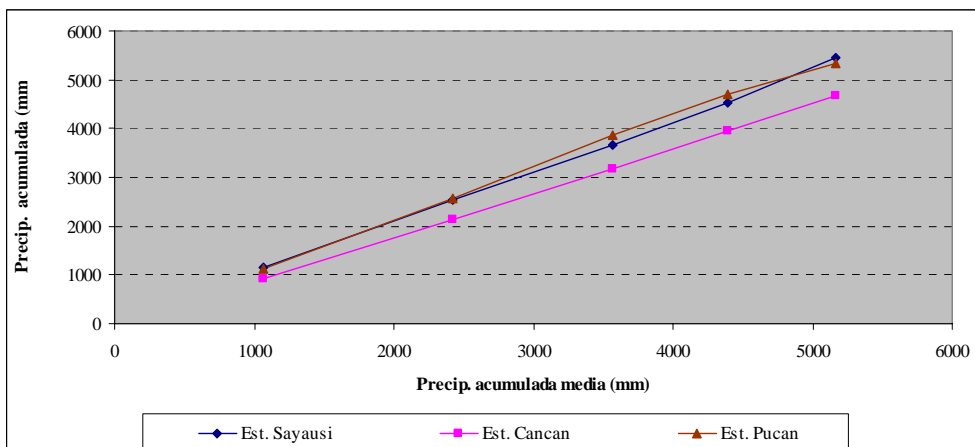


Figura 3.2. Curvas de doble acumuladas.

Adicionalmente se ha utilizado el software “Rainbow” desarrollado en la Universidad Católica de Lovaina que realiza en forma automática el estudio de probabilidades y test de homogeneidad de registros hidrológicos. Este programa considera que para que un registro sea homogéneo, su desviación respecto a la media de la serie debe fluctuar alrededor de cero (Raes, 1998). El análisis presenta gráficamente las desviaciones acumuladas de los registros pluviográficos respecto de la media de los valores (test estadístico) conjuntamente con información de la probabilidad de rechazar la homogeneidad del registro en relación al rango y máxima desviación de la media. Si es el caso, un estimado del punto de cambio de la homogeneidad es mostrado. El programa presenta la ventaja que los años con observaciones perdidas son omitidas en el cálculo. En la Figura 3.3 y 3.4 se presenta el resultado para la estación de Sayausí.

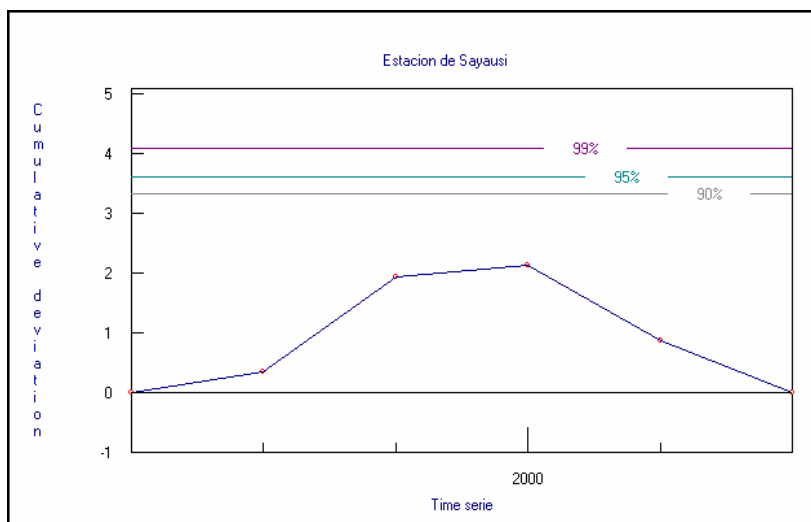


Figura 3.3. Análisis gráfico de homogeneidad de la estación de Sayausí.

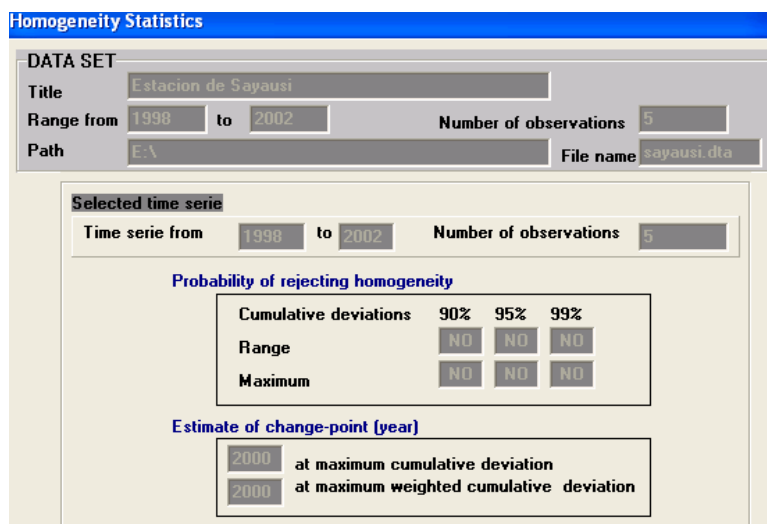


Figura 3.4. Análisis estadístico de homogeneidad de la estación de Sayausí.

Se debe aclarar que el estudio de consistencia se ha realizado en aquellas estaciones que poseen información de al menos 4 años de registros. Del análisis realizado, se determina que las estaciones analizadas no presentan problemas de homogeneidad en sus registros.

4 RESULTADOS

Como se ha especificado con anterioridad, la determinación del coeficiente de correlación requiere estaciones con series de datos simultáneos. En la cuenca de río Paute no todas las estaciones poseen períodos de registro similares; por tanto, para la investigación se ha considerado dos grupos de estaciones: PROMAS-ETAPA e INAMHI, que poseen series comparables de registros y en consecuencia posibilitan la determinación del coeficiente de correlación. El método gráfico con el que se desarrolla la investigación nos permite realizar un análisis de los coeficientes de correlación en forma global en la cuenca; sin embargo, para comparaciones o análisis que se realizan en referencia a un nivel más profundo en la que se debe considerar cada una de las estaciones, el análisis se lo realiza en consideración al grupo de estaciones a la cual pertenece. La metodología seguida en la investigación implica la generación de un gran número de gráficos de análisis; por su gran volumen se incluyen en el presente capítulo únicamente aquellas que contribuyen al correcto entendimiento del análisis y resultados obtenidos en la investigación; adicionalmente en los Anexos se presenta un resumen de los gráficos de mayor importancia en la determinación de resultados y conclusiones de la investigación.

4.1 Análisis de estaciones de precipitación de la cuenca del río Paute

Con los coeficientes de correlación obtenidos para los grupos de estaciones: PROMAS-ETAPA e INAMHI, se ha elaborado los gráficos de la Figura 4.1, en los que se presenta el coeficiente de correlación en función de la distancia existente entre las estaciones. Estas gráficas nos permiten realizar un análisis de la uniformidad de los patrones de lluvia en la cuenca del río Paute en dos escalas de tiempo: diaria y mensual.

Analizando la Figura 4.1 (a) en la escala de tiempo mensual, notamos que la variabilidad del coeficiente de correlación es muy elevada; se aprecia la existencia tanto de valores altos como bajos, para estaciones que están ubicadas a distancias muy cortas o muy lejanas entre sí. Esta distribución en la escala de tiempo mensual nos indica que el parámetro de la distancia existente entre estaciones es un factor que tiene incidencia en el momento de realizar la descripción de la distribución espacial de lluvia en la cuenca; sin embargo, su grado de influencia, en mayor o menor grado, dependerá de las características propias del sector que se este analizando.

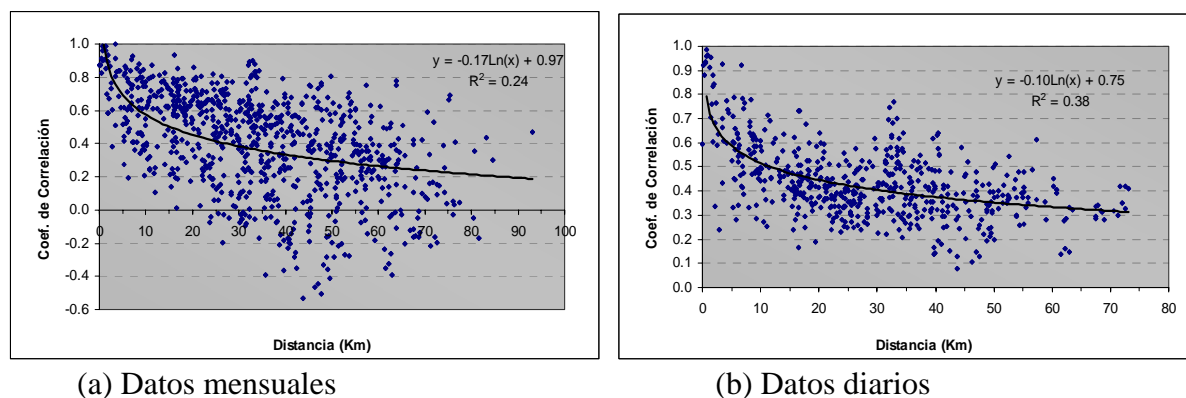


Figura 4.1. Correlación de registros de lluvia en la cuenca del río Paute.

En lo referente a la escala de tiempo diaria, como se determina en la Figura 4.1 (b) la variabilidad en los patrones de lluvia es menor a la mensual. Los registros toman una tendencia clara a una nube de puntos que va descendiendo de acuerdo aumenta la distancia existente entre estaciones; a este nivel de análisis, se determina que el espaciamiento existente entre las estaciones de registro de lluvia es un factor que afecta en el nivel de descripción de la variabilidad de lluvia. Para los registros obtenidos en las escalas diaria y mensual se han analizado posibles tendencias de ajustes a curvas; como resultado se obtuvo una curva de tipo logarítmica, tal como se aprecia en la Figuras 4.1 (a) y 4.1 (b), con un coeficiente de determinación de 0.24 y 0.38 respectivamente, que si bien no son valores elevados, nos ayuda a comprender que la variabilidad espacial de lluvia registrada en la cuenca del Paute puede ser justificada en un 24% para la escala mensual y en un 38% para escala diaria en función del espaciamiento existente entre las estaciones de precipitación.

Al realizar el análisis de los coeficientes de correlación en función de la diferencia de cotas existente entre las estaciones, tal como se observa en la Figura 4.2, análogo al caso del análisis en función del espaciamiento entre estaciones, se determina que en la escala de tiempo mensual la variabilidad de los coeficientes es mucho mayor que en el caso de la escala de tiempo diaria por lo que podemos deducir que la influencia de este parámetro en la distribución espacial de lluvia en la cuenca toma una mayor importancia en los registros de información diaria que en la mensual. De un análisis de tendencia a curvas de ajuste, se determina que para el caso de datos mensuales no se puede determinar una curva de ajuste aceptable; mientras que para datos diarios la que mejor resultado presenta es un ajuste de tipo logarítmico. Sin embargo, el valor de R^2 encontrado no es alto (0.13), por lo que se concluye, como se manifestó anteriormente, que el parámetro del desnivel entre estaciones incide en la

descripción de la distribución espacial de lluvia, pero su grado de influencia es en menor grado que la del espaciamiento existente entre estaciones.

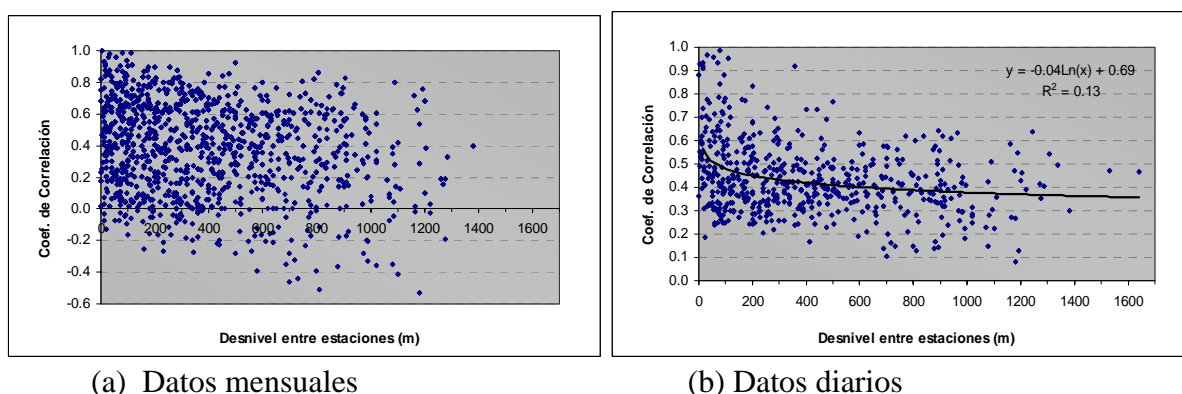


Figura 4.2. Coeficiente de correlación en función de diferencia de altura entre estaciones.

4.2 Análisis de la distribución espacial de lluvia por estación

Con la finalidad de realizar un análisis más profundo de la variabilidad de la distribución de la precipitación en la cuenca, se realizó un análisis de los coeficientes de correlación en consideración a cada una de las estaciones de la cuenca. Es decir, se toma una estación y se grafican los coeficientes de correlación entre esta estación y las restantes en función de la distancia y desnivel existentes entre cada par de estaciones. Se debe aclarar que este análisis debe realizarse por separado para las estaciones de PROMAS-ETAPA e INAMHI debido al distinto período de registros de precipitación.

4.2.1 Estaciones PROMAS-ETAPA

Con los coeficientes de correlación determinados a partir de las series de datos mensuales y en función de la distancia existente entre pares de estaciones, se realizaron gráficos para cada una de las estaciones, tal como se aprecia en las Figuras 4.3, 4.4 y 4.5 para las estaciones de Ucubamba, Labrado y Ningar Alto respectivamente. Las gráficas del total de estaciones se las encuentra en el Anexo E.

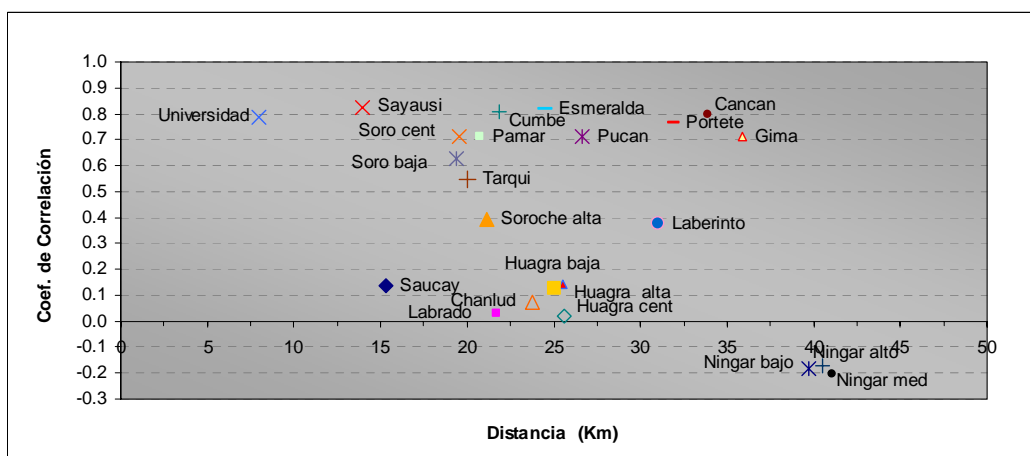


Figura 4.3. Estación de Urubamba.

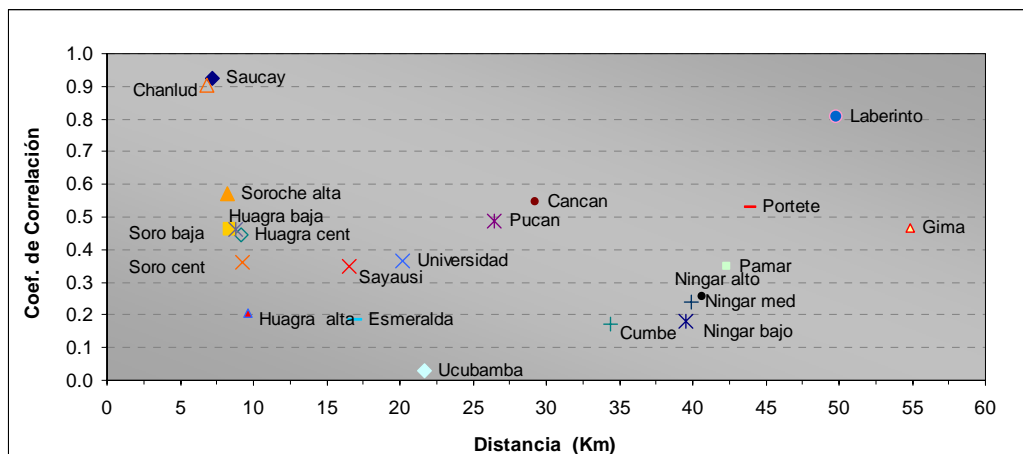


Figura 4.4. Estación de El Labrado.

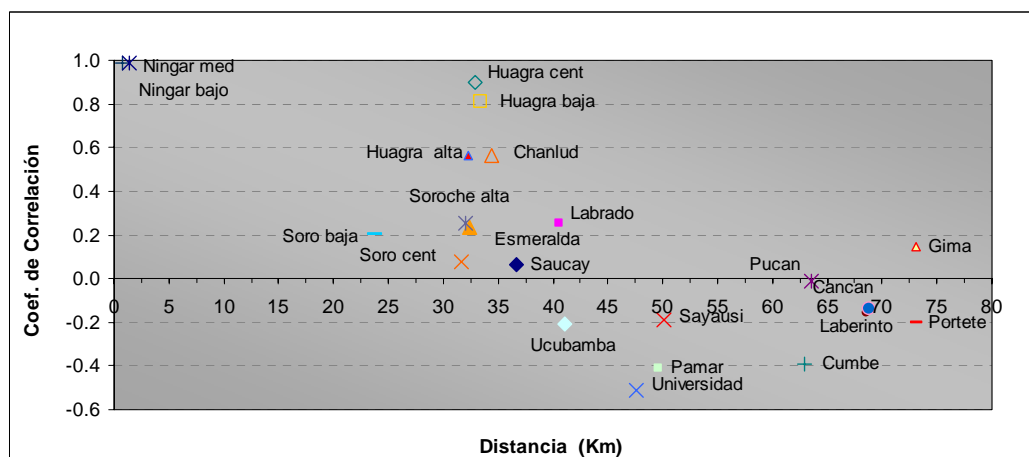


Figura 4.5. Estación de Ningar Alto.

Examinando los gráficos para cada una de las estaciones de la cuenca en comparación con las restantes se determinó características similares entre varias de ellas. Si se analiza los gráficos de las estaciones de la cuenca del río Paute, excepto aquellas que se encuentran dentro de las subcuencas del río Machángara y río Ningar, se determina tal como se aprecia en la Figura 4.3 para la estación de Ucubamba, que presentan coeficientes de correlación similares entre sí y superiores a valores de 0.7, mientras que para las estaciones restantes de la cuenca presentan valores del coeficiente de correlación inferiores a 0.5 e incluso valores negativos (variación de registros en sentido contrario). Por otro lado, si se analiza los gráficos de las estaciones que se encuentran dentro de la subcuenca del río Machángara, específicamente las estaciones de Saucay, El Labrado y Chanlud; se determina que estas estaciones al igual que las anteriores, presentan un coeficientes de correlación entre sí superior a 0.7 e inferior a 0.5 con las restantes de la cuenca, tal como se observa en la Figura 4.4 para la estación de El Labrado.

Finalmente al analizar los gráficos de las estaciones que se encuentran en la subcuenca del río Ningar y río Huagrauma se determina nuevamente que los coeficientes de correlación entre las estaciones que se ubican dentro de estos sectores presentan coeficientes de correlación

altos entre sí y bajos y/o negativos en comparación con las restantes, tal como se observa para la estación de Ningar Alto en la Figura 4.5.

En consecuencia se determina la existencia en la cuenca del río Paute de tres zonas de pluviografía similar. En lo referente a las estaciones de Soroche el análisis de sus coeficientes de correlación no indica en forma clara su pertenencia a uno de los grupos de estaciones establecidos; es decir, presentan una buena correlación con estaciones que pertenecen a dos o tres de los grupos de estaciones de similar pluviometría. En tal virtud se establece que las estaciones de la zona de Soroche están ubicadas en la zona de transición entre los grupos de similar pluviometría previamente definidos.

Es de importancia resaltar que este análisis se realiza a partir de la información de precipitaciones disponible en la actualidad, que para el caso de las estaciones de la cuenca del río Machángara corresponden a un período no mayor a un año y medio de registros, por tanto, la conclusión de la existencia de una zona de pluviometría diferente en esta subcuenca debe ser verificada en un futuro cuando la disponibilidad de información de precipitaciones en la zona sea de mayor amplitud en tiempo.

Los límites de estas zonas de diferente pluviografía no se pueden determinar en una manera clara. Los registros de las estaciones disponibles no presentan cambios abruptos en los coeficientes de correlación que ayuden al establecimiento de los límites de cada zona, sin embargo en la Figura 4.6 se presenta una delimitación de las zonas de similar pluviografía basada en la ubicación y análisis de la información disponible.

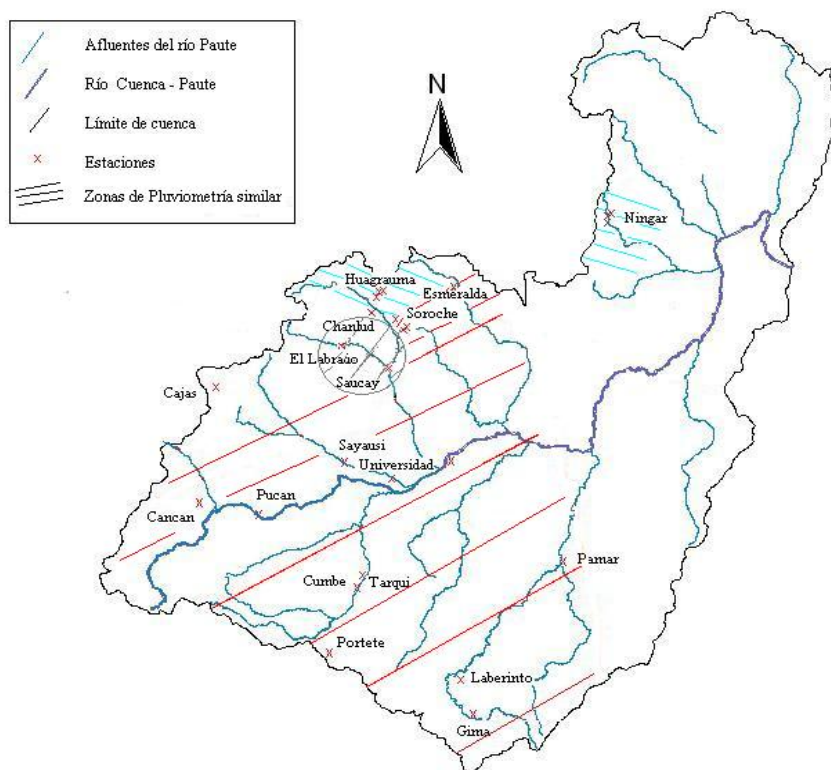


Figura 4.6. Zonas de pluviografía similar en la cuenca del Paute.

Un análisis adicional realizado corresponde a la elaboración de las gráficas de la Figura 4.7 en la que se analizan dos transectos de la cuenca. El primero de Norte a Sur y el segundo de Este a Oeste. Los gráficos presentan en el eje de las abscisas las estaciones que han sido consideradas en el transecto y en las ordenadas la cota de la estación y el valor del coeficiente de correlación entre las dos estaciones pluviográficas consecutivas consideradas.

En la alineación Este - Oeste, Figura 4.7 (a), se observa que la correlación entre las estaciones no presenta una variación alta en sus registros y los valores de los coeficientes corresponden a valores mayores a 0.7 en su mayoría. Por el contrario en el sentido Norte - Sur, Figura 4.7 (b) que atraviesa dos de las zonas de estaciones de similar pluviografía determinadas en la cuenca, se observan variaciones de los coeficientes de una estación a otra muy pronunciados, adicionalmente se aprecia en este gráfico que la correlación existente entre estaciones que se encuentran en un grupo de similar pluviografía presentan una correlación alta.

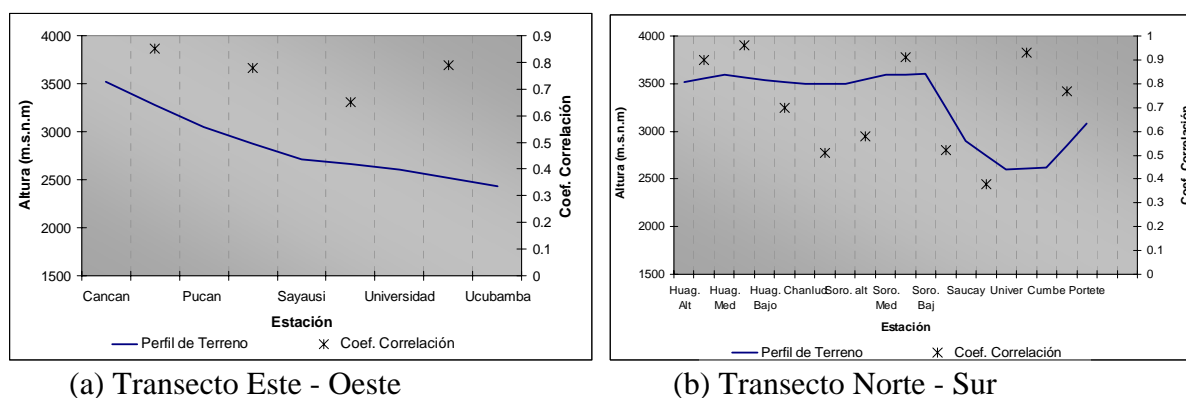


Figura 4.7. Análisis de transectos de estaciones en la cuenca del río Paute

4.2.1.1 Análisis de la influencia de los regímenes de costa y oriente

Para realizar un análisis en referencia a lo presentado en la “Zonificación Agroecológica del Austro Ecuatoriano” (Dercon et al., 1998) referente a la influencia en la distribución de la lluvia en la cuenca del Paute por la incidencia de las épocas lluviosas de las regiones Costa y Oriente del país se realizaron las gráficas de cada una de las estaciones por época del año considerando los coeficientes de correlación en función de la distancia existente entre estaciones en dos grupos de meses: Enero a Junio y Julio a Diciembre. Esta división anual se realizó por la presencia de la época lluviosa en la Costa de Enero a Junio y en el Oriente de Julio a Noviembre (Dercon et al., 1998). En las Figuras 4.8 y 4.9 se presentan los gráficos para dos estaciones de la cuenca; los gráficos de las estaciones restantes se los puede encontrar en el Anexo D.

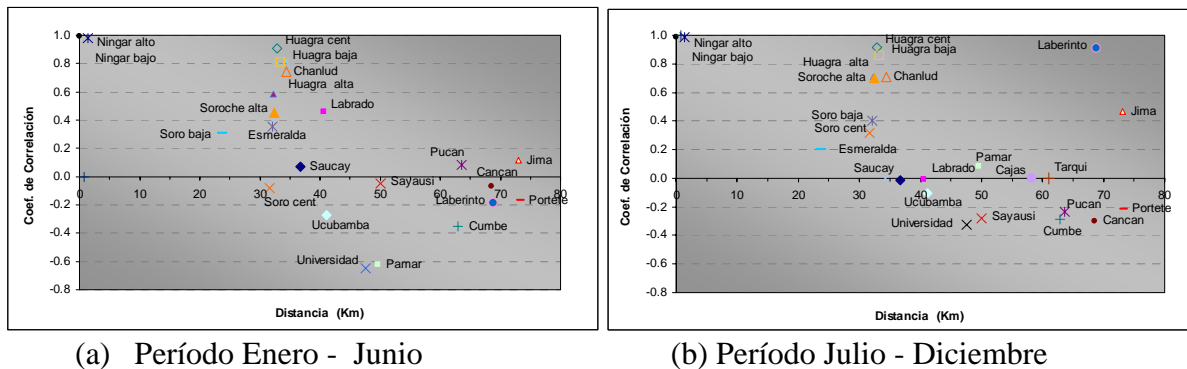


Figura 4.8. Coeficiente de correlación para la estación de Ningar Centro por época del año.

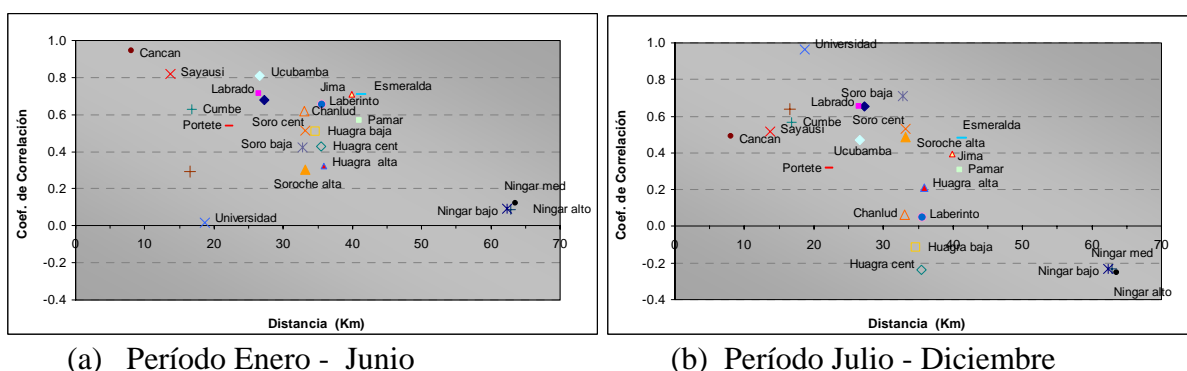


Figura 4.9. Coeficiente de correlación para la estación de Pucán por época del año.

En las Figuras presentadas se ve claramente como el coeficiente de correlación entre las estaciones varían de acuerdo a la época del año analizada. Para los primeros 6 meses del año las estaciones ubicadas en la parte Oeste de la cuenca suben su valor de correlación en referencia a las estaciones de la parte central de la cuenca; y por el contrario descienden en relación con las estaciones cercanas a la parte Este. Por otro lado, cuando se analizan las gráficas para los últimos meses del año, la relación de correlación de las estaciones es la contraria a la manifestada anteriormente; es decir, el coeficiente entre las estaciones ubicadas en la parte Este de la cuenca aumenta en relación con las estaciones del centro de la cuenca y disminuye con las de la zona Oeste. Esto confirma la influencia que mantienen sobre la distribución espacial de lluvia en la cuenca del Paute los períodos lluviosos de las regiones Costa y Oriente.

4.2.2 Estaciones INAMHI

En forma análoga al análisis realizado con las estaciones de PROMAS – ETAPA, se elaboró para cada una de las estaciones pluviométricas de la cuenca, gráficos que toman en cuenta el coeficiente de correlación en función de la distancia existente entre las estaciones consideradas. Del análisis de estas gráficas se determina que las estaciones de la cuenca pueden ser clasificadas dentro de dos grupos de estaciones con distinto tipo de pluviometría; cada grupo presenta similares valores de correlación entre estaciones y diferentes en relación con las del grupo restante. Los valores medios de la correlación para cada uno de los grupos

toma valores altos o bajos dependiendo del gráfico de la estación que se analice; generalmente, el grupo al cual pertenece la estación estudiada presenta un valor superior al otro grupo. El agrupamiento de las estaciones coincide con una ubicación geográfica común de las estaciones en la cuenca, el primer grupo aglutina a las estaciones ubicadas en la parte Centro y Oeste de la cuenca del río Paute (cercanas a la divisoria costanera del país), mientras el otro grupo corresponde a estaciones que se ubican en la parte Este de la cuenca (cercanas a la divisoria de Sierra y Oriente de la región). Este agrupamiento de estaciones confirma el análisis previo realizado con las estaciones PROMAS - ETAPA, en la que se determinó la existencia de diferentes zonas de pluviografía en la cuenca del Paute, debidas a la influencia que mantienen los períodos húmedos de las regiones Costa y Oriente del país.

En las Figuras 4.10 y 4.11 para las estaciones de Chirimachay y Buenos Aires se aprecia cómo las estaciones del grupo al que definiremos como Costa (por estar cerca de esta divisoria) presentan valores de correlación superiores a 0.5, y las estaciones del grupo cercano a la zona Oriental, al que denominaremos Oriente, esta por debajo de este valor, incluso con valores negativos. Un análisis similar, pero con la ubicación de los grupos en orden inverso se aprecia en las gráficas de las Figuras 4.12 y 4.13 para las estaciones de Palmas y Arenales.

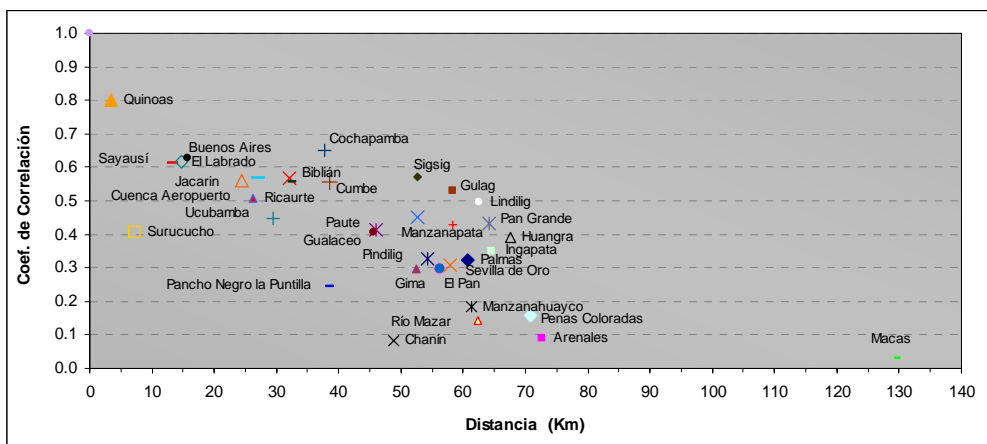


Figura 4.10. Estación de Chirimachay.

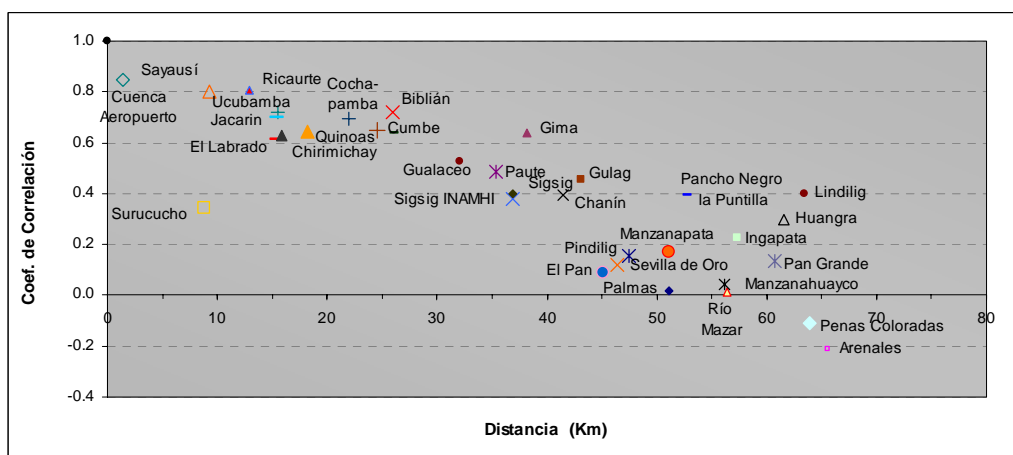


Figura 4.11. Estación de Buenos Aires.

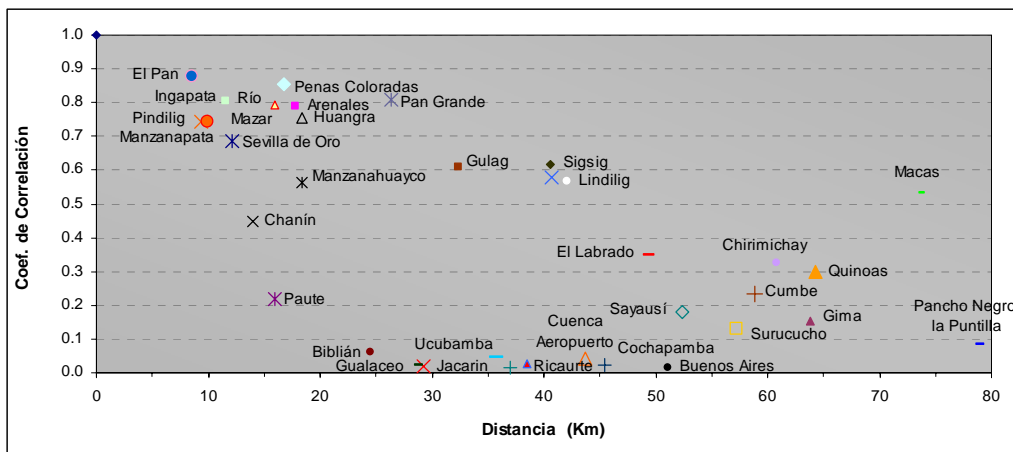


Figura 4.12. Estación de Palmas.

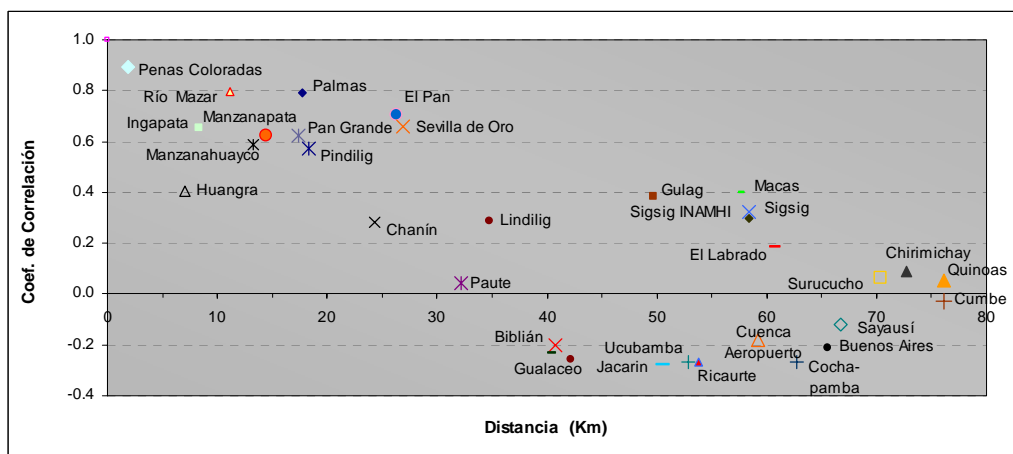


Figura 4.13. Estación de Arenales.

Con la finalidad de aportar en mayor medida a este análisis, en los gráficos analizados se han incluido dos estaciones externas a la cuenca del Paute: Pancho Negro la Puntilla y Macas, ubicadas en las regiones Costa y Oriente respectivamente. En el análisis de la correlación de estas estaciones con las internas de la cuenca, se determina que la estación de Macas presenta una correlación mayor que la de Pancho Negro en referencia a las estaciones que se ubican en el grupo de Costa y menor en referencia a las estaciones del grupo del Oriente. Por el contrario, la estación de Pancho Negro la Puntilla, presenta una correlación mayor que la estación de Macas con las estaciones del grupo de la Costa y menor con las estaciones del grupo del Oriente.

En el análisis anterior dos estaciones: Lindilig y Chanín, presentan características que pueden ser definidas como intermedias entre los dos grupos establecidos. La correlación en referencia a las demás estaciones de la cuenca no presenta una diferencia marcada, tal como se aprecia en el gráfico de la Figura 4.14 para la estación de Chanín. Debido a este comportamiento particular se determina que estas estaciones están ubicadas en una región de transición entre las dos zonas de pluviometría encontradas.

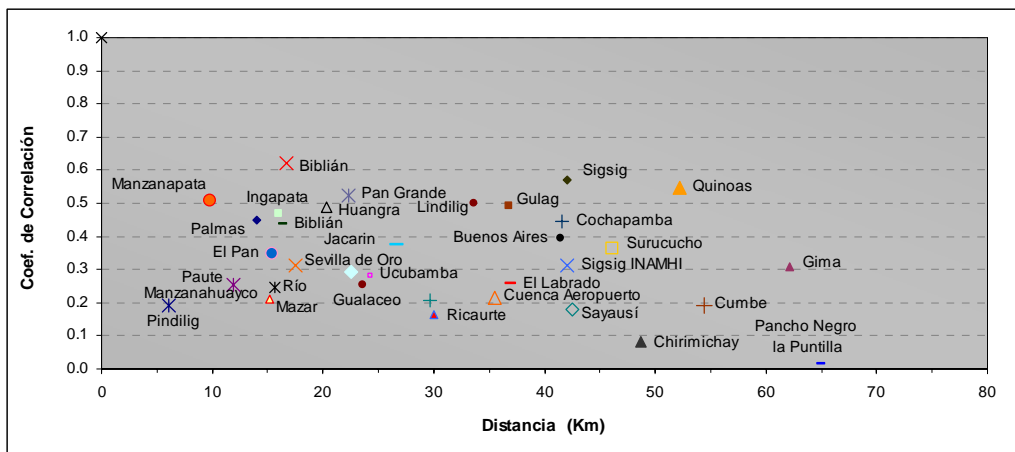


Figura 4.14. Estación de Chanín.

Para establecer el lugar de transición de estas zonas de pluviometría en la cuenca, se elaboran gráficas para cada una de las estaciones de la cuenca, tal como la presentada en la Figura 4.15 para la estación de Paute, en la que se ubica en el eje de las abscisas la distancia positiva o negativa existente desde la estación considerada hacia las restantes estaciones de la cuenca en una dirección específica (eje de análisis, en el caso de la gráfica para la dirección Este – Oeste) y en el eje de las ordenadas el valor del coeficiente de correlación entre la estaciones consideradas. Este gráfico nos permite analizar cuál es el comportamiento del coeficiente de correlación entre la estación analizada y las estaciones que se encuentran ubicadas a similar distancia pero en diferente orientación; en consecuencia, nos permite definir si la estación analizada presenta una mayor afinidad por el grupo de estaciones de Costa u Oriente.

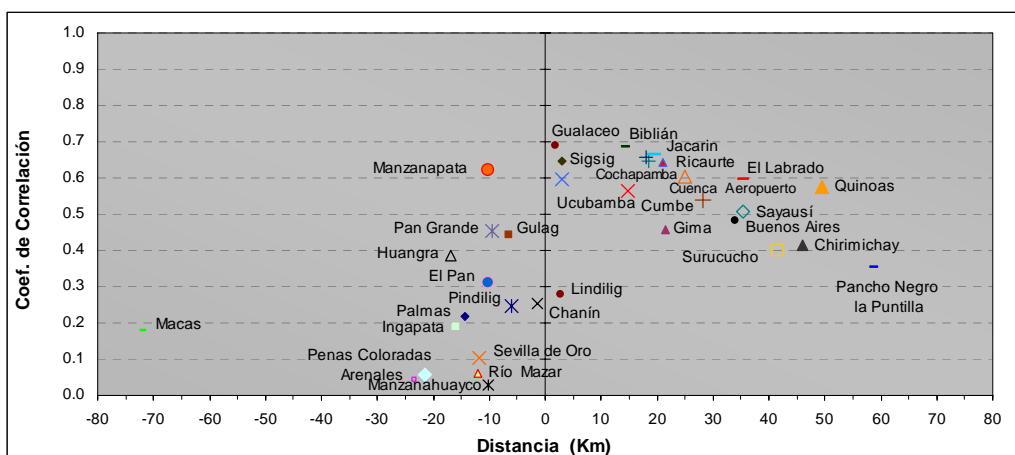


Figura 4.15. Estación de Paute

El análisis de estas gráficas se realizó en referencia a tres orientaciones: una paralela al curso del río Cuenca y dos en sentido Este - Oeste y Norte – Sur. En base a este análisis se determinó que el límite de las zonas de pluviometría común ocurre en referencia a un eje que va de Norte a Sur tal como se aprecia en la Figura 4.16.

En referencia a los límites de las zonas de pluviometría común, se consideraron algunas características topográficas de la zona de transición. En lo que respecta a la cuenca del río Paute en su margen izquierda se considera que el límite de zona coincide con la divisoria de la cuenca con la del río Cañar, mientras en margen derecha, si bien no se pudo establecer un análisis claro, se determinó que la transición sigue aproximadamente una cota de terreno de 3000 ms.n.m. Se debe aclarar que este análisis se ha realizado gráficamente, por lo que en un futuro debe ser analizado con mayor profundidad y en consideración de diferentes parámetros topográficos, climáticos, entre otros.

El análisis presentado en estos párrafos se realizó en referencia al parámetro de la distancia entre estaciones, un análisis similar se ha efectuado en consideración del parámetro de la diferencia de altura existente entre estaciones, sin embargo los resultados obtenidos no presentan tendencias o agrupamientos que nos orienten en forma clara para la determinación de las características propias de la distribución espacial de lluvia en la cuenca del río Paute por lo que sus resultados no son presentadas en la investigación.

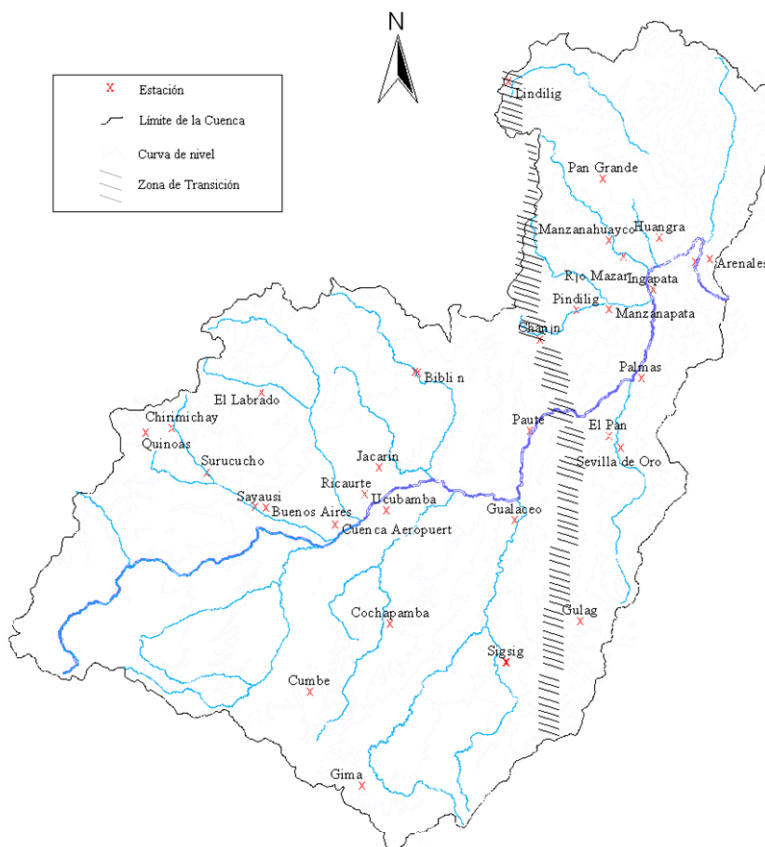


Figura 4.16. Delimitación de zonas de similar pluviometría de la cuenca del río Paute.

4.2.2.1 Análisis de la influencia de los regímenes de Costa y Oriente

Para confirmar la existencia de la influencia que producen los regímenes de Costa y Oriente en las estaciones de la cuenca del río Paute, se realizó un análisis similar al desarrollado con las estaciones de PROMAS - ETAPA en la que se consideraron dos períodos de análisis al año: Enero a Junio y Julio a Diciembre.

Análogo a lo obtenido con las estaciones de PROMAS - ETAPA se determinó que para el período de Enero a Junio las estaciones que se encuentran localizadas en la parte Oeste de la cuenca aumentan su correlación en referencia a las estaciones que se ubican de la parte central de la cuenca y por el contrario descienden en relación con aquellas estaciones que se encuentran emplazadas en la parte Este de la cuenca. Por otro lado, cuando se analizó el período de Julio a Diciembre, época en la que se desarrolla el período lluvioso del Oriente, la correlación de las estaciones que se encuentran en la parte Este de la cuenca aumentan sus coeficientes de correlación en relación con las estaciones que de la parte central y disminuyen en referencia a las estaciones que están ubicadas en la parte oeste. En consecuencia se confirma la influencia en la distribución espacial de lluvia en la cuenca del río Paute de las épocas lluviosas de las regiones Costa y Oriente del país.

4.2.3 Análisis de densidad y ubicación de estaciones de lluvia

Tres zonas de pluviografía similar se han determinado en la cuenca río Paute, por lo que la distribución espacial de lluvia debe ser investigada por separado en cada una de ellas. Al momento no se considera la región delimitada por la cuenca del río Machángara por considerar, como se manifestó anteriormente, que su demarcación y existencia, debe ser verificada con mayor profundidad cuando se disponga de un período de información pluviográfica de mayor envergadura a la actual, por tanto a continuación se presenta el análisis realizado para las zonas:

Media y Oeste, con influencia del régimen Costa y Este, con influencia del régimen Oriente.

4.2.3.1 Estaciones con influencia del régimen de Costa

Como se estableció con anterioridad esta zona engloba las estaciones ubicadas en la parte Centro y Oeste de la cuenca del río Paute. Para su análisis se elaboraron en primera instancia las gráficas de la Figura 4.17, para las escalas de tiempo diaria y mensual, con la información disponible de la cuenca. En ellas se considera el coeficiente de correlación en función de la distancia entre estaciones de medida.

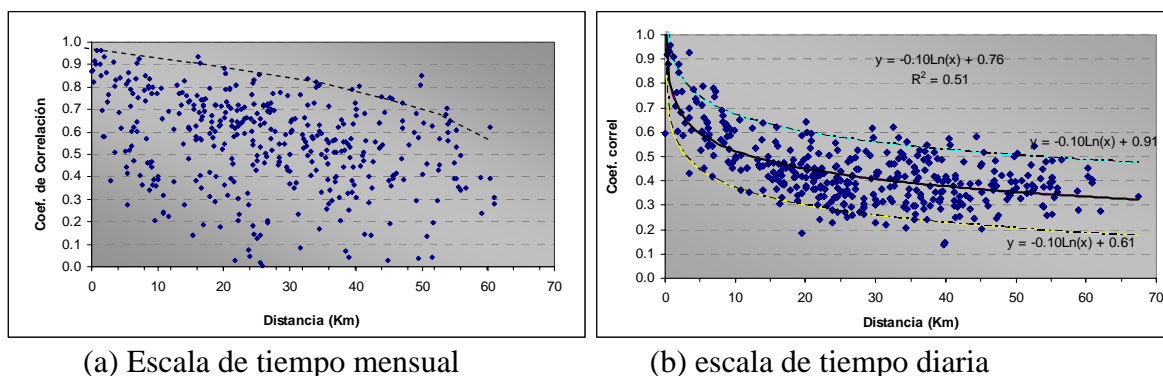


Figura 4.17. Espaciamientos límites entre estaciones con régimen de Costa.

En las gráficas se establece que para la escala de tiempo mensual la variabilidad en los registros de precipitación es muy elevada sin una tendencia fija. En el caso de la escala diaria por el contrario, la variabilidad es mucho menor a la anterior y sus valores de aproximan a una curva de tipo logarítmica, tal como se aprecia en la figura 4.17 (b). En base a este análisis podemos manifestar que la influencia de la distancia entre estaciones respecto a la descripción

de la distribución espacial de lluvia en la cuenca del río Paute, presenta una mayor importancia de análisis cuando se establecen registros en una escala de tiempo diaria.

Adicionalmente en la Figura 4.17, con línea entrecortada y en base al análisis de los registros disponibles se han establecido límites tanto superior como inferior para cada una de las escalas de tiempo; estos límites se convierten en una guía para determinar el intervalo o el máximo espaciamiento que debe existir entre estaciones para obtener una adecuada descripción de la variabilidad de lluvia de esta parte de la cuenca del río Paute.

Al igual que el análisis realizado con el espaciamiento entre estaciones, en las gráficas de la Figura 4.18, se establece que la variabilidad de la lluvia en relación a la diferencia de altura existente entre estaciones es mayor en la escala diaria que mensual y por consiguiente su consideración en la decisión para la ubicación de estaciones de medida deberá tomar una mayor importancia en la escala diaria que en la mensual. En referencia a las tendencias que presentan los valores hacia ajustes de curvas, en la escala de tiempo diaria se probaron varias opciones. Como resultado se obtuvo como la de mejor ajuste una curva de tipo logarítmica; sin embargo, esta curva no puede ser tomada como la tendencia real de los valores debido a que presenta un valor de R^2 de 0.13, tal como se aprecia en la figura 4.18 (b).

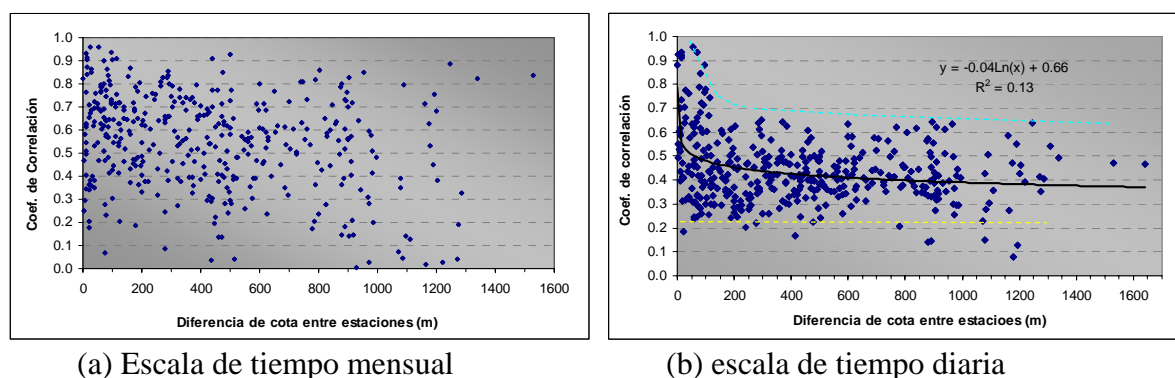


Figura 4.18. Desniveles límites entre estaciones, zona de influencia de Costa.

La gráfica de la Figura 4.18 (b) presenta con línea entrecortada los límites superior e inferior definidos por los registros analizados. Estas líneas pueden ser tomadas como guías para la determinación de los intervalos o límites máximos de diferencia de altura que puede existir entre estaciones para obtener una adecuada descripción de la variabilidad de lluvia con un determinado grado de covariabilidad.

4.2.3.2 Estaciones con influencia del régimen de Oriente

El análisis que se ha realizado para este grupo de estaciones es similar al realizado para el grupo con influencia de Costa. Esta zona abarca las estaciones ubicadas en la parte Este de la cuenca del río Paute, cercanas a la divisoria de con la Región Oriental.

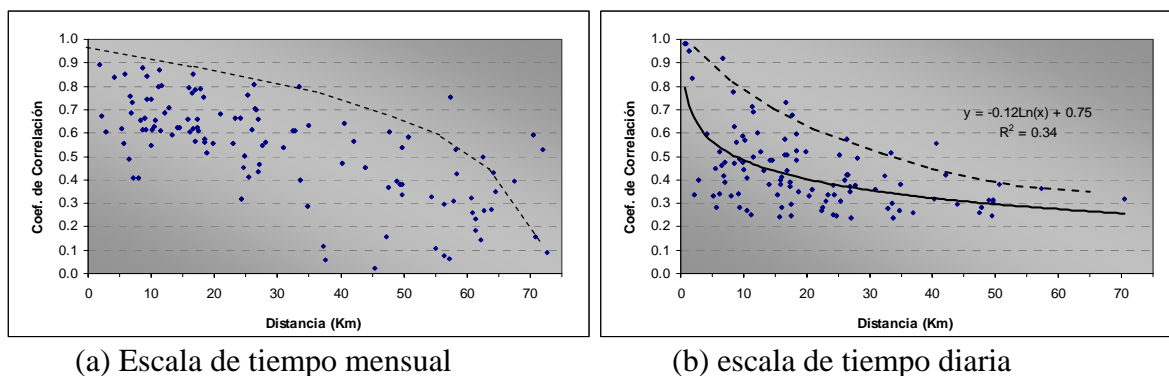


Figura 4.19. Espaciamientos límites entre estaciones, zona de influencia de Oriente

En base a las gráficas de la Figura 4.19 se establece que la variabilidad pluviográfica en esta zona, en referencia al parámetro de la distancia existente entre estaciones, es alta en las dos escalas de tiempo. Adicionalmente, se determina que en la escala de tiempo diaria los valores se aproximan a una curva de tipo logarítmica con un coeficiente de regresión de 0.34, que si bien no es un valor elevado nos determina que la variación en los coeficientes de correlación se justifica en un 34% por la variación en el espaciamiento existente entre estaciones de registro. En la Figura 4.19, con línea entrecortada se establecen los límites superior e inferior para cada una de las escalas de tiempo. Estos límites se convierten en una guía para determinar el intervalo o el máximo espaciamiento que debe existir entre estaciones para obtener una adecuada descripción de la variabilidad espacial de lluvia en esta zona de la cuenca del río Paute con una determinado grado de covariabilidad.

En las gráficas de la Figura 4.20, se establece que la variabilidad de la lluvia en relación al desnivel existente entre estaciones es alta tanto para las escalas de tiempo diaria como mensual. En estas gráficas, con línea entrecortada, se presentan los límites superiores de las correlaciones consideradas. Estos límites son obtenidos en base al análisis de los valores extremos de los registros. Estas líneas se definen como los límites máximos que puede existir para el desnivel entre estaciones, con la finalidad de obtener una adecuada descripción de la variabilidad de lluvia de la cuenca, con un determinado grado de correlación entre estaciones.

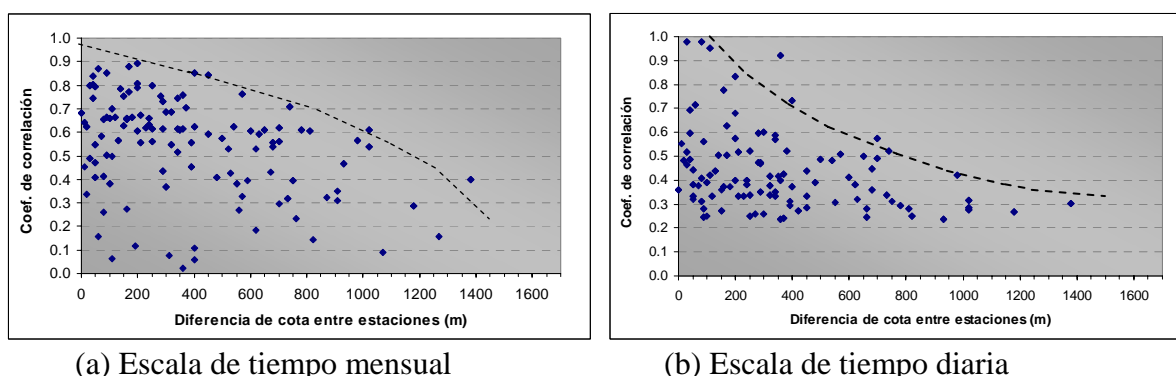


Figura 4.20. Desniveles límites entre estaciones, zona de influencia de Oriente

Para el caso de esta zona, si deseamos determinar adecuadamente sus características pluviográficas, es decir con una correlación mayor o igual a 0.75 (Rodríguez, 2000),

debemos ubicar las estaciones de precipitación de acuerdo a las Figuras 4.19 y 4.20, a una distancia no mayor de 15 Km. entre sí (círculo de radio 15 Km.) y con una diferencia de desnivel no mayor a 400 m para la escala de tiempo diaria o con una espaciamiento menor a 45 Km. y un desnivel máximo de 800 m. en la escala de tiempo mensual.

5 CONCLUSIONES

- La metodología utilizada en la investigación corresponde al análisis de las estaciones de la cuenca en función de examinar la correlación calculada en función de la covarianza que presentan entre cada una de ellas.
- El análisis se desarrollo en dos grupos de estaciones por separado debido a que las series de información presentan distinto período de información. El primer grupo corresponde a estaciones con registros automáticas (PROMAS – ETAPA); de su análisis se determinó la existencia de tres zonas de pluviografía distinta dentro de la cuenca del río Paute. Una de estas zonas corresponde a las estaciones ubicadas en la cuenca del río Machángara; lamentablemente por la cantidad reducida de información disponible, aproximadamente de un año y medio, la existencia de esta zona deberá ser verificada en un futuro cuando el volumen de información recopilada en la cuenca sea de mayor envergadura.
- El segundo grupo, que presenta estaciones distribuidas en toda la cuenca, corresponde a las estaciones con registros de series históricas (INAMHI). En su análisis se determinó en forma clara y confirmando lo analizado con las estaciones automáticas, la existencia de dos zonas en la cuenca que presentan pluviometría muy diferente. El análisis por estación determinó que la diferencia en las dos zonas es predominante en el sentido Este-Oeste, delimitándose la zona de transición en un eje de Norte a Sur. La determinación de estas zonas en conjunto con un análisis de correlación entre estaciones en relación a dos períodos al año: Enero-Junio, Julio-Diciembre, establecen la influencia en la distribución espacial de lluvia en la cuenca de las épocas lluviosas de las regiones Costa y Oriente del país.
- En la investigación se determina recomendaciones para la ubicación de estaciones de registro de precipitaciones para cada una de las zonas de pluviografía determinadas. En tal sentido se establece que para obtener una adecuada caracterización espacial de lluvia en la cuenca del río Paute (correlación > 0.75), la densidad a la cual las estaciones deben ser ubicadas para la región con influencia del sector costanero no debe ser menor a una estación por cada 12 y 52 Km. en las escalas diaria y mensual respectivamente con un desnivel entre estaciones no mayor a 300 y 100 m respectivamente. En la zona con influencia del régimen oriental la densidad mínima para las escalas diaria y mensual no debe ser menor a una estación por cada 18 y 45 Km. respectivamente con desniveles máximos para la escala diaria de 400 m y para la mensual de 850 m.

6 BIBLIOGRAFIA

American Society of Civil Engineers, 1997, Technical Engineering and Design Guides, Flood-Runoff Analysis, ASCE Press, New York, EEUU.

- Bacchi B., Nathabandu T., Kottegoda T., 1995, Identification and calibration of spatial correlation patterns of rainfall., *Journal of Hydrology* (165) 311-348.
- Bacuilima J. C., Bacuilima F., Bermeo W., 1999, Caracterización del clima por microcuencas en el Austro Ecuatoriano, Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Civil, Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería Civil, Cuenca, Ecuador.
- Bartolini, P., and Valdés, J. B., 1999, Representation of spatial variability of rainfall in aggregated rainfall-runoff models, *Journal of Hydrological Sciences*, (48-4) pp 1199 – 1219
- Beven, K. J. and Hornberger, G. M., 1982. Assessing the effect of spatial pattern of precipitation modeling streamflow hydrographs. *Water Resour.* (18) 823 – 829
- Christen, P. and Killingtveit, A., 2003, Rainfall distribution on the slopes of Mt Kilimanjaro, *Journal of Hydrological Sciences*, (48-2) 65 – 77.
- Dawdy, D. R. and Bergman, J.M., 1969. Effect of rainfall variability on streamflow simulation. *Water Resources. (Res., 5)* 958-966.
- Dercon G., Bossuyt B., De Bièvre B., Cisneros F., Deckers J. (Editores), 1998, Zonificación Agroecológica del Austro Ecuatoriano, U. Ediciones, Universidad de Cuenca – Ecuador.
- ETAPA, 2000, Anuarios Meteorológicos, Red Hidrometeorológica Unificada de la Cuenca del río Paute, Editado por Dirección de Gestión Ambiental de ETAPA, Cuenca, Ecuador.
- Faures, J. M., Goodrich, D.C., David A., Woolhiser, Sorooshian S., 1995, Impact of small-scale spatial rainfall variability on runoff modelling, *Journal of Hydrology* (173) 309-326
- Fisher R. A., Neyman J., Pearson E. S., Bayes T., 1980, Harla Ediciones, México D. F.
- Goodrich, D.C., Geometric simplification of a distributed rainfall-runoff model over a range of basin scales. *Journal of Hydrology* (173) 283-308
- Goovaerts, P., 1999, Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall., *Journal of Hydrology* (228) 113 – 129
- Holawe F., Dutter R., 1999, Geostatistical study of precipitation series in Austria time and space, *Journal of Hydrology* (219) 70-82.
- Kenndedy J. and Neville A., 1982, Estadística para Ciencias e Ingeniería, segunda edición, . Harla ediciones, Mexico D.F.
- Maidment, D.R., 1992. *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, New York.
- Marquínez J., Lastra J., García P., 2003, Estimation models for precipitation in mountainous regions: the use of GIS and multivariate analysis., *Journal of Hydrology* (270) 1-11.
- Mendenhall W, Sincich Terry, 1995, *Statistics for engineering and the Sciences*. 4 th edition, Publisher for Prentice Hall Inc. United states of America
- Pardo-Igúzquiza, E., 1998. Optimal selection of number and location of rainfall gauges for areal rainfall estimation using geostatistic and simulated annealing., *Journal of Hydrology*, (210) 206-220
- Prudhomme C., 1999, Mapping a Statistic of Extreme Rainfall in a Mountainous Region, Pergamon, Elsevier Science, (24) 79 – 84
- Restrepo P., 1994, Desarrollo e Implementación del Modelo Matemático. Informe de la segunda visita. INECEL-UMACPA.
- Rodríguez J. M., 2000, Hidrología Aplicada, Editado por Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Madrid, España.
- Said E., 2002, Spatial Rainfall Modelling for Hydrological applications, Master Thesis, K. U. Leuven-Faculty of Engineering, Belgium.
- Ven Te Chow, David R. Meidment, Larry W. Mays, 1994, Hidrología Aplicada, McGraw-Hill Interamericana, Santa Fe de Bogotá, Colombia.
- Willems, P. and J. Berlamont, 1999, Probabilistic modelling of sewer system overflow emission, *Water Science and Technology*, vol. 39 (9) 47-54 .
- Willems, P. and J. Berlamont, 2002, Accounting for the spatial rainfall variability in urban modeling application, *Water Science and Technology*, vol. 45 (2) 105 - 112

- Willems, P. 1999. Stochastic generation of spatial rainfall for urban drainage areas, *Water Science and Technology*, vol. 39(9) 23-30.
- Willems, P. 2001. A spatial rainfall generator for small spatial scales, *Journal of Hydrology*, vol 253, 126-144
- Witold F. K., Grzegorz J. Habib E., 2003, An analysis of small-scale rainfall variability in different climatic regimes, *Hydrological Sciences-Jurnal Hydrologiques* (48) 151 – 162.
- Wotling G., Bouvier Ch., Danloux J., Fritsch J., 2000, Regionalization of extreme precipitation distribution using the principal components of the topographical environment, *Journal of Hydrology* (233) 86-101.
- Wyseure G., 2002, Course text: Statistical Methods. Facultad de agricultura de la universidad de Leuven Belgica, notas de curso, (no publ.).