

In :

**"El agua en Ecuador - Resultados seleccionados
(1974 - 1988) por P. Pourrut & al. "**

Serie "Travaux et Documents"

ORSTOM, Paris, Vto capítulo, pp 40-76.

en curso de publicación

ANALISIS ESTADISTICO Y REGIONALIZACION DE LAS PRECIPITACIONES EN ECUADOR

por J. F. NOUVELOT*, P. LE GOULVEN**, M. ALEMAN***, P. POURRUT****

-
- * Hidrólogo, Centro ORSTOM, BP 5045, Montpellier - Francia
 - ** Hidrólogo, Misión ORSTOM, Apartado 17.11.06596, Quito - Ecuador
 - *** Ingeniero Civil, INERHI, Juan Larrea 534, Quito - Ecuador
 - **** Hidrólogo, Misión ORSTOM, Antofagasta - Chile

Aunque la lluvia sea solamente uno de los componentes del balance hídrico, es obvio que constituye el factor condicional principal de los regímenes hidrológicos. Especialmente en la zona intertropical, donde la escasez, así como el exceso de agua limitan en gran parte el desarrollo de los países, la elaboración de una estrategia de uso racional de los recursos en agua es posible sólo si se dispone de una información pluviométrica suficiente.

En el capítulo 1 del artículo IV ya fueron señalados los diversos problemas que afectan las observaciones pluviométricas en el Ecuador. Las series de larga duración son escasas y la calidad de la información es a menudo mediocre, sobre todo la de los últimos años que además no está aún disponible. Por ahora pues, es imposible hacer un análisis estadístico exhaustivo de todas las estaciones de la red pluviométrica para un período homogéneo actualizado.

A falta de este análisis, el tratamiento aplicado a las lluvias observadas, que es pues forzosamente incompleto y limitado, sea espacialmente sea en el tiempo, se dedicó a tomar en cuenta un imperativo que resulta directamente de las necesidades más urgentes de los países en desarrollo, el de responder a la demanda de los actores de la valorización, planificadores e ingenieros, quienes reclaman instrumentos para rellenar los vacíos de la información pluviométrica, aunque sólo sean valores estimados. Elaborados según ópticas distintas, dos métodos reagrupan algunos resultados y proponen ciertas técnicas que permiten alcanzarla.

El más antiguo (normas pluviométricas aplicables en el Ecuador) fue preparado en el marco de la regionalización agro-pastoral del país utilizando las estaciones representativas, las cuales disponían de registros suficientemente extendidos; provee una información estadística sintética a escala nacional y propone una división zonal la cual, gracias a cálculos sencillos y rápidos, permite estimar el valor de los datos que faltan en las series incompletas, con una precisión aceptable.

El método más reciente (regionalización de las pluviometrías en el Norte del Ecuador), geográficamente limitado a una gran cuenca hidrográfica, fue elaborado en el contexto de los trabajos destinados a proveer algunos elementos de planificación del riego; apoyándose en el uso de un vector regional, establece una zonificación pluviométrica más precisa que la anterior.

1 - NORMAS PLUVIOMÉTRICAS APLICABLES EN EL ECUADOR

1.1 Meta perseguida y metodología utilizada

A escala nacional, la información a la cual más acceso tenemos es la que es relativa a los totales anuales, representada de manera global en los mapas de isoyetas que permiten evaluar rápidamente los aportes meteorológicos.

Pero la noción de promedio anual, suficiente en el marco de una planificación general de los recursos naturales renovables, siempre tiene que ser completada (por ejemplo por la información relativa a las frecuencias escasas, a la irregularidad interanual o a los totales recogidos durante períodos más cortos) cuando se tocan los estudios de factibilidad de los proyectos de acondicionamientos hidráulicos o de equipo de las infraestructuras.

Es por esta razón que, en las zonas donde la información es deficiente, hay que disponer, de manera absoluta, de un método de estimación de los parámetros de cálculo de las obras. El establecimiento de normas pluviométricas es una manera de responder a esta necesidad.

Ya que la gran diversidad de las regiones climáticas existentes (cf. el artículo IV) no permite establecer fórmulas válidas para todo el territorio, fue preciso proceder a una zonificación y dividir el país en zonas pluviométricas homogéneas. Estas, que fueron limitadas a lo máximo, son seis.

Esta zonificación, así como las relaciones que unen entre ellas las diversas variables pluviométricas, está basada en los resultados del análisis estadístico de los datos para la cual se utilizó los tipos de correlación sencillas o múltiples y las leyes de ajustamiento más comunes en hidroclimatología : **Gauss** (normal), **Galton** (gaussologarítmico), **Gumbel** (doble exponencial), **Frechet** (gumbel-logarítmico), **Pearson III** (gamma incompleta) y **Goodrich** (caso particular de la ley exponencial generalizada).

Son sesenta y cinco las estaciones de referencia escogidas para llevar a cabo este estudio (veinte y cuatro equipadas con un pluviógrafo) y el número de años de observación varía entre diez y ochenta y cinco años.

La mayoría de las series tiene una duración superior a quince años pero sólo catorce de ellas excede treinta años y solamente seis cuentan con más de cincuenta años de observación. Los datos de cada una de las estaciones fueron tratados de la manera sistemática siguiente :

- para los totales anuales, las lluvias diarias máximas y las intensidades entre cinco minutos y veinte y cuatro horas, selección de la ley estadística que da el mejor ajustamiento ;
- para las lluvias anuales y diarias, selección de las relaciones que unen los valores de las frecuencias medianas y decenales, luego de las frecuencias decenales y centenales, y el establecimiento de las relaciones que permiten calcular una altura pluviométrica cualquiera que sea su frecuencia ;
- cálculo de los intervalos de confianza ;
- Búsqueda de las relaciones que permiten determinar las intensidades, en intervalos de tiempo de 5 minutos hasta 24 horas, a partir de las lluvias diarias de misma frecuencia.

Aun cuando las aproximaciones sucesivas y algunas simplificaciones se traducen por resultados que no siempre tienen un rigor científico extremo, el método de evaluación propuesto tiene una utilización muy sencilla. Una vez ubicada la región o el lugar que se tiene que estudiar en una de las seis grandes zonas pluviométricas homogéneas, el proceso que hay que seguir es el mismo a pesar de la diversidad de las informaciones investigadas :

- a) determinación de la altura pluviométrica mediana anual \bar{P} , sea con la ayuda de una estación de referencia sea por interpolación en el mapa de isoyetas.

\bar{P} constituye el único dato de entrada ;

- b) estimación de las alturas anuales para frecuencias diversas, sea a partir de ecuaciones generales derivadas de las leyes estadísticas (a menudo las de Galton y Pearson), sea por las relaciones de tipo :

$$P_{0,5} = f_1(\bar{P}), \quad P_{0,1} = f_2(P_{0,5}), \quad P_{0,01} = f_3(P_{0,1})$$

- c) determinación de la precisión de los resultados en función del número de años de observación disponibles o, al contrario, definición del número de años necesarios para tener una precisión dada;

- d) estimación de las alturas pluviométricas diarias H para diversos períodos de retorno, a partir de las leyes estadísticas o para las relaciones :

$$H_{0,5} = \xi_1(\bar{H}), \quad H_{0,1} = \xi_2(H_{0,5}), \quad P_{0,01} = \xi_3(H_{0,1})$$

- e) estimación de las diversas frecuencias de las intensidades I (o de las láminas precipitadas h) que corresponden a intervalos de tiempo h diferentes, a partir de las lluvias diarias de igual frecuencia F :

$$I_F = \Phi(t, H_F)$$

1.2 Alturas pluviométricas anuales

El cuadro 1 presenta los valores característicos de los totales pluviométricos anuales en las principales estaciones consideradas en cada una de las seis zonas homogéneas seleccionadas.

Los valores de las frecuencias altas (secas, $F = 0,90$) y bajas (húmedas, $F = 0,10$ et $00,1$) están calculados a partir de la ley que da el mejor ajustamiento o por interpolación entre los valores obtenidos cuando dos leyes son de igual calidad.

Excepto para el conjunto de las estaciones de la cuenca amazónica y para algunos puesto escasos ubicados en la vertiente occidental de la cordillera andina, que tienen distribuciones estadísticas simétricas, todas las otras series se ajustan a leyes cuya función de densidad presenta una disimetría positiva más o menos pronunciada según su pertenencia a la una o la otra de las zonas homogéneas.

Como las leyes que dans los mejores ajustamientos son las de Pearson III y sobre todo las de Galton, el valor de los intervalos de confianza es calculado suponiendo que las distribuciones empíricas corresponden a una ley gaussologarítmica. Hay que añadir que, con excepción de la ley normal, sólo la ley de galton permite calcular la precisión de los resultados de manera relativamente sencilla y sin mayor riesgo de error (cuando no se dispone de computadora, lo que ocurría en el Ecuador).

En efecto, juzgamos oportuno indicar esta precisión, dada la gran diversidad de los regímenes pluviométricos así como la disparidad de las duraciones de las series observadas.

1.2.1. Zonificación de las pluviometrías

Después de haber tomado en cuenta el conjunto de los parámetros estadísticos característicos de las leyes de Gauss, Galton y Pearson (frecuencias diversas calculadas con un parámetro de posición P_0 sea nulo sea diferente de zero, valores de la pendiente "a" y de la constante "b" de la línea recta de Galton, valores del parámetro de escala S o del parámetro de forma γ de Pearson) y de haberlos comparado con todas las estaciones, la definición de la zonificación fue hecha partiendo solamente de las alturas pluviométricas anuales y seleccionando sólo tres parámetros : el coeficiente de variación Cv, la pendiente "a" de la línea recta de Galton y el parámetro de forma γ de la ley de Pearson.

Es interesante notar que, aunque los dos últimos parámetros no sean matemáticamente comparables de una estación a la otra sólo cuando $P_0 = 0$, se constata que la simplificación utilizada no genera nunca errores significativos. Se podrá perdonar el hecho de haber sacrificado la precisión científica a la necesidad de obtener resultados homogéneos.

ZONA 1, muy seca

Sólo cubre una pequeña superficie, la de la punta de la Península de Santa Elena. Salinas, La Libertad y Ancon son las estaciones más representativas. Los parámetros seleccionados tienen los valores siguientes :

		$P_{0,5}$	<	170 mm
0,8	<	Cv	<	1
2,7	<	a	<	3
		γ		cerca de 1

ZONA 2, seca

Ocupa una larga faja de 30 a 50 km, que se estira del Norte al Sur de Manta hasta la frontera con Perú. Manta, Playas, Machala y Zapotillo son las estaciones más representativas de esta zona. Está caracterizada por :

170 mm	<	$P_{0,5}$	<	500 mm
0,5	<	Cv	<	0,8
3	<	a	<	4,5
1,5	<	γ	<	3,5

ZONA 3, occidental de transición

Ubicada al Este de la anterior, alcanza un ancho máximo de 100 km a la latitud de Guayaquil. Aunque sus totales pluviométricos son bastante diferentes, se pueden citar Portoviejo, Guayaquil y Pasaje como estaciones representativas. Los valores de los parámetros representativos son :

500 mm	<	$P_{0,5}$	<	1200 mm
0,35	<	Cv	<	0,45
5	<	a	<	6
4	<	γ	<	6,5

ZONA 4, occidental húmeda

Ubicada del Norte al Sur a lo largo de la Cordillera, es presente sobre todo en el Norte de $0^{\circ}30'$ de latitud sur donde ocupa todo el espacio desde los Andes hasta el litoral. La transición con la zona 3 es muy progresiva y el trazado cartográfico del límite que las separa sólo es la situación mediana de una faja más o menos ancha en donde además están ubicadas las estaciones de Esmeraldas-Tachina, Calceta, Isabel María y Milagro.

En esta faja de transición, los parámetros estadísticos tienen valores distintos del resto de la zona y cubren parcialmente los de la zona anterior :

1000 mm	<	$P_{0,5}$	<	1700 mm
0,35	<	C_v	<	0,4
6,5	<	a	<	7
6,5	<	γ	<	12

La zona posee además una cierta heterogeneidad, debida esencialmente a la orografía, pero el número reducido y la repartición geográfica de las estaciones, desgraciadamente no permiten establecer la relación entre la altitud y las lluvias.

Sólo se puede observar, de Oeste a Este, la existencia de un gradiente pluviométrico que es positivo hasta más o menos 1 000 a 1 500 m y que luego se vuelve negativo.

Entre las estaciones representativas, se pueden citar las de Pichilingue (120 msnm), Puerto Ila (300 msnm), Santo Domingo (600 msnm), Lita (740 msnm), Portovelo (900 msnm) y El Corazón (1560 msnm).

Los valores característicos de las estadísticas son los siguientes :

1500 mm	<	$P_{0,5}$	<	5000 mm
0,2	<	C_v	<	0,3
7,5	<	a	<	12,5
12,5	<	γ	<	30

(el intervalo 19-30 siendo el más probable)

ZONA 5, Callejón Interandino

Mientras las cuatro zonas anteriores estaban todas sometidas a la influencia pacífica (una sola estación de lluvias de diciembre a mayo) aquí se reagruparon las estaciones cuya característica común es de estar ubicadas en el Callejón Interandino (dos estaciones pluviosas, de enero a mayo y en octubre-noviembre) sabiendo que el relieve y la exposición cuentan entre los factores más importantes de la pluviosidad de esta zona.

Sin embargo, si se exceptan los valles bien abrigados como los de Salinas-Imbabura, Palmira-Ambato, Santa Isabel o La Toma-Malacatus, o las regiones ubicadas a una altitud superior a 3 000-3 200 m, la homogeneidad de las pluviometrías es relativamente satisfactoria.

Las distribuciones son ligeramente hipernormales, a menudo próximas de la distribución normal. Los parámetros característicos tienen los valores siguientes :

400 mm	<	$P_{0,5}$	<	1500 mm
		(frecuentemente 500 - 1000 mm)		
0,15	<	C_v	<	0,25
10	<	a	<	15
15	<	γ	<	50

Entre las estaciones representativas, la de Quito-Observatorio fue creada en 1890.

En el caso de los valles abrigados :

300 mm	<	$P_{0,5}$	<	500 mm
0,25	<	C_v	<	0,3
7	<	a	<	8
10	<	γ	<	15

En altitud, hasta 4 000 m (más allá, no existe ninguna información), se observa una cierta irregularidad debida a la orografía pero, como en el caso de los valles secos, las distribuciones son generalmente más disimétricas.

Esta región alta está caracterizada por :

600 mm	<	$P_{0,5}$		
		(frecuentemente > 1000 mm)		
0,3	<	C_v	<	0,35
6,5	<	a	<	8
9	<	γ	<	12

ZONA 6, **oriental húmeda**

Corresponde a la región amazónica que siempre está bajo la influencia de las masas de aire húmedo continental.

Aunque la información disponible no es suficiente para sacar conclusiones definitivas, parece indiscutible que la cordillera andina desempeña un papel importante en la distribución de las lluvias; así, al igual que en la vertiente occidental, las alturas pluviométricas máximas anuales se observan entre 1 000 y 1 500 metros de altitud.

Sus características generales son las siguientes :

1500 mm	<	$P_{0,5}$	<	6000 mm
0,1	<	C_v	<	0,2
10	<	a	<	27
22	<	γ	<	150

Pero sin que todavía se pueda emitir una explicación satisfactoria del fenómeno, existe una cierta heterogeneidad y se pueden distinguir dos grupos de estaciones.

El primer grupo está constituido por las estaciones de la parte septentrional, Tena, Tiputini, y Putumayo :

		C_v		alrededor de 0,2
10	<	a	<	12
22	<	γ	<	27

El segundo grupo, caracterizado por una variabilidad de las observaciones muy baja, está formado por las estaciones de Pastaza, Limoncocha, Zamora y El Puyo :

		C_v		alrededor de 0,1
22	<	a	<	27
100	<	γ	<	150

Aunque esta zona present algunas semejanzas con la zona húmeda occidental, un cierto número de rasgos característicos permiten diferenciarlas :

- todas las estaciones de la cuenca amazónica tienen distribuciones normales o muy próximas de lo normal, cuando es muy excepcional en la vertiente occidental donde las funciones de densidad tienen una disimetría positiva marcada ;
- a pesar de algunas fluctuaciones mensuales, la región oriental es regada de manera abundante a lo largo del año, cuando la zona húmeda occidental tiene un ciclo estacional caracterizado por una estación seca marcada entre junio y octubre.

1.2.2. Relaciones entre alturas pluviométricas anuales promedio y medianas

Sabemos que el promedio aritmético, a menudo utilizado por la facilidad de su cálculo, tiene una probabilidad que depende de la distribución estadística de la muestra estudiada; sólo en el caso de la ley normal, la frecuencia del promedio es de 0,5 ya que promedio \bar{P} , mediana $P_{0,5}$ y modo P_m tienen el mismo valor.

Cuando se hizo la descripción de las seis zonas pluviométricas homogéneas, pudimos ver que si los seis totales anuales de algunas estaciones siguen leyes simétricas normales o casi normales, la gran mayoría presenta ajustamientos unimodales disimétricos.

Como se trata siempre de disimetría positiva, encontraremos en orden creciente modo-mediana-promedio. Estos tres parámetros están ligados por la relación aproximada :

$$\bar{P} - P_{0,5} = \frac{\bar{P} - P_m}{3} \quad -$$

En cambio, las relaciones entre promedio y mediana dependen del tipo de la ley seleccionada y del valor de sus parámetros.

Encontraremos a continuación las relaciones empíricas que permiten estimar el valor de la mediana a partir del promedio, en milímetros, para cada una de las regiones pluviométricas homogéneas.

ZONE 1 : $P_{0,5} = 0,725 \bar{P}$

Se notará que la diferencia relativa entre las dos variables rebasa el 25% y que la frecuencia que se puede atribuir al promedio es de unos 0,35 sea un tiempo de retorno ($T = 1 / F$) próximo de tres años.

ZONE 2 : $P_{0,5} = 0,85 \bar{P}$

La diferencia relativa entre las variables sólo es de 15%, sea $T = 2,4$ años. En el presente caso, al igual que en el de la zona 1, no se juzga oportuno dar la precisión de los coeficientes de correlación R los cuales, calculados con tres o cuatro valores, son evidentemente muy próximos de 1.

ZONE 3 : $P_{0,5} = 0,93 \bar{P} + 6,2$

$R = 0,999$ calculado con un número de años de observaciones $N = 6$.

I_{95} (intervalo de confianza de probabilidad 95%) : 0,990 - 1,00

La diferencia relativa entre $P_{0,5}$ y \bar{P} se ubica entre 6 y 7% y la frecuencia del promedio es 0,45 sea $T = 2,2$ años.

ZONE 4 : $P_{0,5} = 0,98 \bar{P} + 8,8$

$R = 0,999$ avec $N = 10$

I_{95} : 0,995 - 1,00

La diferencia relativa entre las dos variables es a penas superior al 2%.

ZONE 5 : $P_{0,5} = 0,985 \bar{P} - 6,4$

$R = 0,999$ avec $N = 28$

I_{95} : 0,997 - 0,999

La diferencia relativa entre promedio y mediana sólo es de 2%.

ZONE 6 : $P_{0,5} = 0,994 \bar{P} - 15,1$

$R = 0,998$ avec $N = 8$

La diferencia relativa entre las dos variables sólo es de 0,5 a 1,5% ya que la gran mayoría de las estaciones tiene una distribución normal.

1.2.3. Estimación de las alturas pluviométricas anuales de frecuencia escasa.

La estimación de los totales pluviométricos anuales que corresponden a diversas frecuencias se hace a partir de los valores de la mediana. Se procedió de la misma manera para la evaluación de esta última, hay que considerar como aceptables un cierto número de hipótesis difíciles en demostrar.

Se admite que la relación estocástica $P_{F_2} = f(P_{F_1})$ es lineal, que las dos variables tienen distribuciones marginales normales, que la variable independiente P_{F_1} está determinada con un error inferior al de la variable dependiente P_{F_2} , y que la auto-correlación de los valores de esta última es despreciable.

Damos a continuación, para cada una de las zonas pluviométricas homogéneas, las ecuaciones que permiten estimar las lluvias anuales decenales (a partir de la mediana), centenales (a partir de la decenal), así como la ecuación de las frecuencias intermedias. Se diferencian las frecuencias altas (frecuencias secas 0,9 y 0,99) de las frecuencias bajas (húmedas, 0,1 y 0,01) y se indica el valor del coeficiente de correlación así como los límites del intervalo de confianza de 95%.

Para los que quisieran tener muy rápidamente una idea aproximada de los valores de frecuencias escasas a escala regional, se encontrará, al final de cada párrafo, el cociente P_{F_2}/P_{F_1} ; este método de estimación es evidentemente menos preciso.

a) - Lluvias anuales de frecuencia decenal seca, en mm.

ZONAS 1 et 2 :	$P_{0,9} = 0,53 P_{0,5} - 35$
R = 0,984 avec N = 7;	$I_{95} : 0,892 - 0,998 ;$
ZONA 3 :	$P_{0,9} = 0,61 P_{0,5} - 14$
R = 0,998 avec N = 10;	$I_{95} : 0,991 - 1,00 ;$
ZONA 4 :	$P_{0,9} = 0,82 P_{0,5} - 169$
R = 0,992 avec N = 9;	$I_{95} : 0,961 - 0,998 ;$
ZONA 5 :	$P_{0,9} = 0,81 P_{0,5} - 47$
R = 0,978 avec N = 26;	$I_{95} : 0,951 - 0,990 ;$
ZONA 6 :	$P_{0,9} = 0,87 P_{0,5} - 121$

Valores del cociente $P_{0,9}/P_{0,5}$:

Zonas 1 y 2 = 0,40 ; Zona 3 = 0,60 ; Zona 4 = 0,75 ; Zona 5 = 0,76 ; Zona 6 = 0,83.

b) - Lluvias anuales de frecuencia decenal húmeda, en mm.

ZONA 1 :	$P_{0,1} = 2,20 P_{0,5} + 100$
R = 0,991 avec N = 4 ;	$I_{95} : 0,629 - 1,00 ;$
ZONA 2 :	$P_{0,1} = 1,97 P_{0,5} + 44$
R = 0,967 avec N = 4 ;	$I_{95} : 0,684 - 0,999 ;$
ZONA 3 :	$P_{0,1} = 1,74 P_{0,5} - 66$
R = 0,998 avec N = 5 ;	$I_{95} : 0,968 - 1,00 ;$
En la franja de transición entre zonas 3 et 4	
	$P_{0,1} = 1,60 P_{0,5} - 51$
R = 0,998 avec N = 5;	$I_{95} : 0,968 - 1,00 ;$
ZONA 4 :	$P_{0,1} = 1,26 P_{0,5} + 104$
R = 0,996 avec N = 9 ;	$I_{95} : 0,980 - 0,999 ;$
ZONA 5 :	$P_{0,1} = 1,23 P_{0,5} + 73$
R = 0,966 avec N = 25 ;	$I_{95} : 0,925 - 0,985 ;$

ZONA 6 : $P_{0,1} = 1,13$ $P_{0,5} = 227$
 $R = 0,987$ avec $N = 9$; $I_{95} : 0,937 - 0,997$;

Valores del cociente $P_{0,1}/P_{0,5}$:

Zona 1 = 3 ; Zona 2 = 2 ; Zona 3 = 1,71 (o 1.59 en la franja de transición) ; Zona 4 = 1,30 ;
 Zona 5 = 1,25 ; Zona 6 = 1,17.

c) - *Lluvias anuales de frecuencia centenal seca, en mm.*

Ya que solamente existen pocas series suficientemente largas para permitir la evaluación de los totales pluviométricos anuales que corresponden a esta frecuencia, fue preciso reagrupar las tres zonas occidentales más o menos secas.

ZONAS 1, 2 ET 3 : $P_{0,99} = 0,65$ $P_{0,9}$
 $R = 0,995$ avec $N = 6$; $I_{95} : 0,953 - 0,999$;

ZONA 4 : $P_{0,99} = 0,84$ $P_{0,9} = 90$
 $R = 0,988$ avec $N = 5$; $I_{95} : 0,829 - 0,999$;

ZONA 5 : $P_{0,99} = 0,80$ $P_{0,9} = 5$
 $R = 0,991$ avec $N = 12$; $I_{95} : 0,967 - 0,998$;

ZONA 6 : Para compensar la falta de datos,
 sólo se puede proponer la relación :
 $P_{0,99} = 0,85$ $P_{0,9}$

Valores del cociente $P_{0,99}/P_{0,9}$:

Zonas 1, 2 y 3 = 0,65 ; Zona 4 = 0,77 ; Zona 5 = 0,80 ; Zona 6 = 0,85.

d) - *Lluvias anuales de frecuencia centenal húmeda, en mm.*

Aún allí, la falta de observaciones en la región seca litoral se traduce por ecuaciones aproximadas para las cuales sería superfluo indicar la precisión.

ZONA 1 : $P_{0,01} = 2,20$ $P_{0,1}$

ZONA 2 : $P_{0,01} = 1,60$ $P_{0,1}$

ZONA 3 : $P_{0,01} = 1,54$ $P_{0,1} = 35$

ZONA 4 : $P_{0,01} = 1,35$ $P_{0,1} = 238$
 $R = 0,99$ avec $N = 5$;

ZONA 5 : $P_{0,01} = 1,38$ $P_{0,1} = 81$
 $R = 0,982$ avec $N = 12$; $I_{95} : 0,939 - 0,995$;

ZONA 6 : $P_{0,01} = 1,15$ $P_{0,1}$

Valores del cociente $P_{0,01}/P_{0,1}$:

Zona 1 = 2,20 ; Zona 2 = 1,60 ; Zona 3 = 1,51 ; Zona 4 = 1,28 ; Zona 5 = 1,23 ; Zona 6 = 1,15.

Los ábacos 1 a 6 permiten, a partir del promedio aritmético, estimar las alturas pluviométricas anuales medianas y de frecuencias decenales y centenales secas y húmedas.

1.2.4. Estimación de los totales pluviométricos anuales de frecuencia cualquiera

Para realizar ciertos estudios, es necesario a veces estimar no sólo los valores de las lluvias de frecuencias decenales y centenales pero también los de frecuencias intermedias PF. Su cálculo es posible gracias a ciertas propiedades de las leyes de Gauss, Galton y Pearson III. Sin entrar en detalles, damos a continuación las fórmulas que se pueden utilizar :

- a partir de la ley normal, en las regiones donde las pluviometrías siguen esta distribución (u es la variable reducida, cf. una tabla de Gauss) :

$$P_F = \bar{P} (1 + u \times Cv)$$

- a partir de la ley gaussologarítmica, con $P_0=0$:

$$\log P_F = \frac{u + a \times \log P_{0,5}}{a}$$

Con una tabla de gauss para conocer los valores de u, se dispone de los elementos necesarios al cálculo, a y $P_{0,5}$, en los párrafos 1.2.1 y 1.2.2

- a partir de la ley gamma incompleta, con la aproximación de Wilson :

$$P_F = \bar{P} \left(1 - \frac{1}{9\gamma} + u \sqrt{\frac{1}{9\gamma}} \right)^3$$

Se estima γ , sea a partir de una estación de referencia, sea a escala regional (intervalos de valores para cada zona homogénea, párrafo 1.2.1)

1.2.5. Precisión de los resultados

La precisión con la cual se dan los resultados depende directamente del tamaño de las muestras a partir de los cuales están calculados. La amplitud de los errores puede ser definida por el intervalo de confianza donde existe la probabilidad α % de encontrar el verdadero valor de parámetros solamente conocidos por su estimación empírica.

En el caso presente, los valores de los intervalos de confianza del cuadro 1 están calculados gracias a los parámetros de la ley de Galton y, cuando es posible, con los parámetros de la ley normal.

Es interesante notar que las ecuaciones utilizadas para el cálculo del rango de valores de los intervalos de confianza permiten también estimar el tamaño N de la muestra teórica necesaria para conocer, con la probabilidad α %, el valor de una variable que tiene la precisión X %.

Como ejemplo, tomando en cada zona pluviométrica un valor promedio de la pendiente a de la línea recta de Galton, se dan a continuación los valores límites superiores e inferiores de N para tener valores de la pluviometría anual de frecuencia decenal que tienen una precisión de 90%, con una probabilidad de 95% :

ZONA 1	(a = 3) :	N1 = 387 años	N2 = 473 años
ZONA 2	(a = 4) :	N1 = 218 años	N2 = 266 años
ZONA 3	(a = 5,5) :	N1 = 115 años	N2 = 141 años
ZONA 4	(a = 10) :	N1 = 35 años	N2 = 43 años
ZONA 5	(a = 12) :	N1 = 24 años	N2 = 30 años
ZONA 6	primer grupo très muy similar a la zona 5		
	segundo grupo (a = 25) :	N = entre 6 y 7 años.	

Durante el examen de estos valores, se puede notar que a veces se tendría que moderar la confianza que se atribuye generalmente a ciertos resultados estadísticos que prescinden de los períodos cronológicos con el pretexto de que se refieren a un período homogéneo. En todo caso, abogan por la perennidad y el fortalecimiento de la densidad de las redes de mediciones.

1.3 Alturas pluviométricas

El estudio de las alturas pluviométricas diarias está basado en las relaciones que, a escala regional (y solamente a esta escala), las une con las alturas pluviométricas anuales de igual frecuencia.

El análisis estadístico se realiza en una muestra de las alturas máximas observadas en 24 horas, a razón de un valor por año de observación.

Esta manera de proceder genera sin duda ciertas impresiones :

- la altura total registrada no se debe siempre a una sola lluvia que se refiere a un evento meteorológico continuo. Puede corresponder al total de los diversos aguaceros y, al contrario, una lluvia de larga duración puede haber sido truncada por un observador que se atiene estrictamente a las consignas de efectuar las medidas según un horario pre-establecido.

Sin embargo, en lo que se refiere especialmente al Ecuador, se puede constatar que cuando se trata de lluvias fuertes, es excepcional observar más de un evento diario. Además, es muy baja la probabilidad para que un aguacero sea olvidado;

- la toma en cuenta de todos los totales diarios, y no solamente de los más elevados, hubiese proveído una muestra más extensa, o sea teóricamente más fiable.

La ausencia de bancos de datos, al igual que el tiempo muy largo necesario para una digitalización eventual de la información (más o menos 300 000 datos) así como la selección siempre difícil de los límites de truncamiento que dan el mejor ajustamiento en el momento de la utilización de las leyes truncadas (es el caso ya que, por definición, la variable es nula los días sin lluvia), no permitieron trabajar en esta base.

Sin embargo, señalemos que se realizaron pruebas comparativas entre muestras limitadas y completas en las estaciones pluviométricas de referencia de los tres grupos de cuencas vertientes representativos estudiados en el Ecuador y que las diferencias observadas nunca fueron significativas, lo que justifica el método utilizado.

Las características principales de las alturas pluviométricas diarias de cada una de las regiones son presentadas en el cuadro 2.

1.2.1. Zonificación de las lluvias diarias

So pena de quitar todo interés al estudio presente, se entiende que de ninguna manera se trata de buscar una zonificación diferente de la que está propuesto en el párrafo 1.2.1.

Se indica a continuación, en cada una de las zonas pluviométricas homogéneas, los intervalos de las alturas pluviométricas diarias de frecuencia mediana $H_{0,5}$ y los intervalos de los parámetros estadísticos calculados : el coeficiente de variación C_v , la pendiente a de la recta de Galton y el coeficiente de forma γ de la ley de Pearson III.

ZONA 1 :	25 mm	<	$H_{0,5}$	<	30 mm
	0,85	<	C_v	<	0,95
			a		cerca de 1
			γ		cerca de 3
ZONA 2 :	35 mm	<	$H_{0,5}$	<	65 mm
	0,55	<	C_v	<	0,65
	4	<	a	<	4,5
	2,5	<	γ	<	3,5
ZONA 3 :	50 mm	<	$H_{0,5}$	<	85 mm
	0,40	<	C_v	<	0,50
	5	<	a	<	6
	5	<	γ	<	6

ZONA 4 :	65 mm	<	$H_{0,5}$	<	120 mm
	0,20	<	C_v	<	0,30
	7,5	<	a	<	12
	12	<	γ	<	30

En la franja de transición con la zona 3 :

	60 mm	<	$H_{0,5}$	<	110 mm
	0,30	<	C_v	<	0,35
	6,5	<	a	<	7,5
	7	<	γ	<	12

ZONE 5 :	20 mm	<	$H_{0,5}$	<	40 mm
	0,20	<	C_v	<	0,40
	6	<	a	<	13
	7	<	γ	<	35

Al igual que para los totales pluviométricos anuales, los valores más elevados de a y de γ se refieren a los valles secos abrigados o a las regiones cuya altitud rebasa los 3 000m.

ZONE 5 :	55 mm	<	$H_{0,5}$	<	130 mm
	0,20	<	C_v	<	0,35
	6	<	a	<	13
	10	<	γ	<	30

1.3.2. Relaciones entre alturas pluviométricas diarias y anuales de igual frecuencia

La selección de estas relaciones es muy importante ya que, según la lógica del estudio, van a permitir pasar de las lluvias anuales a las lluvias diarias, siendo el mapa de las isoyetas interanuales el documento de base.

a) - Aproximación global

Indicamos a continuación las relaciones que permiten calcular, en milímetros, cualquier altura diaria H de frecuencia F a partir de la altura anual P de misma frecuencia F .

Se notará que las muestras utilizadas en cada zona reagrupan todas las alturas pluviométricas que sean de frecuencia mediana, decenal o centenal y es evidente que existe una verdadera auto-correlación entre ciertos valores de la variable, auto-correlación que conllevará una surestimación del coeficiente de correlación.

Por otro lado, aunque este último ya no es lineal, se indica también el intervalo de variación que corresponde a una probabilidad de 95%.

La sencillez y la facilidad de utilización de las relaciones propuestas justifica completamente la aproximaciones hechas.

$$\begin{aligned} \text{ZONAS 1 et 2 :} & & H_F &= 0,126 \times P_F + 14 \\ R = 0,949 \text{ para } N = 14; & & I_{95} &: 0,844 - 0,984; \end{aligned}$$

La reagrupación de las dos zonas se debe al tamaño limitado de las muestras disponibles.

$$\begin{aligned} \text{ZONE 3 :} & & H_F &= 0,083 \times P_F + 13 \\ R = 0,951 \text{ avec } N = 11 ; & & I_{95} &: 0,817 - 0,988 ; \end{aligned}$$

Siendo las tres zonas anteriores bastante homogéneas en cuanto al relieve, no juzgamos oportuno hacer intervenir la altura para establecer la relación $H = f(P)$.

El caso es diferente en cuanto a las regiones que presentan fuertes gradientes donde las relaciones no unívocas que unen respectivamente H y P con la altura A no siguen las mismas variaciones.

Por esta razón fue preciso utilizar un sistema de correlaciones lineares múltiples.

ZONE 4

$$H_F = 0,030 \times P_F - 0,018 \times A + 54$$

H et P son en milímetros y A en metros

R = 0,813 para N = 31 ;

$$I_{95} : 0,644 - 0,906 ;$$

De dos estaciones que tienen alturas anuales idénticas para una misma frecuencia pero instaladas a diferentes alturas, la más baja tiene una altura pluviométrica diaria máxima más elevada.

La altura desempeña también un papel muy importante en la zona 5.

ZONE 5

$$H_F = 0,345 \times P_F - 0,115 \times A + 41$$

R = 0,821 para N = 60 ;

$$I_{95} : 0,717 - 0,890 ;$$

ZONE 6

$$H_F = 0,019 \times P_F - 0,0085 \times A + 54$$

R = 0,842 para N = 19 ;

$$I_{95} : 0,627 - 0,937 ;$$

b) - *Cálculo de las alturas pluviométricas diarias con frecuencia cualquiera a partir de las alturas anuales de frecuencia mediana, en mm.*

Las relaciones establecidas a partir de las alturas anuales de frecuencia mediana permiten obtener una mayor precisión que la de las relaciones del párrafo anterior (muestras heterogéneas, auto-correlaciones), aun cuando los valores de los coeficientes de correlación son inferiores.

H y P están en milímetros.

ZONAS 1 et 2 :

$$H_{0,5} = 0,092 \times P_{0,5} + 17$$

R = 0,987 para N = 6 ;

$$I_{95} : 0,879 - 0,999 ;$$

ZONA 3 :

$$H_{0,5} = 0,062 \times P_{0,5} + 19$$

R = 0,981 para N = 4 ;

ZONA 4 :

$$H_{0,5} = 0,016 \times P_{0,5} - 0,012 \times A + 64$$

R = 0,720 para N = 13 ;

$$I_{95} : 0,281 - 0,910 ;$$

ZONA 5 :

$$H_{0,5} = 0,025 \times P_{0,5} - 0,007 \times A + 33$$

R = 0,864 para N = 25 ;

$$I_{95} : 0,703 - 0,936 ;$$

ZONA 6 :

$$H_{0,5} = 0,014 \times P_{0,5} - 0,011 \times A + 57$$

R = 0,937 para N = 9 ;

$$I_{95} : 0,723 - 0,987 ;$$

Se notará la similitud entre esta zona y la zona 4 húmeda occidental.

Una vez calculado $H_{0,5}$ con las fórmulas arriba indicadas y después de haber especificado el parámetro de pendiente a (párrafo 1.2.2), se puede calcular fácilmente las alturas diarias máximas para cualquier frecuencia, utilizando la fórmula proveniente de la ley de Galton (ver también el párrafo 1.2.4.) :

$$H = 10^{\frac{u+a \times \log H_{0,5}}{a}}$$

Si sólo se buscamos calcular las alturas relativas a las a frecuencias decenales y centenales, también se podemos aplicar la relaciones que se dan a continuación y que son de uso muy sencillo :

ZONE 1 :	$H_{0,1} = 2,80 \times H_{0,5}$ $H_{0,01} = 2,10 \times H_{0,1}$
ZONE 2 : R = 0,983 para N = 6 ;	$H_{0,1} = 1,745 \times H_{0,5} + 12$ $I_{95} : 0,850 - 0,998 ;$ $H_{0,01} = 1,49 \times H_{0,1} + 6$
ZONE 3 : R = 0,995 para N = 4 R = 0,996 para N = 6	$H_{0,1} = 1,71 \times H_{0,5}$ $H_{0,01} = 1,49 \times H_{0,1} + 6$
ZONE 4 : R = 0,941 para N = 15 ; R = 0,978 para N = 6 ;	$H_{0,1} = 1,36 \times H_{0,5} + 4$ $I_{95} : 0,829 - 0,981 ;$ $H_{0,01} = 1,40 \times H_{0,1} - 10$ $I_{95} : 0,807 - 0,998 ;$
ZONE 5 : R = 0,934 para N = 26 ; R = 0,977 para N = 12 ;	$H_{0,1} = 1,62 \times H_{0,5} - 6$ $I_{95} : 0,857 - 0,970 ;$ $H_{0,01} = 1,43 \times H_{0,1} - 3$ $I_{95} : 0,918 - 0,994 ;$
ZONE 6 : R = 0,972 para N = 8 ;	$H_{0,1} = 1,135 \times H_{0,5} + 20$ $I_{95} : 0,848 - 0,995 ;$ $H_{0,01} = \text{fórmula idéntica a la de la zona 4.}$

Los ábacos 7 a 12 permiten, a partir de la altura pluviométrica mediana anual a la cual se añade un correctivo de altitud para las zonas 4 a 6, estimar rápidamente sin necesidad de cálculo, las alturas pluviométricas diarias de frecuencia mediana, decenal o centenal.

Es particularmente interesante notar :

- que el papel de la altitud está demostrado por las variaciones de las relaciones que unen las alturas pluviométricas anuales con los valores máximos diarios ;
- que los parámetros que caracterizan a la vez las lluvias anuales y las lluvias diarias siguen una misma tendencia al pasar de una zona a otra.

1.3.3. Observaciones sobre : precisión de los resultados y forma de las distribuciones

Todas las observaciones en cuanto a la precisión de los resultados, hechas en el párrafo 1.2.5., también pueden aplicarse a las lluvias diarias.

Al contrario de las lluvias diarias, no es muy común obtener un buen ajustamiento con la ley normal y sólo se pueden utilizar fórmulas derivadas de la ley de Galton. En términos generales, todas las distribuciones son hipernormales y las zonas litorales están caracterizadas por disimetrías más marcadas.

Además, algunas estaciones parecen presentar distribuciones plurimodales, particularmente en las regiones secas donde la variabilidad es importante.

Sin embargo, decidimos no tomarlo en cuenta ya que esta característica no es sistemática en las estaciones de una misma zona; se puede interpretar como siendo proveniente de la existencia de dos categorías distintas de lluvias; las que son inferiores a un cierto límite que corresponde a un tipo de aguacero diferente de las lluvias que son superiores a este. Corresponde a lo que los anglo-sajones llaman "outliers".

1.4 Intensidades pluviométricas

En el Ecuador, donde las pendientes del medio natural andino alcanzan valores elevados y donde la ocupación importante de los suelos es a menudo asociadas con practicas agrarias tradicionales particularmente inadaptadas, la erosión hídrica constituye una de las principales consecuencias del desarrollo agrícola, ya que la degradación específica puede alcanzar 6 000 Toneladas/Km²/año.

Se entiende el interés que asume una estimación aceptable de las intensidades máximas de las cuales se conoce la implicación estrecha en los fenómenos erosivos.

1.4.1. Método utilizado

Utilizamos 24 estaciones equipadas con pluviógrafos. Desgraciadamente, tuvimos que excluir la estación de Guayaquil tuvo ya que la calidad de la serie es extremadamente equívoca aunque que es de larga duración. Por otra parte, la falta de estaciones representativas que tienen duraciones suficientes no permitió llevar el estudio en las zonas secas 1 y 2.

El estudio sigue la misma lógica metodológica que la que fue utilizada para el estudio de las lluvias anuales y diarias. En la gran mayoría de los casos, el mejor ajustamiento de las intensidades es realizado por las leyes de Galton y de Pearson III; dada la mayor facilidad del cálculo del parámetro de posición X_0 , se utilizó sistemáticamente la segunda.

El análisis se refiere a las intensidades máximas I , expresadas en mm/h, relativas a períodos de 5, 10, 15, 20, 30, 60 minutos y 24 horas. En anexo, representamos, para las estaciones más representativas de las cuatro zonas homogéneas estudiadas, las intensidades I y las alturas de lluvia h de intervalos de tiempo t que varían de 5 minutos a 24 horas, para las frecuencias $F = 0,5 - 0,1 - 0,02$ y $0,01$ (es decir los períodos de retorno $T = 2 - 10 - 50$ y 100 años).

Para cada estación, dos gráficos fueron trazados luego, en coordenadas logarítmicas :

- para cada intervalo de tiempo t , la intensidad I en función del período de retorno T ;
- para cada período de retorno T , la intensidad I en función del intervalo de tiempo t .

Hay que señalar que fue necesario verificar que los intervalos de tiempo seleccionados daban la precisión suficiente para estudiar la relación $I = \Phi(t)$. Este trabajo fue llevado en la estación de Quito-Observatorio (51 años de registros de buena calidad) para las duraciones 5, 10, 15, 20, 40, 50 minutos y 1, 2, 6, 12 y 24 horas.

Se puede constatar en el gráfico 13, cualquiera que sea el intervalo, que la relación $I = f(T)$ puede ser considerada como lineal con no obstante una discontinuidad para el período de retorno de 10 años.

Las ecuaciones que corresponden a los 2 grupos de rectas así definidos son de la forma :

$$\log I = \log I_1 + \alpha \log T \quad \text{es decir } I = I_1 \times T^\alpha$$

donde I_1 est el valor de I para $T = 1$ año y, para cada valor de t seleccionado con $T = 1$ año y $T = 10$ años :

$$\alpha = \log(I_{10}/I_1)$$

Igualmente, las curvas de intensidad-duración en función de los períodos de retorno pueden ser asimilados a conjuntos de rectas (gráfico 14). Allí también se observa una discontinuidad ubicada hacia $t = 1$ hora pero que puede variar entre 45 y 90 minutos.

Excepcionalmente, una segunda discontinuidad puede aparecer en los alrededores de $t = 15$ o 20 minutos; es le caso en El Puyo y Tipuani en la cuenca amazónica, Tulcan y Quito en la

región andina y Milagro en la zona litoral. Ninguna explicación satisfactoria fue encontrada en cuanto a este fenómeno.

Cada una de las líneas rectas puede ser definida con la ecuación :

$$\log I = \log I_2 + a \log t \quad \text{c'est-à-dire } I = I_2 \times t^a$$

Tomando la intensidad I_0 que corresponde a $t = 1$ año (logaritmos nulos), tenemos :

$$I = I_0 \times t^a \times T^a$$

Para el cálculo de los parámetros de las líneas rectas, una vez definido $I = I(t, T)$, seguimos el método indicado por J. Guiscafré y F. Moniod (Cah. ORSTOM, serie Hydro, 1975) :

$$I = I_0 \times t^a \times T^{(b+c \log t)} \quad (1)$$

Una estimación gráfica llevada a partir de las curvas $I = f(T)$ permite determinar los valores de las constantes de las porciones de las líneas rectas (son generalmente dos excepto para las cinco estaciones ya citadas) para intervalos de tiempo superiores o inferiores a 1 hora y períodos de retorno superiores o inferiores a 10 años. Válidas para fórmulas donde t está expresado en horas y T en años, están reagrupadas en el cuadro 3.

Se notará que en algunos casos, como el de Quito, las líneas rectas $I = \Phi(t)$ son paralelas, cualquiera que sea el valor de T . Tenemos entonces la ecuación simplificada :

$$I = I_0 \times t^a \times T^b \quad (2)$$

Subrayemos también que el cambio de pendiente de la relación $I = \Phi(t)$ no es un fenómeno específico del Ecuador y que ya ha sido observado en países donde los regímenes climáticos, sin embargo, son muy diferentes, Antillas, Africa del Norte, Brasil e incluso en Europa.

También hay que notar que partiendo de las fórmulas (1) y (2), se pueden estimar las alturas pluviométricas h durante un intervalo t y para un período de retorno T dado :

$$h = I_0 \times t^{(a+1)} \times T^{(b+c \log t)} \quad (3)$$

$$\text{y cuando } c = 0, \quad h = I_0 \times t^{(a+1)} \times T^b \quad (4)$$

Todas estas relaciones que unen las intensidades máximas y las alturas pluviométricas diarias están establecidas gracias a la fórmula general (1).

Utilizando el índice i para todos los parámetros de las fórmulas que permiten el cálculo de I para $t \geq 1$ hora y el índice j cuando $t < 1$ hora, y si H es la altura pluviométrica diaria que corresponde al período de retorno T , tenemos :

$$\begin{aligned} \text{si } t \geq 1 \text{ hora :} & \quad I_{24} = I_{(0,i)} \times 24^{a_i} \times T^{(b_i + c_i \times \log 24)} \\ \text{y} & \quad H = I_{(0,i)} \times 24^{(a_i + 1)} \times T^{(b_i + c_i \times \log 24)} \\ \text{y cuando } c = 0, & \quad I = 24^{-(a_i + 1)} \times t^{a_i} \times H \end{aligned}$$

si $t < 1$ hora :

$$I = I_{(0,j)} \times t^{a_j} \times \left[\frac{H}{I_{(0,i)} \times 24^{(a_i+1)}} \right]^{\frac{b_j + c_j \times \log t}{b_i + c_i \times \log 24}}$$

sea, cuando $c = 0$,

$$I = I_{(0,j)} \times t^{a_j} \times \left[\frac{H}{I_{(0,i)} \times 24^{(a_i+1)}} \right]^{\frac{b_j}{b_i}}$$

En el caso general, cuando $c \neq 0$, la fórmula es compleja :

$$I = I_{(0,j)} \times t^a \times \left[\frac{H}{I_{(0,i)}} \right]^{(m+p \times \log t)} \times 24^{(q+r \times \log t)}$$

Para $t \geq 1$ hora :

$$\begin{aligned} I_{(0,j)} &= I_{(0,i)} \\ m &= b_i / (b_i + c_i \log 24) \\ p &= c_i / (b_i + c_i \log 24) \\ q &= -m (a + 1) \\ r &= -p (a + 1) \end{aligned}$$

Para $t < 1$ hora :

$$\begin{aligned} I_{(0,j)} &\neq I_{(0,i)} \\ m &= b_j / (b_i + c_i \log 24) \\ q &= -m (a + 1) \\ r &= -p (a + 1) \end{aligned}$$

Pero la discrepancia importante que existe entre la complejidad del cálculo de las constantes, por una parte, y el número reducido de las muestras observadas disponibles en cada una de las zonas pluviométricas, por otra parte, justifica la utilización de dos hipótesis simplificadoras.

Consisten en considerar, la una que la relación $I = \Phi(t)$ sólo está formada por dos semi-líneas rectas comunes al punto $t = 1$ hora, la otra que el parámetro c es nulo.

Entonces, llegamos a formulas del tipo :

$$I = K \times t^a \times H^n \quad (5)$$

Para $t \geq 1$ hora

$$\begin{aligned} a &= a_i \\ n &= 1 \\ K &= 24^{-(a_i+1)} \end{aligned}$$

Para $t < 1$ hora

$$\begin{aligned} a &= a_j \\ n &= b_j / b_i \\ K &= I_{(0,j)} \times \left[I_{(0,i)} \times 24^{(a_i+1)} \right]^{\frac{b_j}{b_i}} \end{aligned}$$

Todos estos parámetros pueden ser calculados a partir de las constantes del cuadro 3.

1.4.2. Síntesis de los resultados del estudio de las Intensidades.

El método expuesto en el párrafo anterior permite presentar, a escala regional, reglas de estimación relativamente sencillas ya que, para el cálculo de los diferentes parámetros en relación con la fórmula (5), la única variable utilizada es la pluviometría diaria de frecuencia mediana $H_{0,5}$.

A continuación, damos una definición de los parámetros e índices utilizados :

l_1	es el valor de l_0 sea $l_{(0,i)}$	para $t < 1$ hora y	$0,1 \leq F < 1$
l_2	es el valor de l_0 sea $l_{(0,i)}$	para $t < 1$ hora y	$0,01 < F < 0,1$
l_3	es el valor de l_0 sea $l_{(0,i)}$	para $t \geq 1$ hora y	$0,1 \leq F < 1$
l_4	es el valor de l_0 sea $l_{(0,i)}$	para $t \geq 1$ hora y	$0,01 < F < 0,1$
a_1	es el exponente de t	para $t < 1$ hora	
a_2	es el exponente de t	para $t \geq 1$ hora	
b_1	es el exponente de T	para $t < 1$ hora y	$0,1 \leq F < 1$
b_2	es el exponente de T	para $t < 1$ hora y	$0,01 < F < 0,1$
b_3	es el exponente de T	para $t \geq 1$ hora y	$0,1 \leq F < 1$
b_4	es el exponente de T	para $t \geq 1$ hora y	$0,01 < F < 0,1$

ZONAS 1, 2 : cualquier estimación es imposible.

ZONA 3 :

para $t < 1$ hora :	para $t \geq 1$ hora :
$l_1 = 0,64 \times H_{0,5} - 7$	$l_3 = l_1$
$l_2 = 0,59 l_1 + 22$ soit,	$l_4 = l_2$ soit,
$a_1 = - 0,410$	$a_2 = 0,800$
$b_1 = - 0,020 l_1 + 0,823$	$b_3 = b_1$
$b_2 = 0,585 b_1 - 0,027$	$b_4 = b_2$

ZONA 4 :

para $t < 1$ hora :	para $t \geq 1$ hora :
$l_1 = 0,74 \times H_{0,5} - 32$	$l_3 = 0,72 \times H_{0,5} - 29$
$l_2 = 1,13 l_1 + 5$ soit,	$l_4 = 0,87 l_3 + 20$ soit,
$a_1 = 0,0091 l_1 - 0,738$	$a_2 = - 0,0027 l_3 - 0,657$
$b_1 = 0,0034 l_1 + 0,373$	$b_3 = - 0,0039 l_3 + 0,428$
$b_2 = 0,328 b_1 + 0,046$	$b_4 = 0,246 b_3 + 0,072$

ZONA 5 :

para $t < 1$ hora :	para $t \geq 1$ hora :
$l_1 = 0,61 \times H_{0,5} - 3$	$l_3 = 0,695 \times H_{0,5} - 6$
$l_2 = l_1 + 4$ soit,	$l_4 = 1,21 l_3 + 1$ soit,
$a_1 = 0,0085 l_1 - 0,726$	$a_2 = - 0,009 l_3 - 0,673$
$b_1 = - 0,005 l_1 + 0,281$	$b_3 = - 0,006 l_3 + 0,310$
$b_2 = 0,508 b_1 + 0,001$	$b_4 = 0,440 b_3 + 0,017$

ZONA 6 : Se debe tener en cuenta la discontinuidad de la relación $l = \Phi(t)$ para $t = 15$ minutos.

para $t < 15$ minutos :	para $15 \text{ mn} \leq t < 1 \text{ h}$:	para $t \geq 1$ heure :
$l_1 = 0,66 \times H_{0,5}$	$l_1 = 0,50 \times H_{0,5}$	$l_3 = 0,47 \times H_{0,5}$
$l_2 = l_1 + 7$ sea,	$l_2 = l_1 + 7$ sea,	$l_4 = l_3 + 7$ sea,
$a_1 = - 0,250$	$a_1 = - 0,490$	$a_2 = - 0,750$
$b_1 = 0,105$	$b_1 = 0,110$	$b_3 = 0,120$
$b_2 = 0,060$	$b_2 = 0,055$	$b_4 = 0,060$

A pesar de una precisión relativa, estas fórmulas son bastante homogéneas en cada una de las zonas.

Los ábacos 15 a 18 facilitan el cálculo de los parámetros necesarios para utilizar la ecuación (5).

Si se trata de hacer estimaciones rápidas a escala nacional, hasta podemos hacer aproximaciones y utilizar solamente un solo grupo de fórmulas en las cuatro zonas consideradas :

$$I_1 = 0,69 \times H_{0,5} - 6$$

$$I_2 = 1,16 \times H_{0,5} + 2$$

Para el exponente de t :

Zona 3 :	$a_1 = - 0,410$	$a_2 = - 0,800$
-----------------	-----------------	-----------------

Zona 4 :	$a_1 = - 0,350$	$a_2 = - 0,790$
-----------------	-----------------	-----------------

Zona 5 :	$a_1 = - 0,600$	$a_2 = - 0,850$
-----------------	-----------------	-----------------

Zona 6 :	$a_1 = - 0,490$	$a_2 = - 0,750$
-----------------	-----------------	-----------------

$$b_1 = - 0,0056 I_1$$

$$b_2 = 0,48 b_1 + 0,008$$

2. REGIONALIZACION MENSUAL DE LAS PRECIPITACIONES EN EL NORTE DEL ECUADOR

2.1 Problemática

2.1.1. Marco general del estudio

Desde 1987, el Instituto Ecuatoriano de Recursos Hidráulicos (INERHI) y el ORSTOM vienen estudiando el funcionamiento del riego tradicional andino con el fin de establecer recomendaciones para la elaboración de un Plan Nacional de Riego.

Los sistemas de riego tradicionales existieron tal vez en la época pre-incaica, pero se desarrollaron sobre todo con la colonización española. Están compuestos, en su mayoría, de pequeños perímetros (menos de 100 ha) dispersos en el espacio y que ocupan los tres pisos climáticos del callejón interandino.

Están alimentados por infraestructuras complejas (canales cavados directamente en el suelo) que toman el agua en los ríos por medio de tomas rústicas, sin obra de regulación alguna. El caudal derivado está entonces sujeto a las fluctuaciones de los recursos hídricos de la red hidrográfica.

El proyecto está dividido en 7 grandes temas de estudio (análisis del paisaje, trabajos pluridisciplinarios en terrenos representativos, inventario, análisis hidroclimático, observatorio agro-socio-económico, suelos, investigación histórica) cuyos resultados son integrados en un análisis global (tema nº 8) en base al cual se elaboran diagnósticos y se establecen recomendaciones en una perspectiva a corto, mediano y largo plazo.

La repartición del agua es uno de los aspectos fundamentales del estudio para el diagnóstico de la situación y la validez de las recomendaciones.

2.1.2. La equidad hidrológica y su importancia

El buen funcionamiento de un sistema de riego depende en gran medida de la equitativa repartición del agua a todos los usuarios al interior de un mismo perímetro (distribución), entre perímetros de un mismo sistema complejo (repartición) y entre los diferentes sistemas repartidos a lo largo de la red hidrográfica (dotación global).

Sin embargo, en este último caso, la desigualdad es patente. Para necesidades climáticas poco diferentes (un mismo piso altitudinal y sistemas de cultivo similares), las dotaciones concedidas varían de 0,1 a 0,4 l/s/ha en el piso frío, de 0,2 a 0,7 l/s/ha en el piso templado y de 0,3 a 1,0 l/s/ha en el piso subtropical, es decir en promedio una relación de 1 a 3.

Tales diferencias suscitaron conflictos mayores que obligaron al Estado a intervenir en el manejo del agua hasta el punto de nacionalizar todos los recursos hídricos en 1972.

Son igualmente esas diferencias las que han modelado el trazado de los canales en el paisaje andino, evidenciando las diferencias de estructura y de poder. En general, las grandes haciendas de los fondos de valle van a buscar a gran altura, aguas arriba de las demás tomas, a fin de evitar compartir el déficit de agua de los ríos cuando se producen estiajes pronunciados, incluso si ello les obliga a construir y mantener infraestructuras de transporte largas y sinuosas.

Es evidente que una situación de este tipo no favorece la coexistencia armoniosa de los diferentes grupos de usuarios.

El Estado ha tratado efectivamente de corregir esta herencia del pasado, pero le ha faltado ya sea la voluntad necesaria o datos precisos para establecer una repartición aguas arriba - aguas abajo más equitativa con un ordenamiento racional y económico de los canales y las tomas.

Ciertamente, el problema es complejo y está estrechamente asociado a las consideraciones hidrológicas y sus consecuencias agro-socio-económicas.

En este contexto, el proyecto INERHI-ORSTOM se comprometió a proporcionar a las instituciones competentes una base científica y técnica que justifique y oriente la aplicación de una política de ese tipo.

2.1.3. Regionalización climática preliminar (necesidad y objetivos)

Para responder parcialmente a tal objetivo, el hidrólogo necesita comparar las necesidades y los recursos, no sólo a nivel de las tomas actuales sino a todo lo largo de la red hidrográfica, a fin de prever las diferentes condiciones de evolución (reordenamiento, incorporación de nuevos perímetros al riego).

El espacio es dividido inicialmente en zonas de recursos (microcuencas) y en zonas de análisis y de recomendaciones (ZARI).

Las microcuencas son cuencas vertientes de 50 km² aproximadamente en las que los factores condicionantes del flujo (pendiente, permeabilidad, características y ocupación del suelo) son más o menos homogéneos. Se ajusta un modelo lluvia-caudal en cada una de ellas.

Las ZARI presentan toda la cadena de movilización, transporte, distribución y utilización del agua. Sus límites son trazados en función de los accidentes del terreno y de las infraestructuras existentes. Son ideales para estudiar la evolución de los sistemas de producción.

La estimación de los recursos requiere un buen conocimiento regional de la lluvia y de la ETP (estimación de los valores promedio en cada microcuenca) mientras que la evaluación de las necesidades depende en gran parte de una correcta estimación puntual de los mismos parámetros a nivel de cada perímetro.

Consecuentemente, es indispensable un estudio climático preliminar que permita una estimación precisa de la lluvia y de la ETP en todo punto del espacio estudiado.

Si además no nos contentamos con valores promedio interanuales, sino que por el contrario deseamos introducir la noción de riesgo, es necesario razonar a nivel de series cronológicas.

Desde el punto de vista agronómico, el quinquenio o el decenio es un intervalo adecuado. Teniendo en cuenta los datos disponibles (y evidentemente manuscritos), el volumen de información y el marco de planificación en el que se desarrolla el proyecto, la elección de un período mensual es razonable.

La regionalización climática tiene entonces como objetivo generar en todo punto del espacio series cronológicas mensuales, estadísticamente probables, de lluvia y de ETP.

Dicho trabajo ha avanzado considerablemente en lo que respecta al callejón interandino, la región costera y las islas Galápagos. Será realizado más tarde en la región amazónica. Actualmente, concierne algo menos de 900 estaciones pluviométricas y climáticas.

2.2. Metodología

2.2.1. Estudios anteriores y red

Numerosos estudios ya realizados sobre el tema son sumamente someros y conciernen sitios bastante restringidos. La información correspondiente es por cierto difícil de obtener.

A nivel nacional, únicamente el ORSTOM ha emprendido un análisis serio de la red climática, en el marco de su colaboración con el Ministerio de Agricultura y Ganadería para el Programa Nacional de Regionalización Agraria (PRONAREG). Los numerosos informes de E. Cadier, J.-F. Nouvelot, P. Pourrut y sus contrapartes nacionales constituyen una importante base de conocimiento

Sin embargo, sigue siendo insuficiente para alcanzar los objetivos planteados, ya que en la época en que fueron elaborados, no se disponía de medios informáticos y, sobre todo, la información disponible era insuficiente.

En efecto, la red es reciente en su conjunto (numerosas estaciones fueron instaladas alrededor de 1965), es manejada por más de 30 organismos públicos o privados, cada uno con sus preocupaciones e intereses, lo que explica en parte la deficiente repartición de las estaciones, desde el punto de vista tanto espacial como altitudinal.

Esto constituye un inconveniente considerable en un medio de relieve sumamente contrastado y sometido a diferentes fenómenos climáticos que provocan gradientes pluviométricos importantes en función de la exposición y de la situación general de las vertientes.

Por ello, la sola utilización de los datos de la red no es suficiente como para apreciar correctamente las variaciones espaciales de los parámetros investigados.

2.2.2. Zonas pseudo-proporcionales y vectores representativos

En un espacio sometido a los mismos fenómenos climáticos (planetarios, regionales y locales), los valores de los parámetros climáticos serán más o menos proporcionales hasta un cierto intervalo de tiempo.

Dentro de la zona climática homogénea considerada, cada parámetro puede caracterizarse por una serie única, representativa de su organización cronológica interna.

El espacio se restringe si se disminuye el intervalo (del año al mes por ejemplo) o si se exige una relación pseudo-proporcional mayor dentro de la zona.

Las definiciones anteriores constituyen la base teórica de los « vectores regionales » que son series cronológicas homogéneas creadas en base a las medidas observadas en las estaciones que pertenecen a la zona climática considerada, medidas a veces incompletas y que pueden presentar errores sistemáticos sin que ello influya en la elaboración del vector.

Actualmente, existen dos métodos (desarrollados en el ORSTOM): el vector regional de G. Hiez (1977) y el vector de los índices anuales de precipitación de Y. Brunet-Moret (1979). Sus fundamentos teóricos son expuestos en los artículos citados en la bibliografía, por lo que no nos detendremos en ese punto.

2.2.3. Programa CLIMAN

CLIMAN es un programa desarrollado en el proyecto INERHI-ORSTOM en base al algoritmo de cálculo de Brunet-Moret. Funciona con un intervalo mensual (análisis y correcciones) y permite tratar parámetros climáticos (temperatura, insolación, humedad relativa, viento, evaporación del tanque) así como los caudales promedio.

Primeramente, posibilita la detección, la corrección o la supresión de los errores sistemáticos de las series cronológicas estudiadas (fase de homogeneización), y luego la búsqueda de los límites de las zonas climáticas homogéneas (fase de regionalización) para las cuales genera una serie cronológica representativa de índices mensuales y anuales.

La pseudo-proporcionalidad de una zona es medida con el valor del coeficiente de correlación promedio entre estaciones y el vector correspondiente (en caso de estricta proporcionalidad, ese valor es igual a 1).

Luego de varias pruebas, se considera una zona como homogénea si los coeficientes de correlación mensuales y anuales son superiores o iguales a 0,9.

En realidad, se aceptan generalmente zonas en donde tales coeficientes son cercanos a 0,9 cuando la baja densidad de la red no permite reducir la zona.

En teoría, es posible agrupar la homogeneización y la regionalización en un solo paso. La visualización de las curvas de dobles masas entre estaciones y vector permite determinar si una mala relación entre las dos (bajo coeficiente de correlación) proviene de errores sistemáticos o de la no pertenencia de la estación a la zona homogénea simbolizada por el vector.

Sin embargo, como el programa es manejado por otras instancias del INERHI y otras entidades ecuatorianas (Escuela Politécnica Nacional), se precisan las dos fases de análisis para evitar los errores de diagnóstico.

En la fase de homogeneización, se restringen lo más posible los espacios estudiados para estar seguros de no tomar en cuenta sino las estaciones que pertenecen a la misma zona homogénea.

El cálculo de los vectores de ETP es un tanto más complicado. Los parámetros son homogeneizados primeramente con CLIMAN, ya sea por el método del vector o por el análisis de las simples masas que en muchos casos es más que suficiente, en razón de la poca organización cronológica interna de esas series.

Luego, en las pocas estaciones que poseen un tanque de evaporación de tipo A, la ETP es calculada según 7 fórmulas y los resultados obtenidos comparados con las evaporaciones medidas. Esta última operación se efectúa a nivel de los valores absolutos y de las variaciones estacionales y permite destacar las fórmulas mejor adaptadas según las regiones estudiadas.

Es necesaria pues se constata un desvío de ciertas fórmulas en función de la altitud (desvío ya estudiado en Colombia) que varía según el tipo de clima.

La ETP es luego calculada en cada estación climática según la fórmula adecuada y se puede entonces proceder a la fase de regionalización, como indicado anteriormente.

2.2.4. Clima y altitud

Los cálculos anteriores permiten delimitar zonas climáticas homogéneas representadas por vectores de valores mensuales y anuales relativos para la lluvia y la ETP, ajustados arbitrariamente a un valor interanual de 1.000 mm.

Queda por determinar los valores absolutos, lo cual se realiza mediante un estudio minucioso de las relaciones lluvia-altitud y ETP-altitud.

Esas relaciones están lejos de ser uniformes en una gran cuenca hidrográfica y dependen también de los mecanismos climáticos preponderantes. El conocimiento del clima es indispensable para identificar las zonas de validez de las relaciones encontradas que cubren en general algunas de las zonas homogéneas delimitadas en la fase de regionalización anterior.

En la práctica, hay un vaivén entre los dos análisis.

El producto final es un mapa de isoyetas (o isopletas) interanuales en el cual vienen a agregarse las zonas pluviométricas (o climáticas) homogéneas delimitadas, estando cada una de ellas representada por un vector de índices mensuales y anuales. Permite efectivamente generar una serie cronológica mensual en cada punto del espacio estudiado.

Ejemplo

Según el mapa de isoyetas, un punto recibe 570 mm de lluvia anual y pertenece a la región climática n° 3. Basta con multiplicar el vector pluviométrico de la región 3 por 0,570 para obtener una serie pluviométrica mensual probable del punto considerado.

Se procede de la misma manera en el caso de la ETP.

Para generar una serie promedio en una cuenca vertiente, se deberán tener en cuenta los porcentajes de superficie ocupados por los diferentes vectores aunque también la lluvia promedio correspondiente a las regiones climáticas concernidas.

2.3. Aplicación a la cuenca del Mira

2.3.1. Características generales

El sistema hidrográfico del Mira está dividido entre el Sur de Colombia y el Norte del Ecuador pero el proyecto se interesa solamente en la parte superior de la cuenca, situada enteramente en el callejón interandino ecuatoriano (figura V-8).

En efecto, esa parte contiene todos los sistemas de riego y está cerrada por una estación hidrométrica cuyas observaciones son de buena calidad (FF. CC. Carchi).

La altitud de esa cuenca, de una superficie de 3.500 km², varía entre 1.500 y 4.500 m, según los grandes valles principales bien dibujados (Chota, Ambi, Apaquí), a los cuales se agregan numerosos valles secundarios más o menos perpendiculares.

Está sometida evidentemente a la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical, a aquella (bastante atenuada por la cordillera Occidental) de las masas de aire provenientes del Pacífico en cuya dirección está orientada, y a aquella (en parte bloqueada por la cordillera Oriental) de los Alisios del Sudeste durante el verano (julio-agosto).

No se deben tampoco olvidar los movimientos locales de masas de aire más o menos importantes según los valles, su profundidad, su ancho y su exposición.

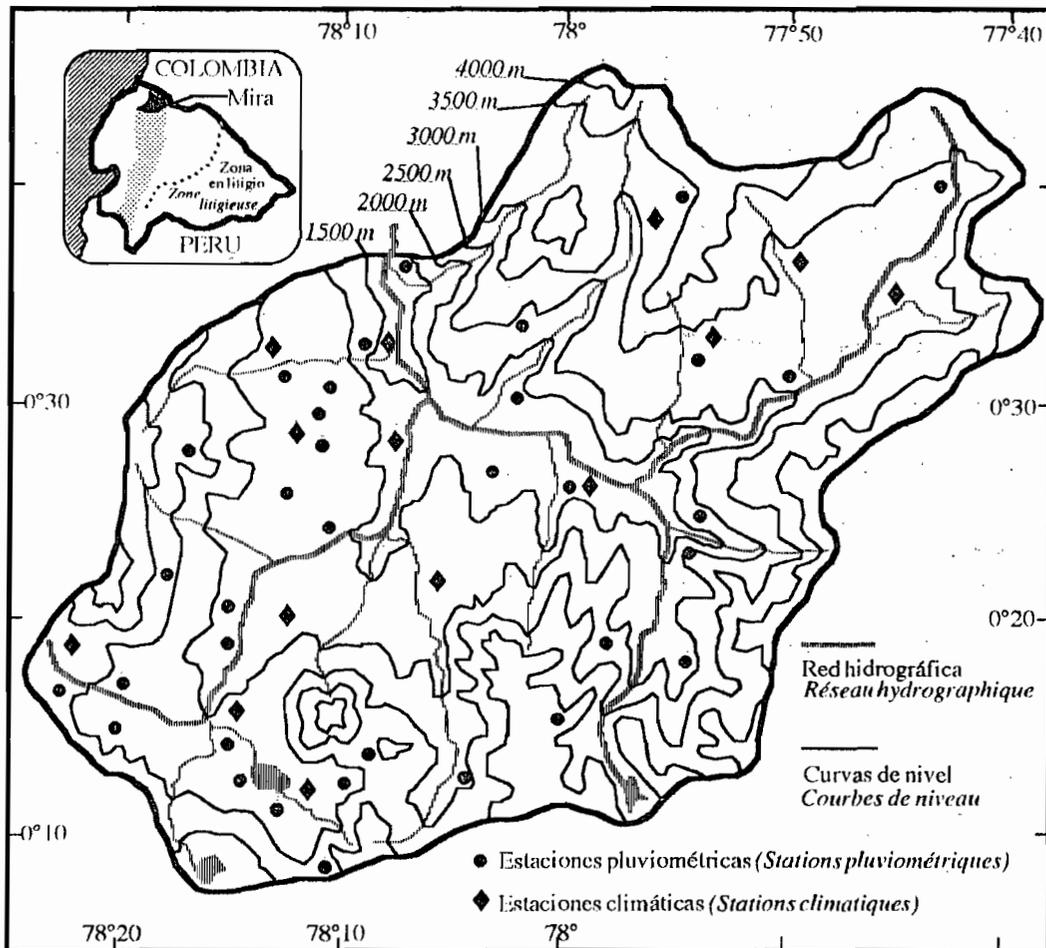


Fig. V-8
Cuenca del Mira - Oro-hidrografía - Estaciones pluviométricas y meteorológicas

La combinación de esos diferentes fenómenos más o menos alterados por el relieve, genera un régimen pluviométrico bimodal, al que se ajustan los ciclos de cultivo.

El riego es utilizado como complemento para asegurar la producción de una región de vocación agrícola que exporta buena parte de su producción hacia Colombia.

CARACTERISTICAS DEL RIEGO EN EL MIRA

1	Superficie total de la cuenca	:	347.860	ha
2	Superficie inferior a 3.600 m ²	:	298.055	ha (86 % de 1)
3	Superficie cultivada	:	149.220	ha (43 % de 1, 50 % de 2)
4	Superficie regada de la cual	:	50.340	ha (34 % de 3) en 293 perímetros por encima de los 2.700 m (lluvia/ETP de 970/1.025 mm por año)
		:	19 %	
		:	45 %	entre 2.300 y 2.700 m (lluvia/ETP de 795/1.165 mm por año)
		:	36%	por encima de los 2.300 m (lluvia/ETP de 540/1.405 mm por año)
		:	46 %	de grandes propiedades o haciendas
		:	22 %	de propiedades medianas o fincas
		:	32 %	de pequeñas propiedades o minifundios
5	Riego tradicional	:	43.544	ha (86 % de 4)
6	Riego estatal	:	4.600	ha (09 % de 4)
7	Riego mixto	:	2.196	ha (05 % de 4)
8	Nº de sistemas de riego	:	279	
9	Longitud total de los canales	:	1.164	km
		:	9 %	revestidos
		:	91 %	tradicionales, de tierra
10	Caudal total derivado	:	26,2	m ³ /s
11	Población de la cuenca en 1982	:	295.185	habitantes
12	Población vinculada al riego	:	157.861	hab. (53 % de 11)

El caudal derivado (10) está destinado sólo al riego y no tiene en cuenta otros usos (agua potable, abrevaderos...) que representan únicamente un caudal de 1,3 m³/s.

Un sistema de riego típico o promedio se compone en general de un canal de tierra de 4 km de longitud que transporta un caudal de 75 l/s para regar 180 ha en las que se encuentran los tres tipos de propiedades.

Las haciendas predominan en los dos pisos extremos. En el piso frío, utilizan riego para mantener pastos de ganado y cultivar cebada y papa, mientras que en el piso subtropical, la caña de azúcar, la alfalfa y los cultivos de hortalizas ocupan las mayores superficies.

El piso templado está ocupado en su mayoría por los minifundios que practican un policultivo a base de la asociación maíz-fréjol.

2.3.2. Homogeneización de las series pluviométricas

Desde 1987, se ha procedido a la recolección exhaustiva de los datos mensuales y anuales (manuscritos en su mayoría), en colaboración con el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y la Escuela Politécnica Nacional, ambos interesados en este estudio. Los datos han sido luego ingresados en computador en un formato propio de CLIMAN.

En el caso del Mira, 76 estaciones presentan un interés para el análisis climático: 65 están situadas en la cuenca misma y otras 11 en cuencas vecinas, permitiendo aprehender mejor la influencia de los Alisios del Sudeste y de las masas de aire provenientes del Pacífico.

En realidad, se escogieron sólo 54 estaciones — las demás presentan demasiados vacíos en las observaciones — que totalizan 1.059 años completos, es decir un promedio de 20 años por estación (1966-1985). Están agrupadas en función de sus períodos de observación y de su pertenencia a una misma zona homogénea. El grupo puede ser modificado y restringido durante la fase de homogeneización si se presenta una duda sobre la pertenencia a esa zona.

Los errores sistemáticos son detectados a nivel de cada grupo (inicialmente en los valores anuales y luego en los mensuales), mediante el estudio de las dobles masas estaciones-vectores y el análisis de los parámetros de detección proporcionados por CLIMAN. Dichos errores son entonces simplemente identificados (valores dudosos), corregidos (en casos de sustitución o desplazamiento de aparatos) o incluso suprimidos (valores incoherentes).

El diagnóstico es verificado mediante visitas al terreno, la lectura de fichas históricas de estaciones o una entrevista con los técnicos encargados del manejo de la red.

Una vez validado el diagnóstico, CLIMAN presenta en pantalla el aspecto de las dobles masas estación-vector antes y después de la corrección, en el formato que aparece en la figura V-9.

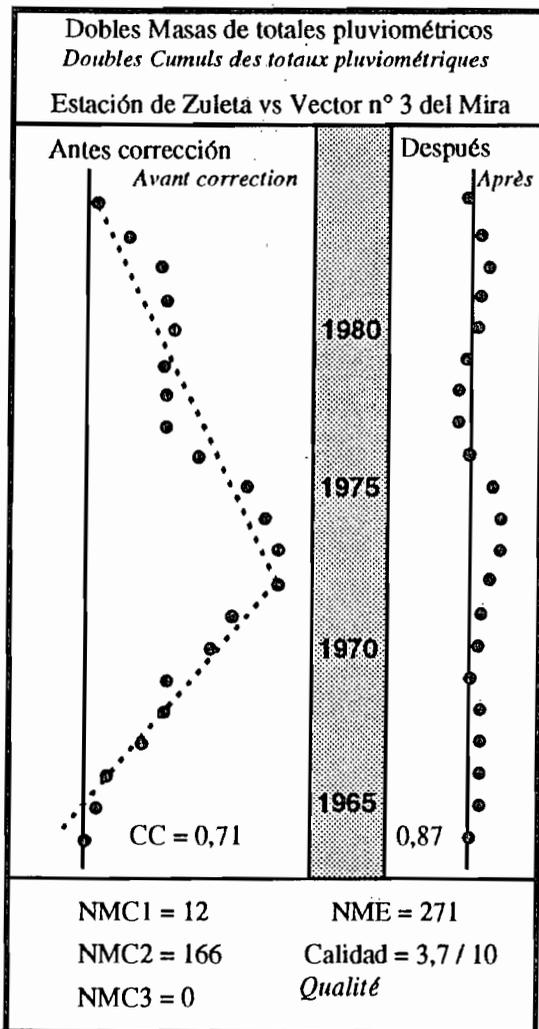


Figura V-9 - Homogeneización de series cronológicas

Ejemplo de homogeneización

La estación 316 de Zuleta presenta una ruptura muy clara en 1972 debida a una confusión entre probetas, hecho que es confirmado por un informe del inspector y una visita a la estación.

De los 271 meses examinados (NME), 166 son corregidos pero quedan aún 12 meses dudosos en 2 años. No existen meses incoherentes.

El coeficiente de correlación estación-vector pasa de 0,71 a 0,87 después de la corrección.

A pesar de su calidad bastante mediocre, esta estación sigue siendo importante por la extensión de su período de observación (años completos desde 1963) y su posición alejada del centro.

De todas las estaciones, que comprenden 1.059 años de observación, se examinaron 11.599 valores mensuales de lluvia, de los cuales 192 son identificados como dudosos, 1.443 corregidos y 666 eliminados por incoherencia.

En promedio, ello representa una estación de 10 años de observaciones, que contiene 215 valores mensuales, de los cuales 4 son dudosos, 27 corregidos y 12 eliminados.

Las notas de calidad se reparten de la siguiente manera:

19	estaciones	tienen una nota de	10
8	estaciones	tienen una nota entre	9 y 10
6			8 y 9
6			7 y 8
2			6 y 7
2			5 y 6
11	estaciones	tienen una nota entre	0 y 5

Se obtiene entonces un 50 % de estaciones con una nota superior a 9. La corrección de períodos largos debidos en gran parte al cambio de emplazamiento de las estaciones es la responsable de las menores notas, a excepción de las 2 más bajas que corresponden a valores globalmente incoherentes.

Los resultados de las diferentes fases de diagnóstico, acompañados de los esquemas anteriores, son reunidos en fichas de estación que constituyen una mina de información para el INAMHI.

2.3.3. Relaciones lluvia-altitud

Durante la fase de homogeneización, el programa calcula nuevamente los valores interanuales de cada estación en función del período de cálculo del vector. Esos datos son utilizados evidentemente para la elaboración de las curvas lluvia-altitud.

La altitud es considerada como el factor preponderante de las variaciones climáticas, lo cual ya fue demostrado y explicado en el estudio sobre el altiplano cundiboyacense de Colombia.

Las relaciones lluvia-altitud son estudiadas subiendo por los valles principales desde la parte baja de las cuencas. Posteriormente, el interés se centra en los valles secundarios.

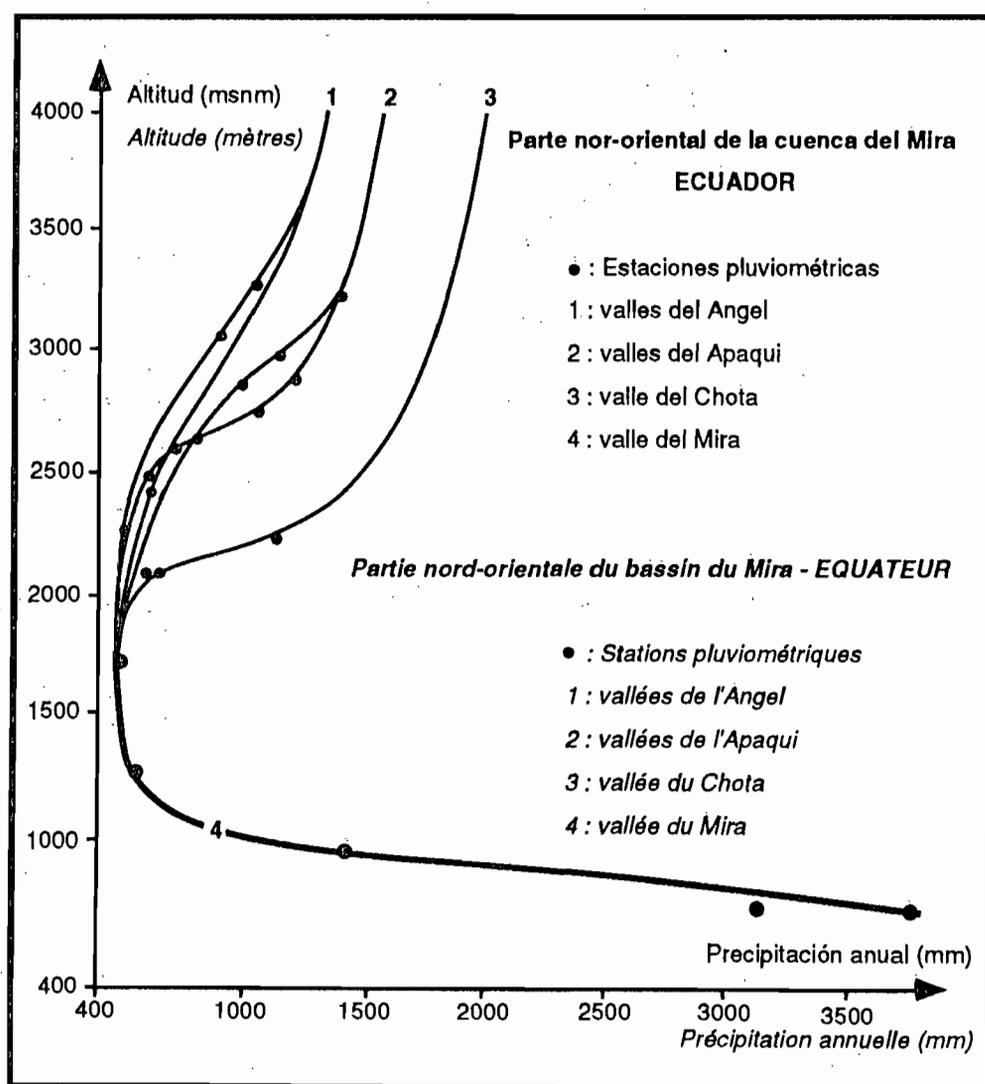


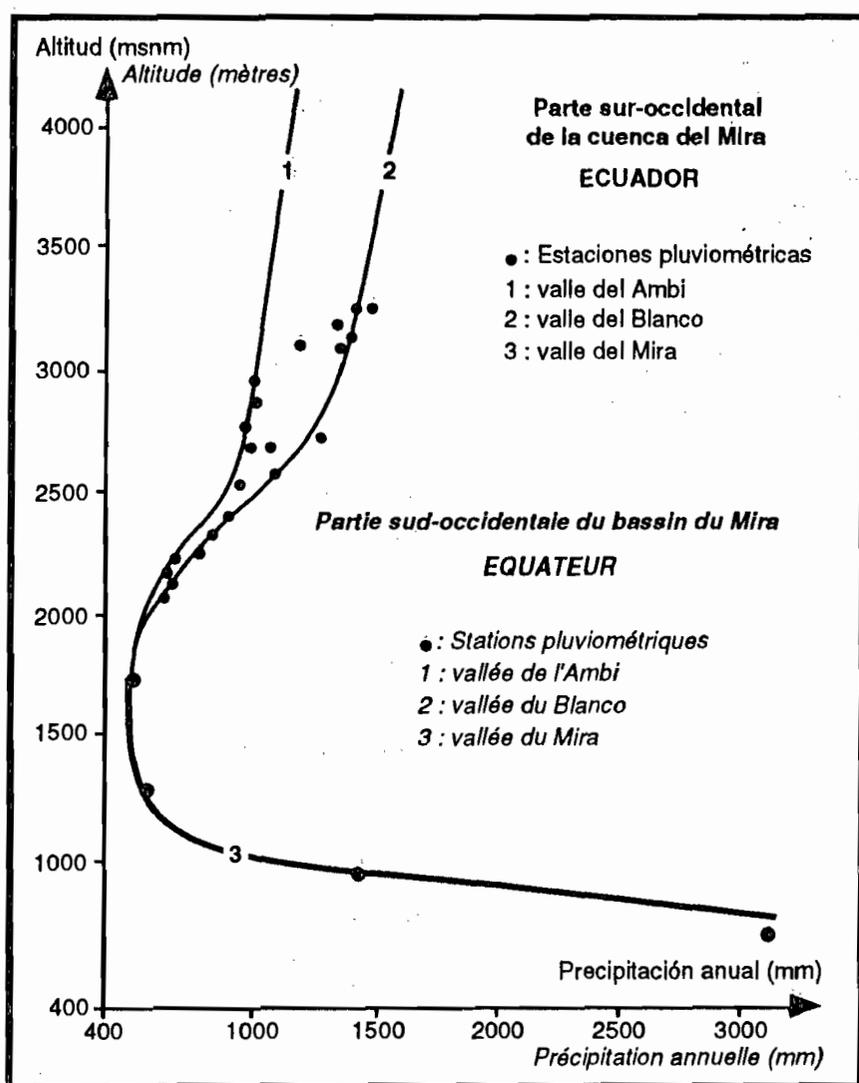
Fig. V-10a
Cuenca del Mira - Parte nordeste - Relaciones lluvia-altitud

Este análisis debe acompañarse de un buen conocimiento del clima local y de la dirección general de las masas de aire. No se vacilará en tener en cuenta las características de la vegetación natural cuando la densidad de las estaciones es insuficiente o su distribución espacial inadecuada.

En el caso del Mira (figuras V-10a y V-10b), se llega a dos tendencias principales que corresponden a los tres grandes valles señalados en la descripción general de la cuenca hidrográfica, con variaciones de gradiente según los valles secundarios transversales.

La parte baja de la cuenca (valle del Chota) corresponde al mínimo pluviométrico (menos de 500 mm de lluvia por año). La parte este y norte de la cuenca (valle del Apaquí) contiene 4 curvas de igual tendencia pero desplazadas según los diferentes valles transversales (valles de El Angel en el presente caso).

La parte oeste y sudoeste (figura V-10b), que corresponde al valle principal del Ambi y a un valle secundario bastante importante (Blanco), está más protegida, por lo que soporta gradientes menos importantes.



La parte inferior de la curva (común a las 2 figuras) corresponde al flanco occidental de la cordillera y no hace parte de la zona de estudio.

Esta parte corresponde a la bajada del río Mira desde el callejón interandino hasta el piedemonte de la cordillera.

Dicha vertiente está bien expuesta a las masas de aire que provienen del Pacífico y que provocan gradientes pluviométricos importantes.

Si se extiende el análisis hasta las estaciones de la costa, se encuentra un máximo pluviométrico de 4000 mm de lluvia anual, alrededor de 700 msnm.

En Colombia, este máximo se encuentra frecuentemente entre 1200 msnm y 1800 msnm.

Fig. 10b
Cuenca del Mira - Parte oeste y sudoeste - Relaciones lluvia-altitud

En los dos casos, se observará que, por encima de los 3.000 m, las curvas no son muy exactas en razón de la falta de estaciones. Fueron trazadas teniendo en cuenta curvas calculadas en cuencas vecinas y la vegetación natural (gracias a la ayuda del botánico C. Huttel).

La superficie situada por encima de los 3.000 m ocupa alrededor del 30 % de la superficie total de la cuenca y recibe la mayor parte de la lluvia.

Todo error en los totales pluviométricos de la zona acarrearán entonces imprecisiones aún mayores en el cálculo de los recursos hídricos.

Estas curvas permiten trazar con precisión las isoyetas promedio anuales valle por valle (ver figura V-11).

2.3.4. Regionalización

El módulo de regionalización de CLIMAN utiliza los archivos de datos corregidos. Luego de la fase de homogeneización, sólo quedan 48 estaciones cuya calidad se considera suficiente. Estas son agrupadas según la proporcionalidad de sus respectivos valores (anuales y luego mensuales), tratando de constituir regiones climáticas en las cuales el coeficiente de correlación promedio entre estaciones y vector sea cercano o superior a 0,9.

Se utilizan las curvas lluvia-altitud son utilizadas para resolver el problema.

Una vez constituidos los grupos, se trazan los límites de zona teniendo en cuenta el relieve. En caso de que la baja densidad de las estaciones no permita un trazado exacto, se utilizan los factores del medio natural (vegetación por ejemplo) para definir un límite probable.

Coefficientes de correlación mensuales y anuales entre estaciones pluviométricas y vectores correspondientes

Los coeficientes promedio de cada grupo constan debajo del número de región.

nº Regiones	nº Estaciones	coef. mensuales	coef. anuales	nº Regiones	nº Estaciones	coef. mensuales	coef. anuales
nº 1 0,87 0,88	306	0,82	0,87	nº 6 0,90 0,91	021	0,92	0,92
	305	0,89	0,84		053	0,89	0,90
	059	0,91	0,89		317	0,90	0,92
	308	0,87	0,91		328	0,89	0,90
nº 2 0,91 0,91	084	0,91	0,94	nº 7 0,97 0,95	525	0,89	0,86
	103	0,86	0,83		001	0,99	0,98
	303	0,94	0,92		322	0,96	0,95
	102	0,89	0,94		323	0,87	0,92
nº 3 0,88 0,93	083	0,89	0,94	329	0,96	0,94	
	307	0,88	0,94	330	0,99	0,99	
	324	0,87	0,91	331	0,98	0,98	
	nº 4 0,89 0,91	304	0,90	0,94	332	0,99	1,00
310		0,85	0,93	333	0,99	0,99	
314		0,91	0,91	334	0,97	0,93	
315		0,91	0,88	875	0,99	0,84	
nº 5 0,91 0,90	105	0,86	0,89	nº 8 0,89 0,93	085	0,87	0,93
	110	0,93	0,95		100	0,89	0,95
	316	0,89	0,84		104	0,89	0,94
	319	0,91	0,91		301	0,88	0,93
	320	0,94	0,92		302	0,86	0,91
	321	0,89	0,91		311	0,93	0,95
	526	0,94	0,94		312	0,94	0,93
	604	0,90	0,87		313	0,91	0,97
			571	0,92	0,93		
			603	0,83	0,86		

El tratamiento de las 48 estaciones restantes desemboca en la constitución de 8 grupos homogéneos y por lo tanto de 8 vectores.

Se constata primeramente que se ha alcanzado el objetivo fijado, puesto que el menor coeficiente de correlación promedio es de 0,87.

El grupo 1 obtiene los resultados más bajos. Sólo dos estaciones pertenecen a la cuenca propiamente dicha; las otras dos están situadas un tanto más arriba, en una cuenca vecina dividida por la frontera con Colombia y en una vertiente orientada hacia el Norte. Las 4 estaciones están dispersas y son insuficientes como para definir un vector más representativo.

Para el grupo 3 se obtienen resultados medianos, pero el vector de esa región es calculado solamente en base a 3 estaciones (valor límite) bastante alejadas.

Se observará en cambio la buena homogeneidad del grupo 7, del cual la mayoría de estaciones forman parte de un valle secundario (río Blanco) en el que el INAMHI maneja una gran cuenca vertiente experimental.

Las estaciones son más numerosas que en otras partes, bastante concentradas y mejor observadas puesto que 8 de ellas obtienen una nota de calidad de 10.

En ese grupo, sólo dos estaciones presentan coeficientes inferiores a 0,9: la estación 323 en correlación mensual y la estación 875 en correlación anual.

En la primera, 76 meses son corregidos y 12 meses eliminados, lo cual deja flotando una cierta duda en cuanto a la calidad de los datos; la segunda posee el período más corto de observación (6 años), lo que da poca significación al valor de su coeficiente de correlación.

Finalmente, la estación 332 no tiene en realidad un coeficiente de 1 sino de 0,997.

De manera general, se observa que los resultados obtenidos dentro de cada grupo son tanto más desiguales cuanto menor es el número de estaciones.

Las zonas menos homogéneas, en las que los fenómenos climáticos son más complejos, son también, desafortunadamente, las que menos estaciones poseen.

Los límites de las regiones pluviométricas pseudo-proporcionales representadas en la figura V-11 están trazados en función de los grupos constituidos y teniendo en cuenta los límites altitudinales y los accidentes de relieve que separan a los diferentes valles.

Las regiones 8, 4 y 6

corresponden a la parte baja de los tres valles principales (Chota, Apaquí y Ambi) separados por estrechamientos muy marcados (entre 8 y 4 y entre 8 y 6) o por líneas de cresta importantes (entre 4 y 6).

La región 5

corresponde a la parte superior del valle del Ambi separado de la cuenca inferior por el volcán Imbabura. Estos accidentes de relieve modifican la circulación de las masas locales de aire y el impacto de los fenómenos climáticos continentales.

Las regiones 1, 2, 3 y 7

están separadas de sus regiones vecinas por un límite altitudinal. Están bien expuestas a las precipitaciones provocadas por el ascenso de las masas locales de aire y pueden estar sometidas igualmente a la influencia de las cuencas vecinas (influencia amazónica en la región 3 por ejemplo).

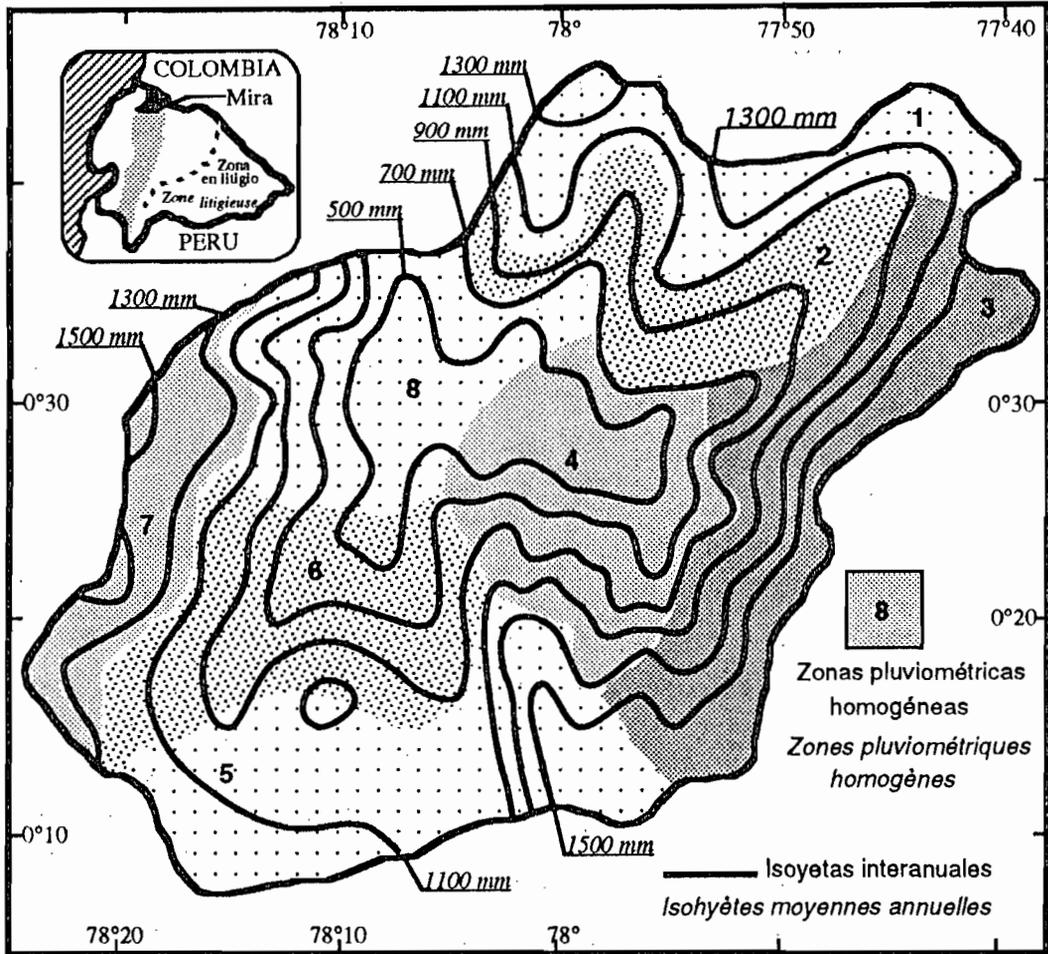


Fig. V-11

Cuenca del Mira - Isoyetas promedio anuales - Zonas pluviométricas pseudo-proporcionales

Según el análisis de las series mensuales representativas de cada región (vectores generados para el período 1965-1985), se constata primeramente que la organización cronológica de las lluvias anuales no difiere esencialmente de una región a otra.

Se encuentran algunas constantes:

años de precipitaciones (**muy**) elevadas: 69, 70, 71, **74**, **75**, 82, 84
 años de precipitaciones (**muy**) escasas: 67, 73, **77**, **78**, 79, 85

Se observará la poca influencia del Niño en la cuenca del Mira: el año 1983, que corresponde a un Niño excepcional, no presenta valores superiores al promedio salvo en algunas estaciones.

Existe una cierta diferencia en los coeficientes de variación ($CV = \text{desviación estándar} / \text{promedio}$) en función de la altitud.

Los menores CV (de 0,15 a 0,17) se encuentran en las regiones más altas (nº 1, 2, 5 y 7) mientras que se elevan a 0,22 - 0,23 en los fondos de valle (regiones 4, 6 y 8). Presentan un valor mediano (0,20) en la región intermedia nº 2.

Esta diferencia es en cambio más marcada a nivel de la repartición estacional de las precipitaciones (regímenes pluviométricos).

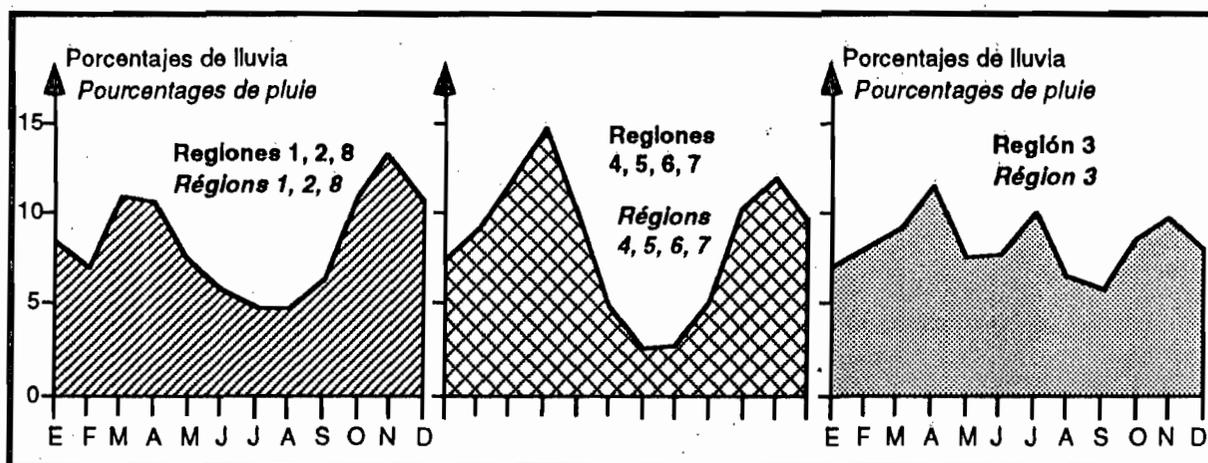


Fig. V-12

Cuenca del Mira - Repartición mensual de las precipitaciones en las 8 regiones pseudo-proporcionales

Las vertientes expuestas al Sur-Sudeste (1, 2 y 8) tienen una pluviometría mayor durante la segunda estación de lluvias (octubre-noviembre, diciembre) cuando la Zona de Convergencia Intertropical vuelve a subir hacia el Norte.

Sucede exactamente lo contrario en el caso de las vertientes expuestas al Norte (4, 5, 6 y 7) que poseen una primera estación de lluvias (marzo-abril-mayo) más fuerte, cuando la Zona de Convergencia Intertropical desciende.

La región 3 muestra claramente la influencia de los Alisios del Sudeste que logran pasar la barrera que constituye la cordillera. Prácticamente no tiene estación seca y recibe más lluvia en el mes de julio que en el mes de noviembre.

Se puede llevar el análisis de los vectores mucho más lejos, y ello se realizará una vez analizadas completamente todas las cuencas (lluvia y ETP), pero por el momento ese no es el objetivo del proyecto.

2.4. Los vectores y su utilización en el proyecto INERHI-ORSTOM

2.4.1. Regionalización de la ETP

El vector es utilizado igualmente para la regionalización de la ETP según la metodología descrita anteriormente. Los datos climáticos de base fueron homogeneizados mediante los métodos del vector y de las simples masas.

En el caso del Mira, el segundo método es suficiente para detectar y corregir los errores sistemáticos.

Después de la comparación con las medidas de los tanques de evaporación en 7 estaciones, nuestra elección recayó en la fórmula de Penman cuyos coeficientes fueron modificados y adaptados según los resultados obtenidos en el altiplano colombiano.

Las relaciones entre ETP y altitud ponen en evidencia 3 curvas distintas, y la regionalización mediante el vector desemboca en 3 regiones pseudo-proporcionales. En los dos casos, los 3 grupos concuerdan con y corresponden a los 3 valles principales.

Las correlaciones entre estaciones y vectores son en cambio inferiores a las encontradas en el análisis pluviométrico (coeficientes mensuales promedio de 0,88, 0,84 y 0,88 respectivamente).

Sin embargo, la comparación entre los valores observados en las estaciones y los calculados mediante los vectores muestra diferencias mínimas.

2.4.2. Para el cálculo de las necesidades actuales

Superponiendo los mapas de regionalización climática obtenidos (del tipo de la figura 4) y los mapas de delimitación de los perímetros regados, es sumamente fácil asociar a cada perímetro un valor promedio de lluvia o de ETP (isolíneas) y los vectores correspondientes.

Estas informaciones son llevadas al banco general del riego en donde figura una descripción exacta de la infraestructura de transporte y de distribución (longitud, pendientes, eficiencia, etc.) y de los perímetros (sistemas de producción, características hidrodinámicas de los suelos, superficies equipadas y regadas, etc.), establecida en base a las demás operaciones del proyecto.

En base a ese banco de datos, las necesidades actuales son calculadas por perímetro para cada mes del período para el que se han generado los vectores.

Tales cálculos desembocan en la evaluación de las dotaciones necesarias en función de los riesgos que se está dispuesto a correr: satisfacción de las necesidades un año de 2, tres años de 4, etc.

Los resultados son comparados con las concesiones legales y los caudales realmente derivados (que pueden ser diferentes) para establecer un primer diagnóstico sobre la movilización del agua de uso agrícola.

2.4.3. Para la estimación de las necesidades futuras

En numerosos casos, los sistemas de producción se han adaptado a los recursos hídricos disponibles (volumen y frecuencia de riego). Su evolución hacia sistemas más intensivos depende entonces en parte de una mejor distribución de tales recursos.

El proyecto procedió a la modelización de la economía agrícola en los espacios regados a fin de detectar los efectos de una rehabilitación de los sistemas de riego en la evolución de los sistemas de producción de las superficies regadas. Esa modelización, realizada mediante el programa GAMS del Banco Mundial, permite simular diversas situaciones plausibles de evolución según los objetivos perseguidos.

Por otro lado, las superficies aún no regadas pero potencialmente regables son también caracterizadas, sobre todo desde el punto de vista climático (valores promedio anuales de lluvia y de ETP y vectores asociados).

Los resultados de la simulación agro-económica proporciona esquemas de evolución en los perímetros regados y de incorporación al riego de superficies potenciales, que son introducidos en el banco de datos globales a fin de evaluar las necesidades de agua futuras según los diversos esquemas escogidos.

2.4.4. Como parámetros de entrada de un modelo lluvia-caudal

Los vectores y sus regiones son utilizados igualmente para ajustar un modelo de transformación lluvia-caudal en cuencas hidrológicamente homogéneas. Los límites de zonas deberían permitirnos aprehender mejor el impacto de los diferentes regímenes climáticos en el recurso agua a fin de calcular un vector promedio por cuenca que tenga en cuenta exactamente los diferentes impactos.

Se están efectuando pruebas en 3 cuencas vertientes controladas por estaciones hidrométricas y en las cuales influyen varias zonas climáticas, utilizando primeramente los datos observados en las estaciones según el método clásico y haciendo luego intervenir los vectores con sus zonas de impacto.

Las mejores correlaciones entre climas (lluvia, ETP) y caudales mensuales se obtienen con los vectores, pero aún no son satisfactorias (alrededor de 0,6) en razón de poca confiabilidad de los datos hidrométricos que requieren una minuciosa verificación.

2.4.5. Para el cálculo de los recursos disponibles en las tomas

A cada toma de agua corresponde una cuenca vertiente. Cada una de las tomas es identificada por su pertenencia a una cuenca hidrológicamente homogénea y por su posición en la red hidrográfica, gracias a una codificación lineal que permite determinar los caudales derivados aguas arriba y el impacto de la toma aguas abajo.

La cuenca vertiente se caracteriza por su superficie, sus valores promedio anuales de lluvia y de ETP y los vectores promedio correspondientes.

Una vez terminado el ajuste definitivo del modelo de transformación lluvia-caudal, es factible estimar los caudales disponibles (mes por mes y año por año) a nivel de cada toma, y simular los cambios propuestos por la simulación agro-económica, a fin de apreciar su factibilidad.

2.5. Otras utilizaciones posibles

2.5.1. Diagnóstico de la red

La metodología adoptada en la cuenca del Mira permite analizar las estaciones de la red según 3 criterios: la calidad de la observación, la repartición altitudinal y la distribución espacial.

Las curvas lluvia-altitud muestran claramente la falta de estaciones por encima de los 3.000 m. Los grupos 1, 2 y 3 tienen muy poca consistencia por la ausencia de estaciones; en ciertos casos, para elaborar el vector, fue necesario introducir puestos pluviométricos pertenecientes a cuencas vecinas. En el grupo 7, las estaciones están demasiado localizadas en la cuenca vertiente experimental, lo cual determina una falta de precisión en el trazado de los límites de la región.

En el fondo de valle (región 8 principalmente) en cambio, otros organismos (públicos o privados) han instalado estaciones climáticas para mejorar el manejo de los grandes perímetros de cultivo de caña de azúcar.

En algunos casos, dichas estaciones cumplen la misma función que ciertas estaciones del INAMHI, por lo que este último podría retirar ciertos puestos pluviométricos recientes (107 y 902) o muy mal observados (603) para reequilibrar la red hacia las regiones señaladas.

Estas recomendaciones prácticas y precisas podrán ser completadas con criterios más elaborados de manejo de la red (densidad mínima según el tipo de región) cuando se disponga de datos más completos sobre las demás cuencas del callejón interandino, a fin de proponer una óptima red de observación.

2.5.2. Clasificación y caracterización climática

Casi siempre, la clasificación climática a nivel de un país está basada en el análisis de estaciones llamadas representativas; en efecto, es casi imposible tener en cuenta todas las estaciones dado su gran número y las variaciones puntuales que presentan.

Desgraciadamente, pocas veces se demuestra la representatividad espacial de las estaciones escogidas.

La regionalización climática tiene la ventaja de delimitar espacios dentro de los cuales el vector generado proporciona una representatividad cifrada (correlaciones entre vector y estaciones). Es por ello un instrumento interesante para elaborar una clasificación climática precisa.

Si se estima que el número de vectores generados es aún demasiado elevado, es posible pasar al cálculo de vectores de segundo orden, de la misma manera que antes, para obtener una diferenciación más marcada.

Se desembocará entonces en una clasificación menos fina, pero a menudo suficiente. Se puede igualmente repetir la operación varias veces para llegar a los grandes tipos de clima.

La prueba efectuada en el Mira permite agrupar las 8 regiones originales en 3 categorías:

- las regiones 1, 2 y 8 con coeficientes de correlación promedio mensuales y anuales de 0,94 y 0,93 respectivamente;
- las regiones 4, 5 6 y 7 con coeficientes de 0,93 y 0,90;
- la región 3, aislada.

Así, se encuentran nuevamente los grupos establecidos a nivel de los regímenes pluviométricos.

2.6. Conclusion

Aunque falta todavía profundizar los conocimientos de la lluvia en Ecuador, los elementos de evaluación de las pluviometrías presentados anteriormente permiten, sin duda alguna, una aproximación regional suficiente como para elaborar sin error importante la pre-factibilidad de proyectos de desarrollo. Para calcular las obras definitivas, se necesitará estudios locales que completen la información.

Es decir que, en termino general, todas las metodologías utilizadas para conocer el valor de los parámetros pluviométricos de una región (aún las más modernas que permiten un reagrupamiento óptimo de las estaciones en base a zonas homogéneas), van a necesitar de una muy buena información sobre periodos largos, sobre todo si se trata de estimar las frecuencias altas.

Por eso, es necesario mantener una red estable de estaciones de medición. Pero cuando la red es recientemente instalada (como ocurre a veces en países en via de desarrollo), es factible (en cierto grado) mejorar las series cronológicas de corta duración con la extensión espacial de la información al interior de una zona homogénea para posteriormente utilizar el método de los "estación-años".

Por lo tanto, si en una estación dada, una lluvia de frecuencia F (decenal por ejemplo) tiene una probabilidad de ocurrencia promedio de un año sobre diez, este resultado no es válido a nivel de una región, en donde la misma lluvia de frecuencia decenal podrá ocurrir en varios sitios el mismo año.

Esta observación es aún más válida en la zona intertropical y en Ecuador en donde, a partir de masas de aire con sus características propias de temperatura y humedad (cf. artículo IV), los aguaceros excepcionales provienen mas que todo del aumento de la actividad convectiva que depende de condiciones estrictamente locales y aleatorias por supuesto.

Entonces, si el número de estaciones aumenta (si la densidad de la red crece), existen mayores posibilidades de observar dicho evento.

Todo lo anterior conlleva a la constatación siguiente : para redes de instalación reciente, es necesario tener en cuenta los criterios de representatividad espacial de las estaciones para solamente conservar una cobertura espacial mínima optimizada. La supresión de estaciones deberá estudiarse cuidadosamente en este caso.

La racionalización de la red se justifica plenamente cuando la red es bastante densa y que existen estaciones suficientemente antiguas.

En el marco del proyecto INERHI-ORSTOM (Riego tradicional en los Andes ecuatorianos), se ha podido apreciar la importancia de un buen conocimiento preliminar de las principales características del clima (lluvia y ETP) para establecer diagnósticos a nivel de perímetros y de sistemas muy dispersos en el espacio.

El método del vector regional permite responder a esa necesidad.

El algoritmo utilizado (vector de Y. Brunet-Moret) y el programa asociado (CLIMAN) son instrumentos prácticos y eficaces para homogeneizar las series cronológicas mensuales (casi todos los errores detectados fueron confirmados en las visitas de campo). Permiten igualmente delimitar zonas pseudo-proporcionales representadas por vectores que son luego utilizados para calcular necesidades y recursos en todo punto del espacio, lo cual corresponde a los objetivos fijados por el proyecto.

Por supuesto, quedan aún mejoras por realizarse sobre todo a nivel de las relaciones que caracterizan a una zona homogénea. En efecto, el coeficiente de correlación no es un indicador totalmente confiable de la pseudo-proporcionalidad de las series cronológicas dentro de una misma región, pues tiende a sobreestimar las relaciones entre vectores y estaciones en presencia de valores extremos muy marcados.

El índice utilizado por el programa MVR (vector de G. Hiez) ha sido probado en 14 estaciones de las islas Galápagos y allí tampoco los resultados son convincentes. Por el momento, la distinción entre regiones pseudo-proporcionales requiere aún un cierto conocimiento del medio.

Sin embargo, la metodología propuesta ofrece otras posibilidades, expuestas aquí rápidamente y que deberían generalizar su aplicación sobre todo en los medios andinos en donde las variaciones climáticas son particularmente importantes debido al relieve sumamente contrastado.

ELEMENTOS BIBLIOGRAFICOS

- BOULET, J.; LE GOULVEN, P.; POUPON, H., 1984.
Metodologías aplicadas, in *Estudio integrado del Altiplano cundiboyacense*, Ediciones del IGAC, Bogotá, 437 p., 17 fig., 20 cuad., 9 anexos.
- BRUNET-MORET, Y., 1979.
Homogénéisation des précipitations, in *Cahiers ORSTOM*, serie Hydrologie, Vol. XVI, nº 3 y 4, p. 147-170.
- CADIER, E.; POURRUT, P.; CRUZ, R. & al., 1978.
Estudio hidro-meteorológico e hidro-geológico de la cuenca del río Esmeraldas y del Norte ecuatoriano, MAG-ORSTOM, Quito, 2 vol.
- CADIER, E.; POURRUT, P., 1979,
Inventaire et détermination des données nécessaires à l'utilisation rationnelle des ressources en eau dans le cadre d'une planification globale des ressources naturelles renouvelables. L'expérience de l'Équateur, in *Cahiers ORSTOM*, serie Hydrologie, Vol. XVI, nº 3 et 4, p. 171-207.
- HIEZ, G., 1977.
L'homogénéité des données pluviométriques, in *Cahiers ORSTOM*, serie Hydrologie, Vol. XIV, nº 2, p. 129-172.
- LE GOULVEN, P.; GARCIA, R., 1980.
Proposición metodológica de un estudio climatológico para el desarrollo, ejemplo del Altiplano cundiboyacense, IGAC, Bogotá, 15 p. poligr.
- LE GOULVEN, P.; RUF, T.; RIBADENEIRA, H., 1987.
Méthodologie générale et détails des opérations du projet INERHI-ORSTOM. INERHI-ORSTOM, Quito, 06/87, 91 p. + ann. (francés, español).
- LE GOULVEN, P., 1987.
Caracterización climática, metodología de la operación D3, INERHI-ORSTOM, Quito, 20 p. poligr.
- LE GOULVEN, P., 1988.
El vector YBM, resumen metodológico; programas V1, V2, V3, manual del usuario, INERHI-ORSTOM, Quito, 10/88, 14 p.
- LE GOULVEN, P.; SEGOVIA, A.; ALEMÁN, M., 1988.
Banque des données climatiques mensuelles (pluie, évaporation, température, insolation, humidité relative, vent) pour l'ensemble du réseau (un peu plus de 900 stations).
- LE GOULVEN, P.; ALEMÁN, M.; OSORNO, I., 1988.
Homogeneización y regionalización pluviométrica por el método del vector regional, ponencia V Congreso Ecuatoriano de Hidráulica, Quito, 23-26/11/88, p. 59-83, (español, francés).
- LE GOULVEN, P.; ALEMÁN, M., 1990.
Logiciel CLIMAN (Climatic Monthly Analysis) de traitement des données contenues dans la banque climatique, écrit en langage FORTRAN.