

INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACION PARA LA AGRICULTURA

ORSTOM - Francia

ANALISIS DE LOS RIESGOS CLIMATICOS PARA LA AGRICULTURA
EN EL DEPARTAMENTO DE LA PAZ (BOLIVIA):
METODOLOGIA Y RESULTADOS

Jean-Paul Lhomme

Docteur-Ingénieur
Chargé de Recherches de l'ORSTOM

Oscar E. Rojas

Ingeniero Agrónomo

COPYRIGHT IICA-ORSTOM

AGOSTO DE 1983

28043

INTRODUCCION

En el presente estudio realizado para el departamento de La Paz en Bolivia se analizan tres tipos de riesgos climáticos relacionados con el desarrollo de los cultivos, sequía, helada y granizada. En otras áreas pueden existir otros tipos de riesgos climáticos que destruyen los cultivos, tales como el exceso de humedad, inundaciones, huracanas, etc. Pero es poco probable que estos riesgos ocurran en el área considerada. Por lo tanto, no serán tomados en cuenta. El propósito del estudio es cuantificar la probabilidad de ocurrencia de estos riesgos, lo cual a su vez servirá de base para futuras acciones sobre el seguro de cosechas en la zona de referencia.

Los datos básicos que sirven para este estudio son los valores diarios de los parámetros registrados a nivel de la red meteorológica: precipitaciones y temperatura. No se consideran datos adicionales de tipo agronómico. De esta manera se pueden utilizar fácilmente los métodos expuestos para cualquier otra región que disponga de una red meteorológica.

O.R.S.T.O.M. fonds Documentaire
N° : 28043
Cote : A

CONTENIDO

INTRODUCCION

CAPITULO I - METODOLOGIA

1. Qué son estos riesgos?
2. Estudio general de la distribución de los riesgos a lo largo del año
 - 2.1 Principio del análisis
 - 2.2 Realización de los cálculos
 - 2.3 Ejemplo de la estación de La Paz
3. Análisis de las sequías y heladas externas
 - 3.1 Principio del análisis
 - 3.2 Realización de los cálculos
 - 3.3 Ejemplo de la estación de La Paz

CAPITULO II - RESULTADOS

1. Los datos básicos
2. Distribución de los riesgos a lo largo del año
 - 2.1 Estaciones del altiplano y de los valles
 - 2.2 Estaciones de los yungas y de los llanos
3. Sequías y heladas extremas
 - 3.1 Probabilidades de sequías extremas
 - 3.2 Probabilidades de heladas extremas

CONCLUSION

CAPITULO I - METODOLOGIA

1. Qué son estos riesgos?

El primer problema que se le presenta al agroclimatólogo al analizar estos riesgos es el de definirlos y relacionar los daños agrícolas provocados por el clima con los parámetros registrados a nivel de la red meteorológica, por ejemplo, la sequía con la lluvia o la helada con la temperatura mínima. Conjuntamente con el problema de la definición se plantea el de la intensidad del fenómeno climático considerado como origen del daño: a partir de qué intensidad se puede afirmar que hay daño?

En el caso de las granizadas no se tratará el problema de la intensidad del fenómeno, puesto que generalmente no se mide su intensidad sino solamente su ocurrencia. Sin embargo, queda pendiente el problema de relacionar la intensidad de las granizadas con sus daños. Todas las granizadas no tienen el mismo impacto, lo cual depende del tipo de cultivo y de la intensidad del fenómeno en relación con el tamaño de los granizos.

En cambio con las heladas se presenta el problema de la intensidad en la definición del riesgo. A partir de qué umbral de temperatura se debe considerar que hay una helada. Generalmente se dispone únicamente de la temperatura del aire, registrada en un abrigo meteorológico colocado a 1.5 m encima del suelo. Pero esta temperatura es diferente de la que existe a nivel de las hojas y órganos de los cultivos o simplemente a nivel del suelo. Se habla de una helada meteorológica cada vez que la temperatura medida en la caseta alcanza un valor igual o inferior a 0°C. Pero se debe tener presente que la temperatura mínima del día es inferior a nivel del suelo. Pues las temperaturas más bajas suelen ocurrir durante la noche. Y, muy a menudo, por la noche, existe

En lo que se refiere a la sequía se consideró que ETP/2 pudiera representar el límite inferior de lluvia necesario para el desarrollo del cultivo y así constituir un umbral de sequía. En consecuencia un período elemental será considerado como seco si el total de lluvia no alcanza la ETP/2.

En cuanto a las heladas se consideró que un período elemental presenta una helada, cuando por lo menos en un día dentro de este período, la temperatura mínima es inferior a 0°C (helada meteorológica), sin tomar en cuenta la duración del fenómeno.

De igual forma se define un período elemental con granizada, si al menos durante este período, un día se presenta una granizada, sin preocuparse de su duración o intensidad.

Conociendo las probabilidades de sequía $P(S)$, helada $P(H)$ y granizada $P(G)$ y considerando que estos eventos son independientes entre sí, es interesante calcular la probabilidad con la cual ocurre al menos uno de estos tres eventos $P(S \cup H \cup G)$.

2.2 Realización de los cálculos

a. Riesgos de sequía

Para determinar los riesgos de sequía se necesita los datos diarios de lluvia con un número suficiente de años de registro (al menos 15 años) y los valores de evapotranspiración potencial (ETP). Se puede definir la ETP como la cantidad de agua que consume un cultivo con un buen abastecimiento hídrico, cuyas hojas cubren bien el suelo. Existen muchas fórmulas que permiten calcular la ETP a partir de parámetros climáticos tales como temperatura, radiación solar o humedad del aire. En el presente estudio se utiliza la de Priestley-Taylor que se detalla en el anexo.

Debido a la poca variabilidad de la ETP, tanto entre años como a lo largo de un mismo año, se puede calcularla utilizando valores promedios interanuales con una base de tiempo superior al día, tal como la década o el mes.

Para algunas estaciones con datos de lluvia no es posible calcular la ETP por falta de los datos necesarios. En este caso se recurre a los métodos clásicos de interpolación.

Conociendo el valor de la ETP para cada uno de los períodos elementales considerados, se contabiliza para cada uno el número de años de registro en los cuales la lluvia no alcanzó el valor correspondiente de la ETP. El cociente de este número de años por el número total de años de registro constituye la frecuencia de sequía.

b. Riesgos de helada y granizada

Para cada período elemental se contabiliza el número de años que tienen una temperatura abajo de 0°C dentro del período considerado. El cociente de este número de años por el número total de años constituye la frecuencia de helada.

De igual manera para las granizadas, se contabiliza, para cada período elemental, el número de años con ocurrencia del fenómeno, y el cociente de este número de años por el número total constituye la frecuencia de granizada.

c. Expresión matemática

Con el objeto de simplificar el manejo de los resultados es útil dar expresión matemática a las curvas que representan la evolución de las frecuencias de cada riesgo a lo largo del año. Las formas que toman estas curvas son muy variadas. En consecuencia la manera más adecuada de expresarlas mediante ecuaciones es utilizando series de Fourier:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cdot \cos \frac{2\pi tk}{T} + b_k \cdot \sin \frac{2\pi tk}{T} \right)$$

T representa el período de f(t), es decir los n períodos elementales que constituyen el año. a_k y b_k son los coeficientes de Fourier que se calculan a partir de las fórmulas siguientes escritas en forma discreta:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos \frac{2\pi tk}{T} \cdot dt$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin \frac{2\pi tk}{T} \cdot dt$$

Existen programas de cómputo para calcular esto sin dificultad. Cada estación puede ser caracterizada por un "set" de tres ecuaciones; cada ecuación representa uno de los riesgos. Estas ecuaciones tienen la ventaja de suavizar las irregularidades de las curvas empíricas y dar así una representación más cómoda para el usuario.

d. Riesgos conjuntos

A partir de esto es posible determinar la probabilidad con la cual pudiera ocurrir al menos uno de los tres riesgos (es decir sea una sequía, sea una helada o sea una granizada) para cada período elemental a lo largo del año. Esta probabilidad se escribe P (S U H U G) y se calcula fácilmente utilizando los eventos contrarios.

El evento contrario de S U H U G se escribe $\bar{S} \cap \bar{H} \cap \bar{G}$; \bar{S} , \bar{H} , \bar{G} representando los eventos contrarios de S, H y G (\bar{S} significa por ejemplo la ausencia de sequía).

$$P(S \cup H \cup G) = 1 - P(\bar{S} \cap \bar{H} \cap \bar{G})$$

Si se supone que los eventos \bar{S} , \bar{H} y \bar{G} son independientes entre sí, es posible escribir:

$$P(\bar{S} \cap \bar{H} \cap \bar{G}) = P(\bar{S}) \cdot P(\bar{H}) \cdot P(\bar{G})$$

Por lo tanto, se obtiene la fórmula siguiente:

$$\begin{aligned} P(S \cup H \cup G) &= P(S) + P(H) + P(G) \\ &\quad + P(S) \cdot P(H) \cdot P(G) \\ &\quad - P(S) \cdot P(H) - P(H) \cdot P(G) - P(S) \cdot P(G) \end{aligned}$$

por lo que es posible calcular el riesgo conjunto a partir de los riesgos elementales $P(S)$, $P(H)$ y $P(G)$, para cada período elemental a lo largo del año.

2.3 Ejemplo de la estación de La Paz

Ver las figuras 1 y 2.

3. Análisis de las heladas y sequías extremas

3.1 Principio del análisis

Se trata de determinar la probabilidad con la cual puede ocurrir una helada o una sequía de una intensidad dada en el transcurso del período considerado. Este período puede ser el año en el caso de un cultivo perenne o la estación de cultivo en el caso de un cultivo anual. No se toma en cuenta la fecha de ocurrencia, solamente el nivel de intensidad. La intensidad de una helada es caracterizada por el valor de la temperatura correspondiente abajo de 0°C . En cuanto a la sequía se la caracteriza por el número de días consecutivos sin lluvia.

Este tipo de análisis permite contestar a preguntas tales como:
-cuántos años cada diez ocurre una helada de intensidad -5°C en el transcurso del año?

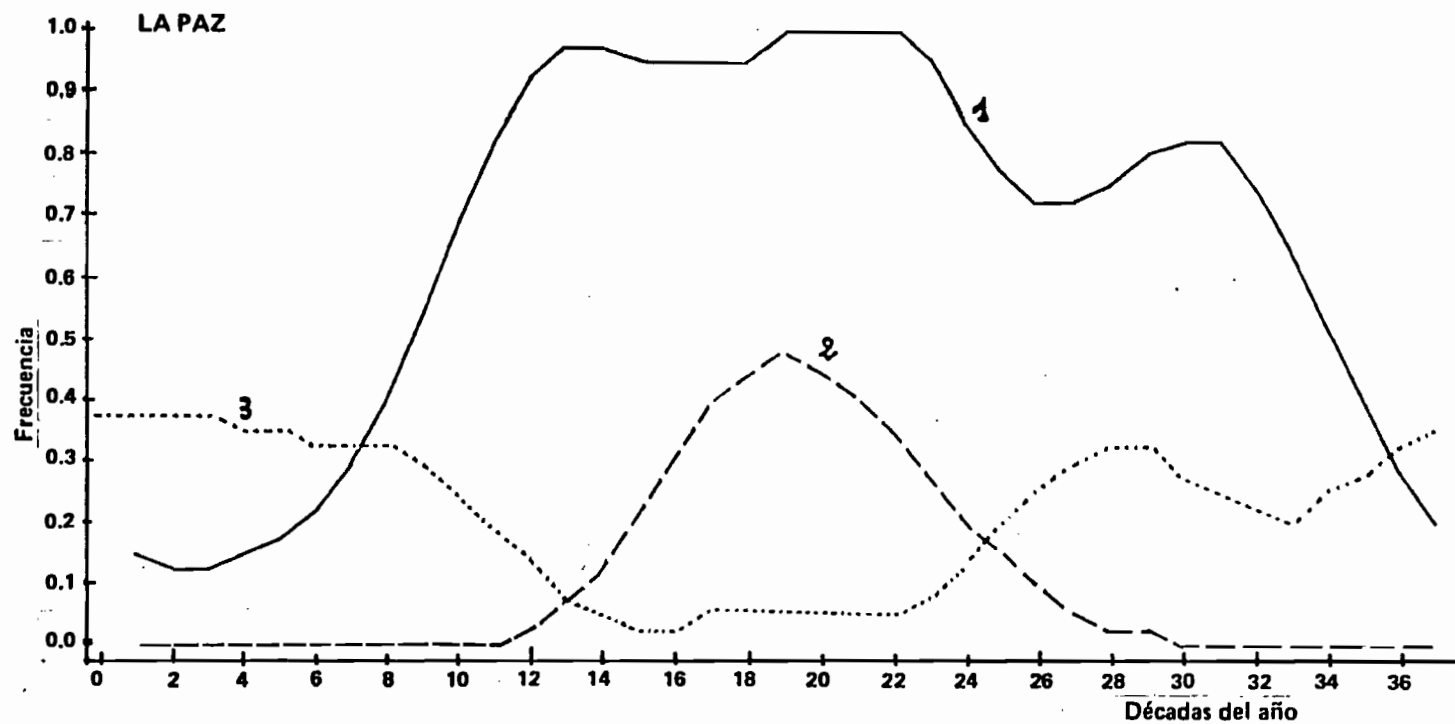


Fig. 1 Evolución a lo largo del año de la frecuencia de sequía (1), helada (2) y granizada (3), con un período elemental de análisis de 10 días.

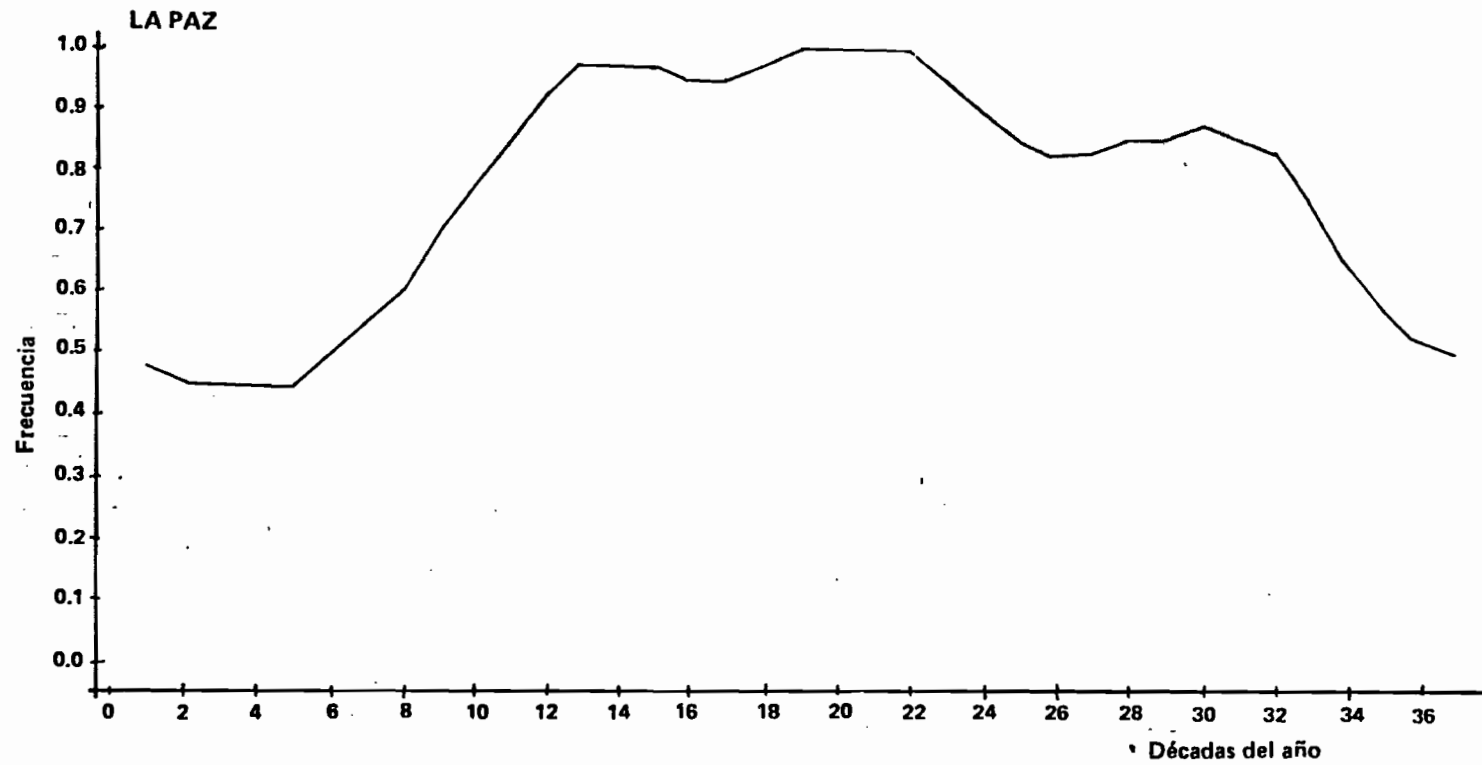


Fig. 2 Evolución a lo largo del año de la frecuencia de ocurrencia de por lo menos uno de los tres riesgos, es decir, sea una sequía, sea una helada, sea una granizada (período elemental de análisis: 10 días).

-cuántos años cada diez ocurre una sequía de 30 días?

Esta información tiene aplicaciones en numerosos problemas en relación con el desarrollo de los cultivos.

3.2 Realización de los cálculos

Para cada año de registro se toma la temperatura más baja o la sequía más larga dentro del período considerado (un sólo valor por año). Estas temperaturas o duraciones de sequía constituyen una muestra de valores extremos a partir de la cual se determina la frecuencia del evento considerado.

La frecuencia empírica se calcula directamente a partir de la muestra. Se puede ajustar una ley de Gumbel (o ley de los valores extremos) y calcular una probabilidad teórica:

La función de repartición de esta ley se escribe:

$$F(x) = \frac{1 - S}{2} + S \cdot e^{-e^{-u}}$$

$$u = \frac{x - x_0}{s}$$

x_0 es el parámetro de posición (modo)

s es el parámetro de escala

$S = 1$ con el signo de s

Se estiman los parámetros con el método de los momentos (Brunet - Moret, 1969).

$$s^2 = (0,780)^2 \cdot \frac{1}{n-1} (S_2 - \frac{1}{n} \cdot S_1^2)$$

$$x_0 = \frac{1}{n} \cdot S_1 - s \cdot 0,5772$$

s tiene el mismo signo que $K_3 = S_3 - \frac{3}{n} \cdot S_2 \cdot S_1 + \frac{2}{n^2} \cdot S_1^3$

n es el número de elementos de la muestra

$$S_1 = \sum_i x_i, S_2 = \sum_i x_i^2, S_3 = \sum_i x_i^3$$

Pero a veces la ley de Gumbel no se ajusta a la muestra considerada. En este caso hay que utilizar la frecuencia empírica.

3.3 Ejemplo de la estación de La Paz

Las muestras de los valores extremos de temperatura mínima y duraciones de sequía para la estación de La Paz son las siguientes (todo el año es tomado en cuenta):

AÑO	HELADA EXTREMA (°C)	AÑO	SEQUIA EXTREMA (días)
45	1,0	54	70
46	-6,0	55	35
54	-2,0	56	77
57	-2,3	57	45
58	-1,0	58	62
60	-2,8	59	138
61	-6,1	60	86
62	-2,2	61	48
63	0,0	62	48
64	0,5	63	79
65	0,3	64	56
66	-1,7	65	67
67	0,0	66	70
68	-0,5	67	33
69	1,8	68	45
70	0,5	69	42
71	-0,7	70	51
72	-1,8	71	44
73	-2,6	72	57
74	-0,5	73	40
			/...

Continuación...

75	-2,8	74	40
76	-2,0	75	64
77	-2,0	76	29
78	0,0	77	26
79	-1,0	78	57
80	0,6	79	58
81	-2,1	80	44
		81	76

En el cuadro siguiente se presentan las frecuencias en que la temperatura alcance valores abajo de 0°C, -5°C y -10°C, y que la duración de sequía alcance valores encima de 50 días, 75 días y 100 días, en el transcurso del año.

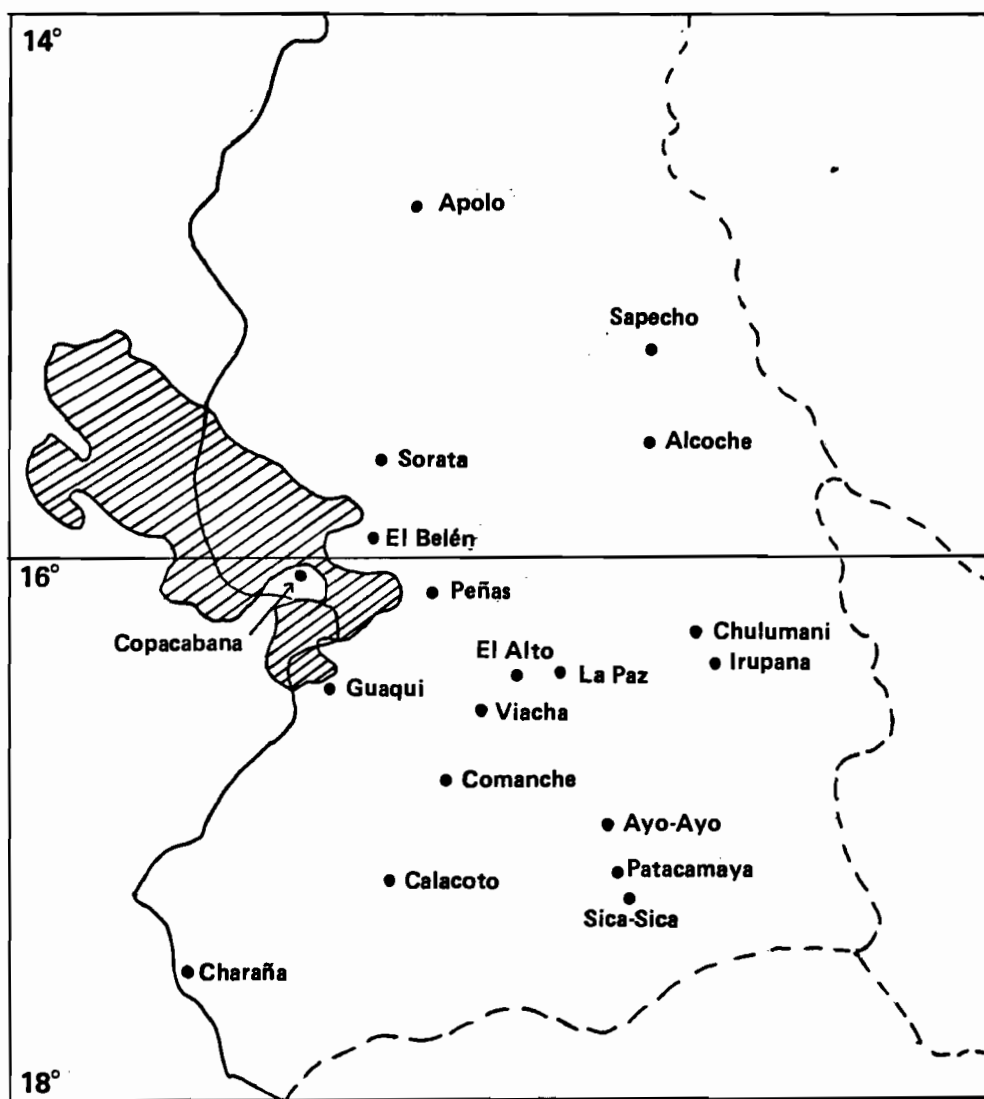
<u>(°C)</u>	<u>HELADA</u>	<u>SEQUIA</u>	<u>(DIAS)</u>
0	0,74	0,54	50
-5	0,07	0,18	75
-10	0,00	0,04	100

CAPITULO II - RESULTADOS

1. Los datos básicos

Los datos básicos son constituídos por los valores diarios de la lluvia, de la temperatura mínima y por la indicación de la ocurrencia de granizada. Se tomaron en cuenta 12 estaciones. Ocho están situadas en el altiplano o en los valles: Copacabana, Charaña, El Alto, El Belén, La Paz, Patacamaya, Peñas y Sorata. Cuatro están en los yungas o los llanos: Alcoche, Apolo, Chulumani y Sapecho. El mapa adjunto (Figura 3) muestra la ubicación de las estaciones. Cada una tiene al menos 15 años de registro (Cuadro 1). Todos los datos básicos fueron suministrados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia (SENAMHI). Los resultados deben ser considerados dentro de los límites de confiabilidad de estos datos básicos.

Fig. 3 Mapa del departamento de La Paz con la ubicación de las estaciones meteorológicas.



DEPARTAMENTO DE LA PAZ
ESTACIONES METEOROLOGICAS

DEPARTAMENTO DE LA PAZ

NOMBRE	ALTITUD (m)	LLUVIA (años)	TEMPERATURA (años)	GRANIZADA (años)
Alcoche	500	16	16	16
Apolo	1.383	37	31	37
Copacabana	4.018	27	22	27
Charaña	4.057	31	25	31
Chulumani	1.811	19	21	19
El Alto	4.071	20	18	20
El Belén	3.820	24	19	24
La Paz	3.632	28	27	28
Patacamaya	3.789	22	24	22
Peñas	3.986	30	23	30
Sapecho	395	16	16	16
Sorata	2.647	18	14	18

CUADRO N°1 Listado de las estaciones meteorológicas con indicación de la altitud y del número de años de registro de la lluvia, de la temperatura y de la granizada

2. Repartición de los riesgos a lo largo del año

2.1 Estaciones del altiplano y de los valles

Presentamos en las figuras 4 a 11 los resultados para las 8 estaciones del altiplano. La parte "a" muestra la evolución de la frecuencia de ocurrencia a lo largo del año, de los tres riesgos considerados (sequía, helada, granizada). El período elemental de análisis es de 10 días. Las curvas representan ajustes de series de Fourier que suavizan las irregularidades de las curvas empíricas. La parte "b" muestra la evolución de la frecuencia de ocurrencia de al menos uno de los tres riesgos con el mismo período elemental de análisis.

2.2 Estaciones de los yungas y de los llanos

Para las 4 estaciones ubicadas en los yungas o los llanos, no existen los riesgos de helada y granizada. Presentamos solamente la frecuencia de ocurrencia de sequía (figuras 12 a 15).

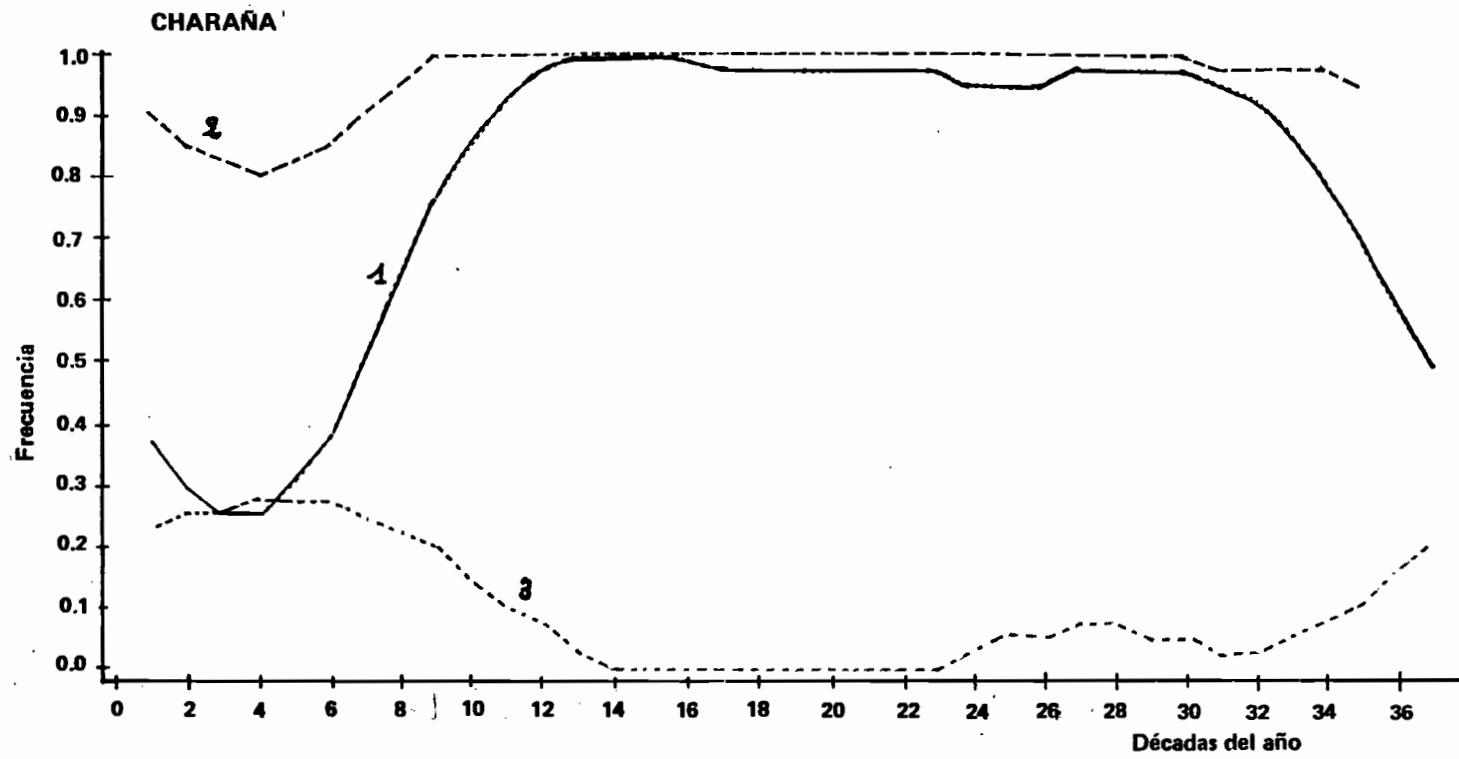


Fig. 4 a Evolución a lo largo del año de la frecuencia de sequía (1), helada (2) y granizada (3), con un período elemental de análisis de 10 días.

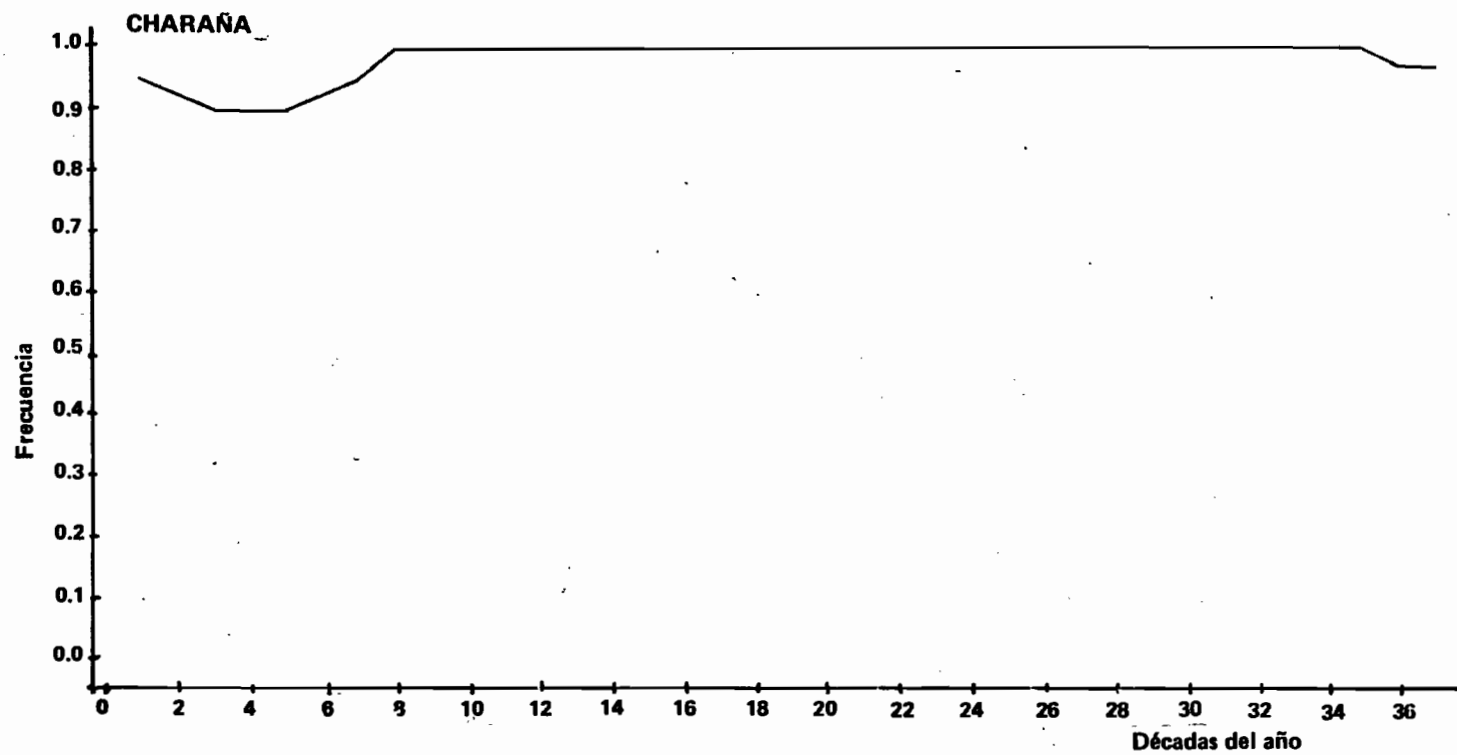


Fig.4 b Evolución a lo largo del año de la frecuencia de ocurrencia de por lo menos uno de los tres riesgos, es decir, sea una sequía, sea una helada o sea una granizada. (período elemental de análisis: 10 días).

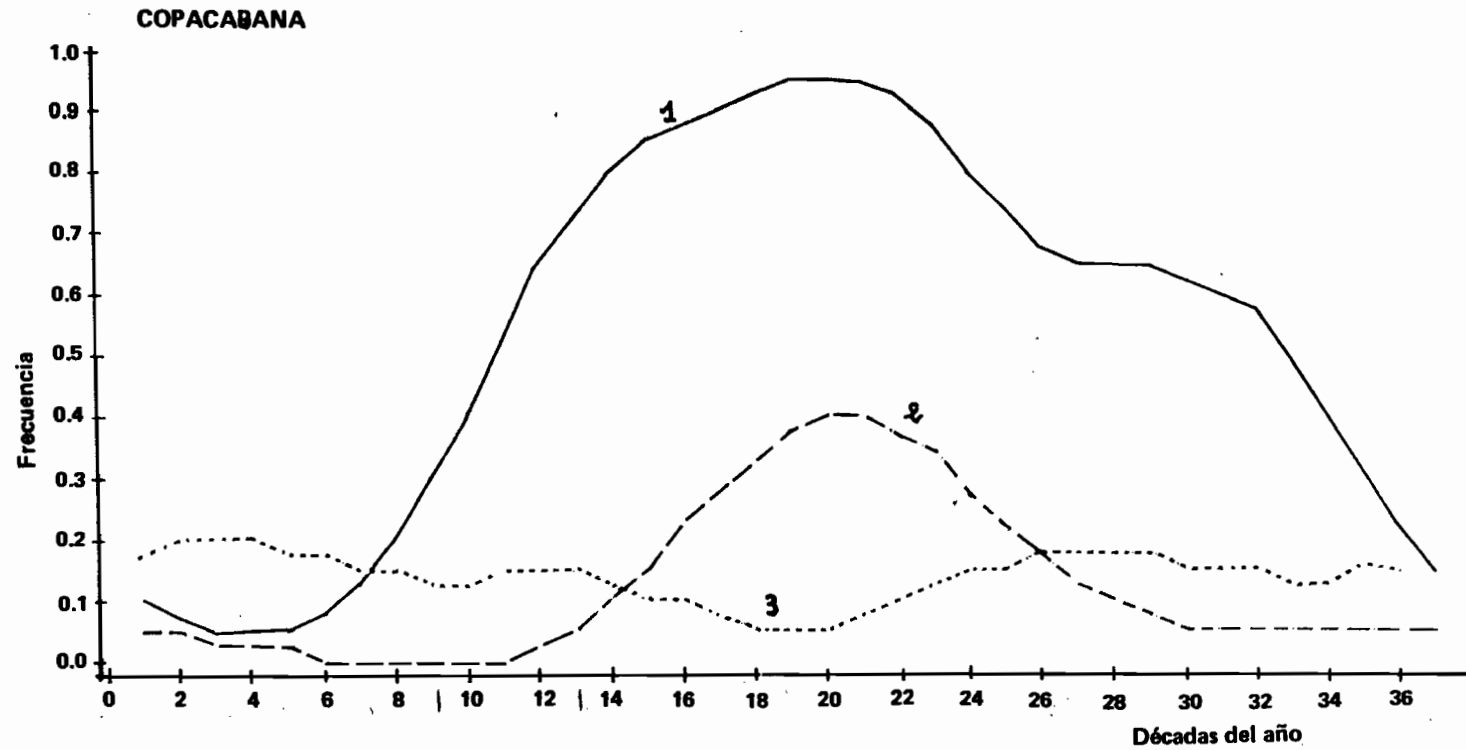


Fig. 5 a Evolución a lo largo del año de la frecuencia de sequía (1), helada (2) y granizada (3) con un período elemental de análisis de 10 días.

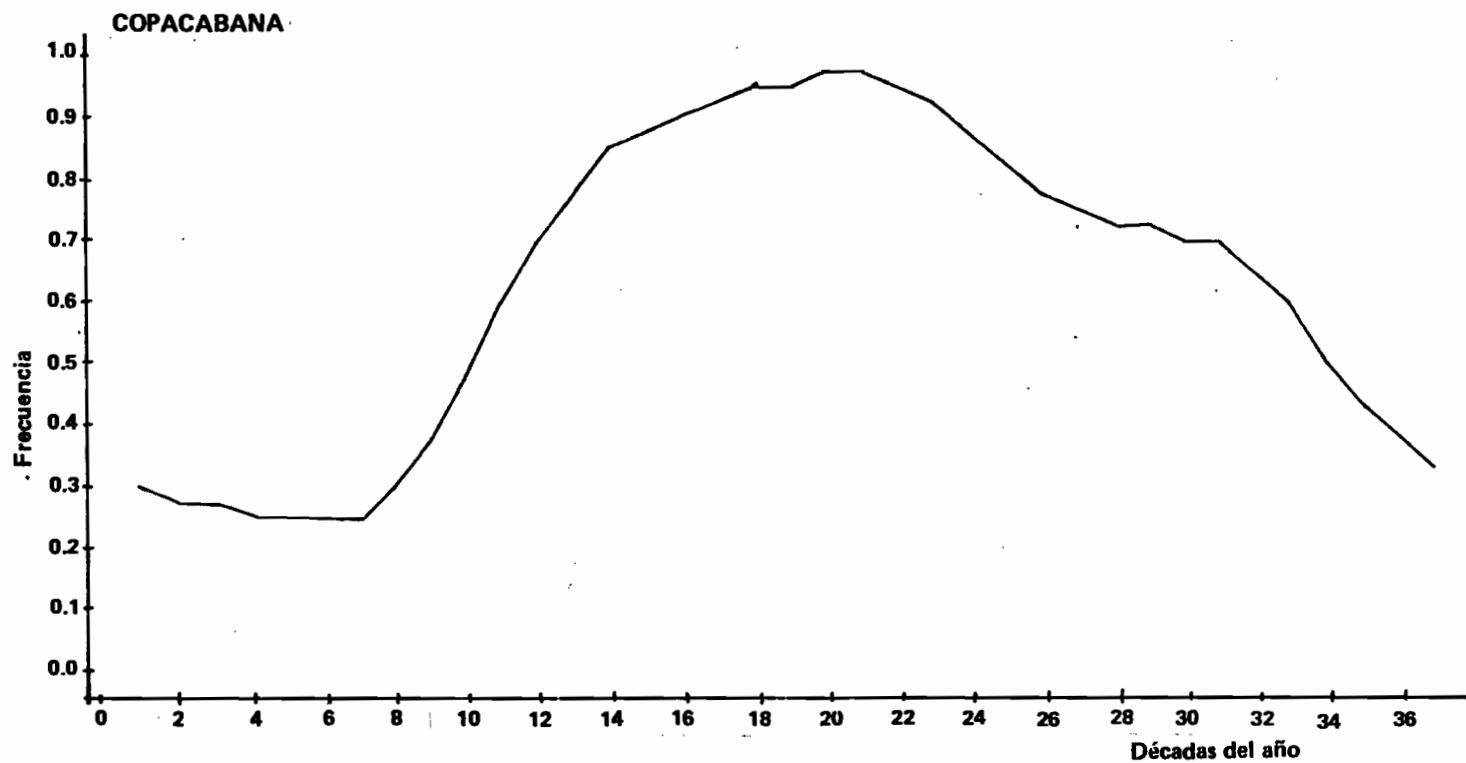


Fig. 5 b Evolución a lo largo del año de la frecuencia de ocurrencia de por lo menos uno de los tres riesgos, es decir, sea una sequía, sea una helada, sea una granizada (período elemental de análisis: 10 días).

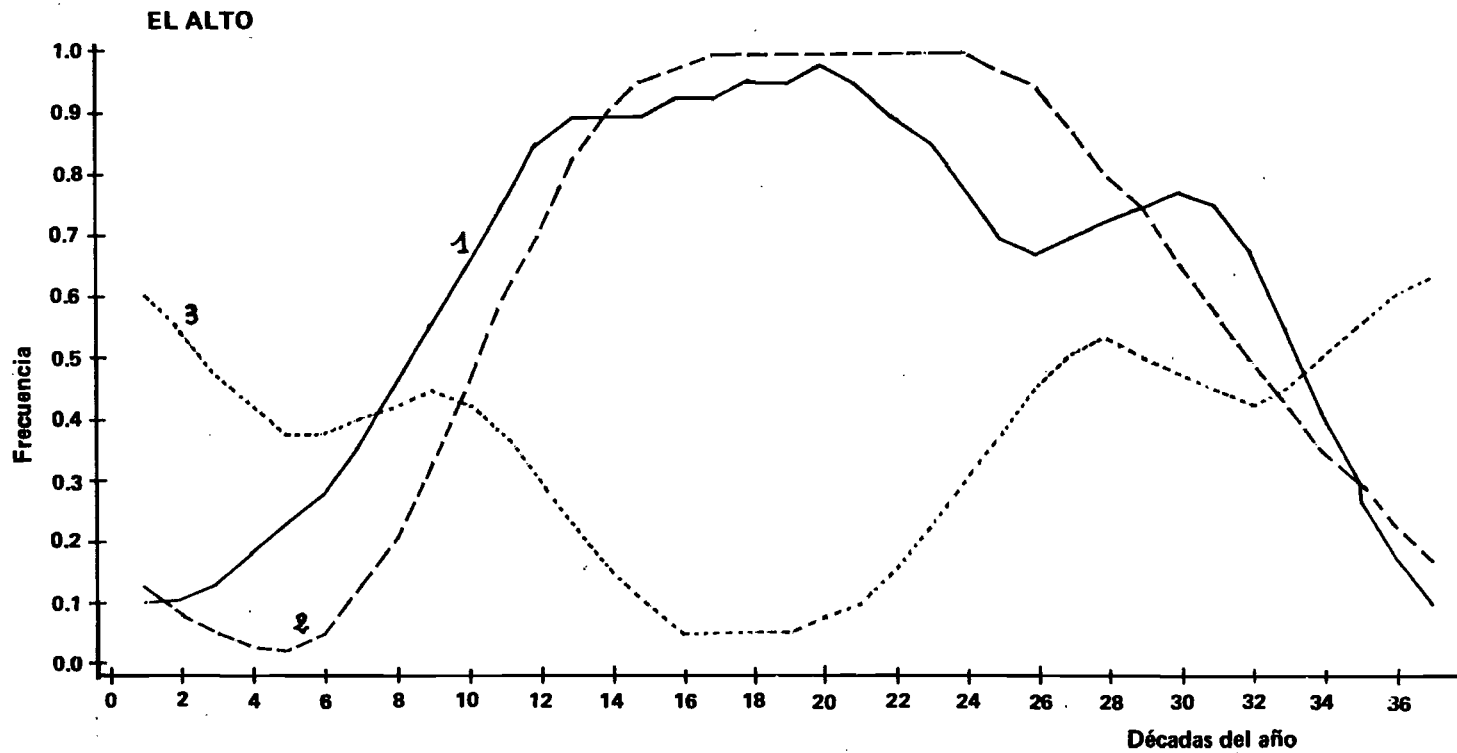


Fig. 6 a Evolución a lo largo del año de la frecuencia de sequía (1), helada (2) y granizada (3), con un período elemental de 10 días.

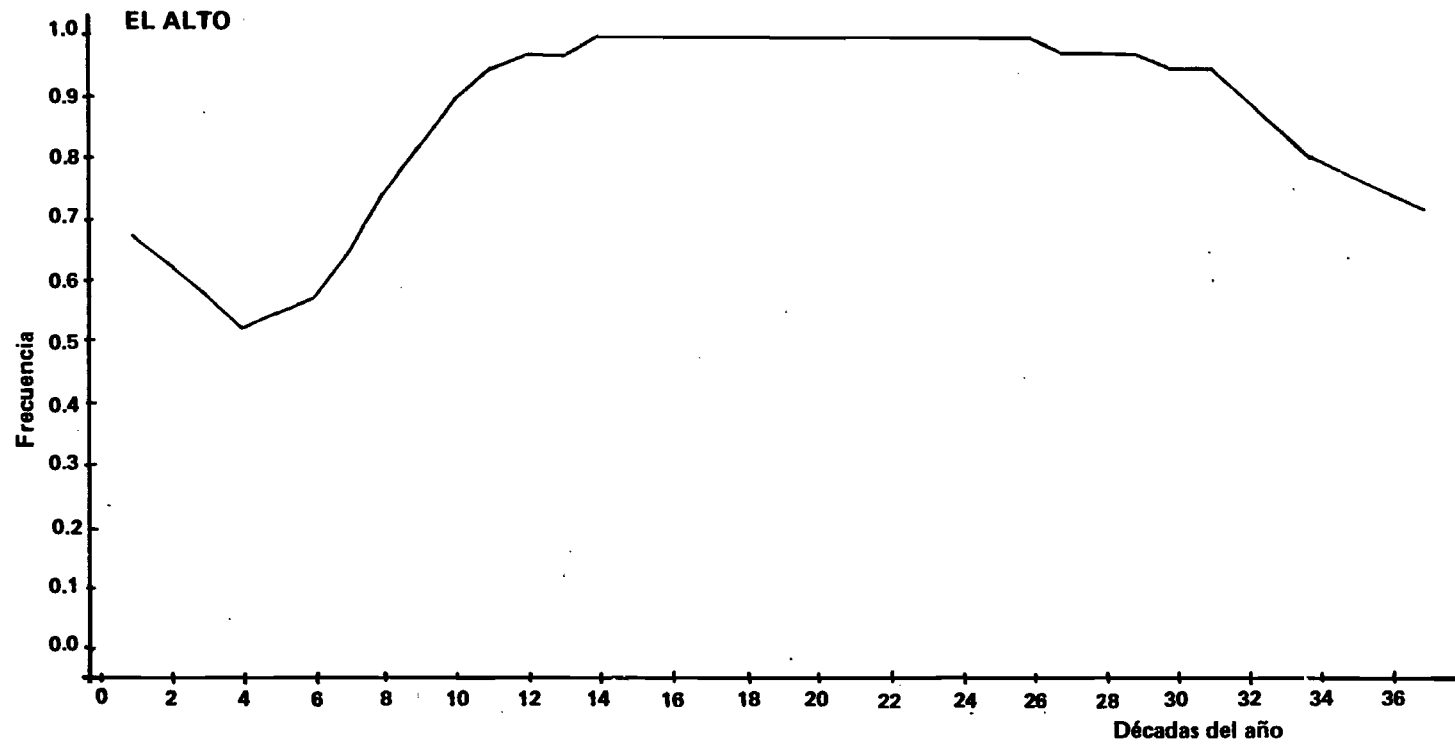


Fig. 6 b Evolución a lo largo del año de la frecuencia de ocurrencia de por lo menos uno de los tres riesgos, es decir, sea una sequía, sea una helada, sea una granizada (período elemental de análisis: 10 días).

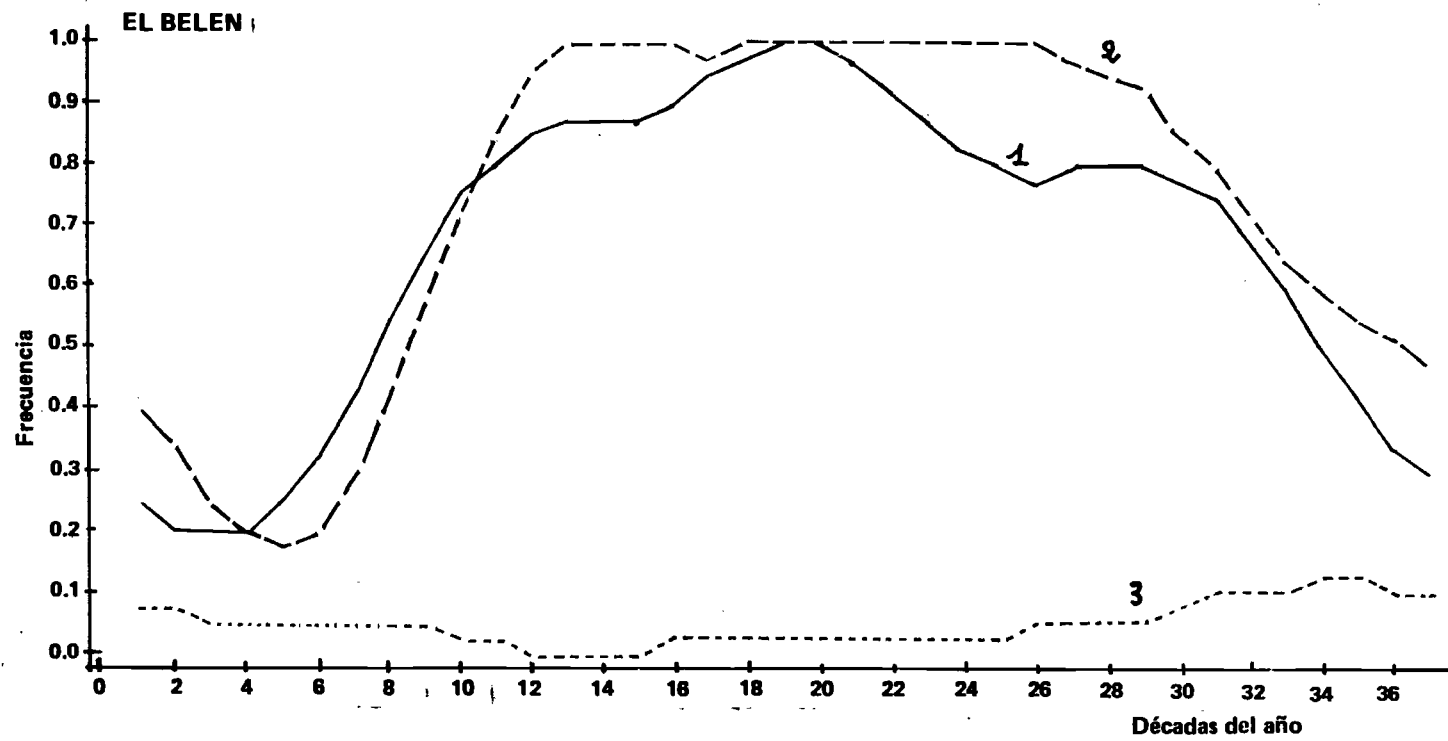


Fig. 7 a Evolución a lo largo del año de la frecuencia de sequía (1), helada (2) y granizada (3), con un período elemental de análisis de 10 días.

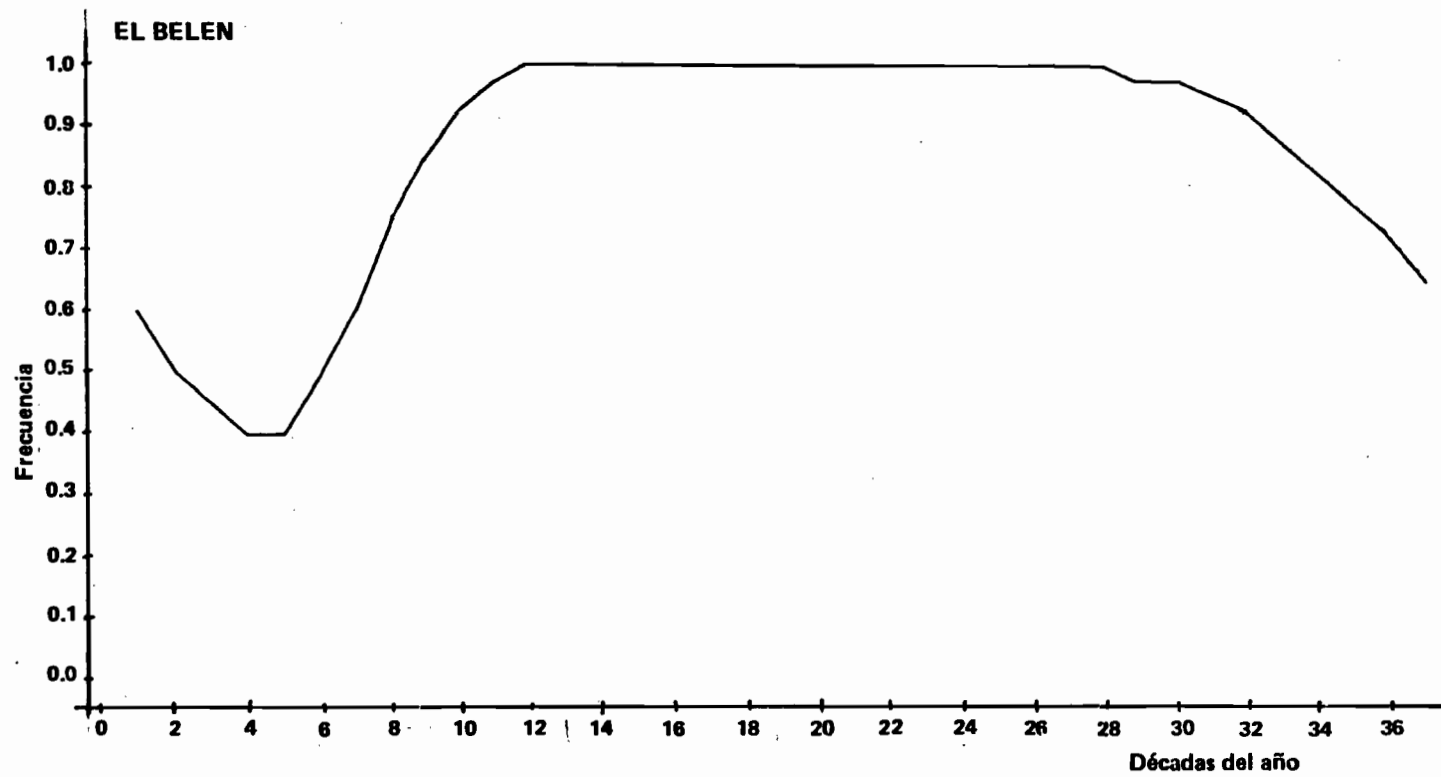


Fig. 7 b Evolución a lo largo del año de la frecuencia de ocurrencia de por lo menos uno de los tres riesgos, es decir, sea una sequía, sea una helada, sea una granizada (período elemental de análisis: 10 días).

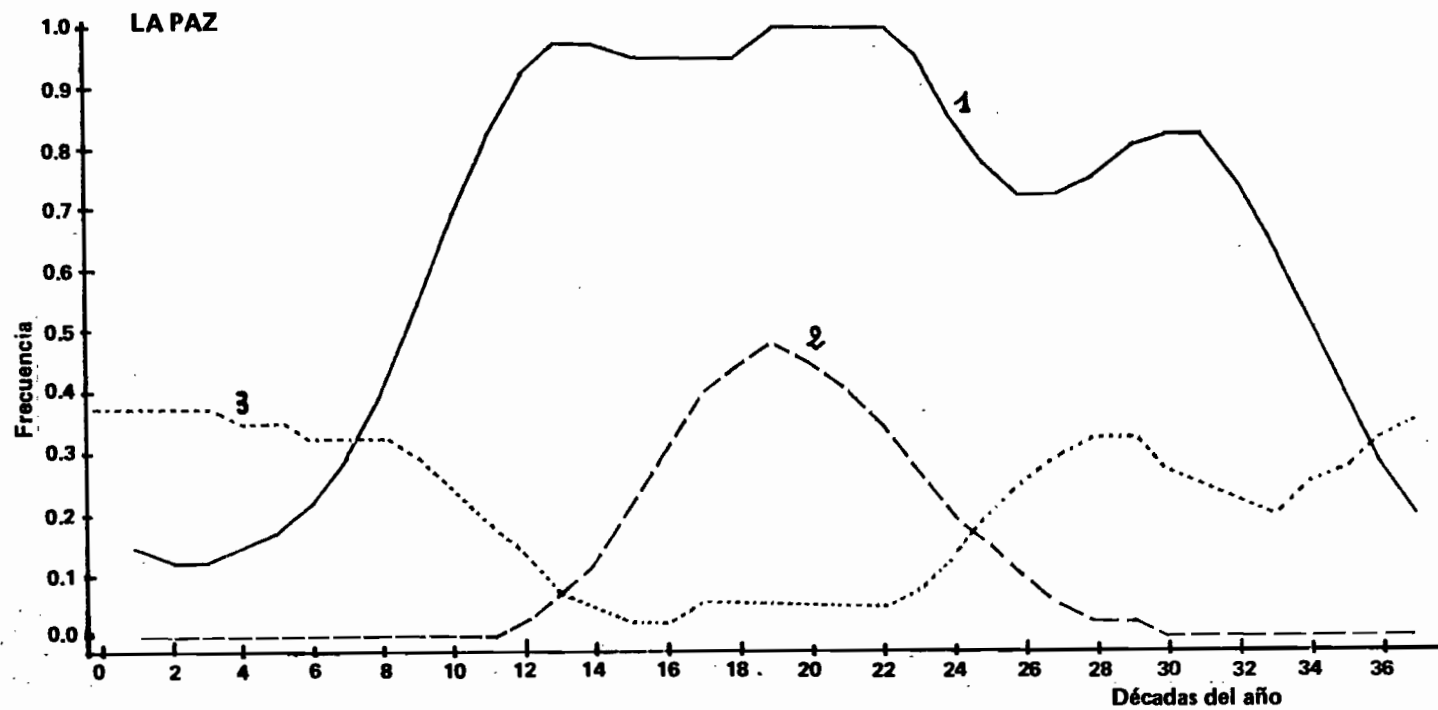


Fig. 8 a Evolución a lo largo del año de la frecuencia de sequía (1), helada (2) y granizada (3), con un período elemental de análisis de 10 días.

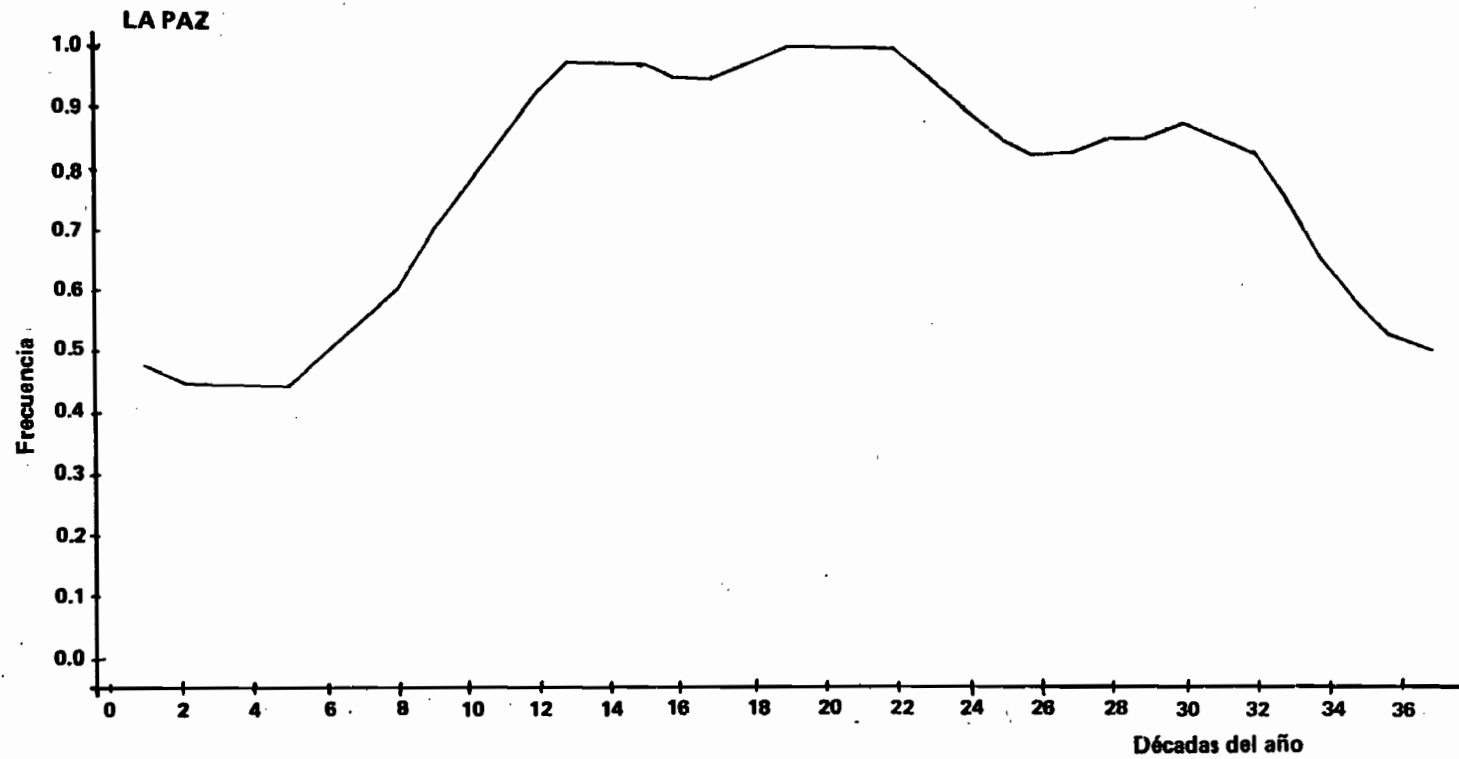


Fig. 8 b Evolución a lo largo del año de la frecuencia de ocurrencia de por lo menos uno de los tres riesgos, es decir, sea una sequía, sea una helada, sea una granizada (período elemental de análisis: 10 días).

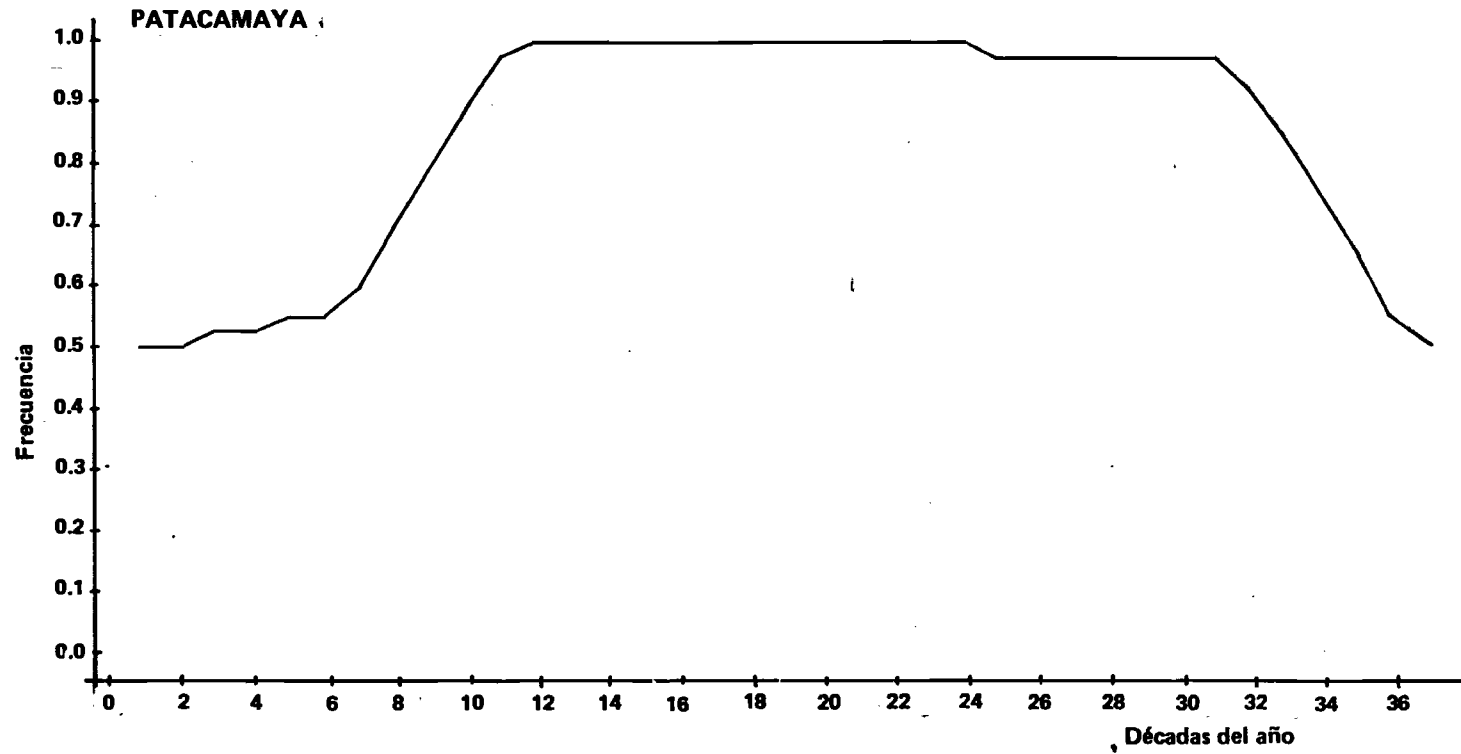


Fig.9 b Evolución a lo largo del año de la frecuencia de ocurrencia de por lo menos uno de los tres riesgos, es decir, sea una sequía, sea una helada, sea una granizada (período elemental de análisis: 10 días).

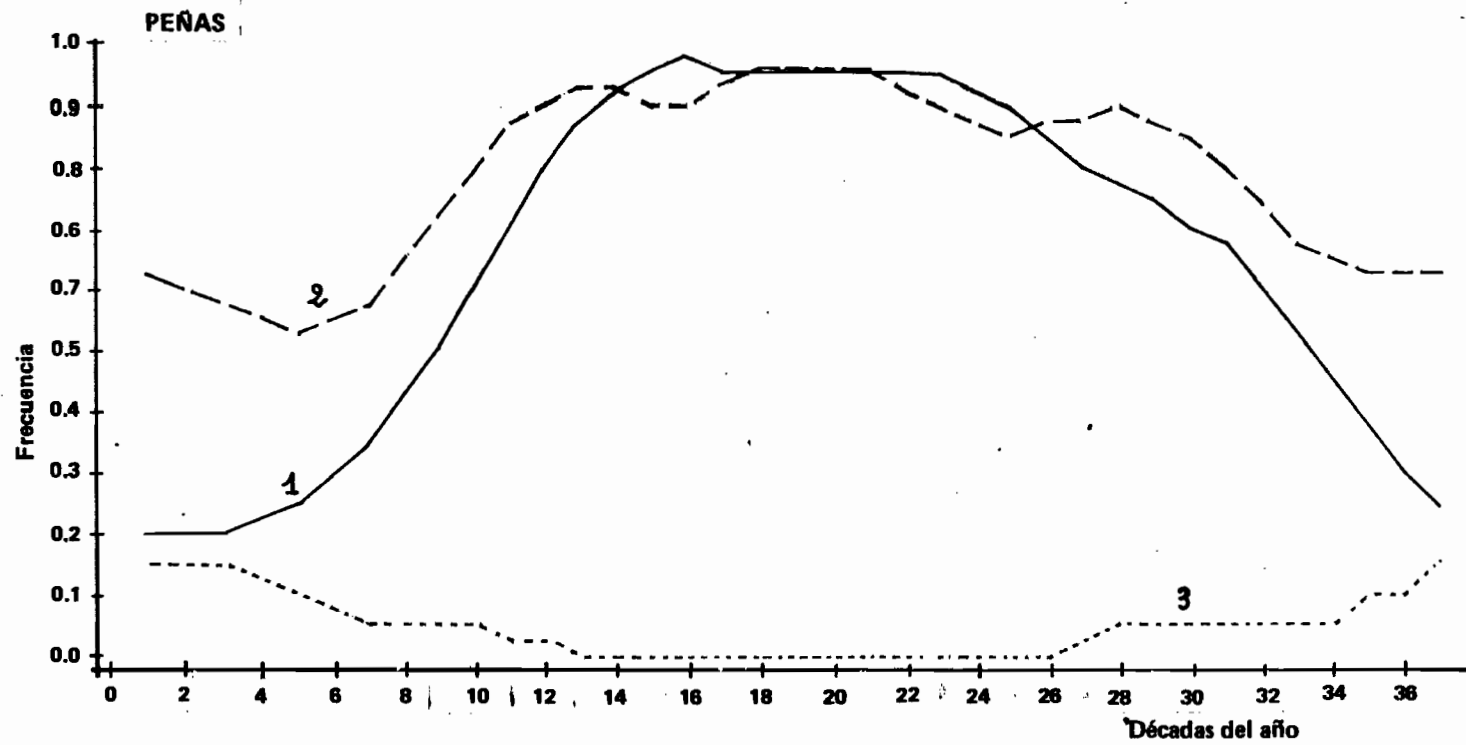


Fig.10a Evolución a lo largo del año de la frecuencia de sequía (1), helada (2) y granizada (3), con un período elemental de análisis de 10 días.

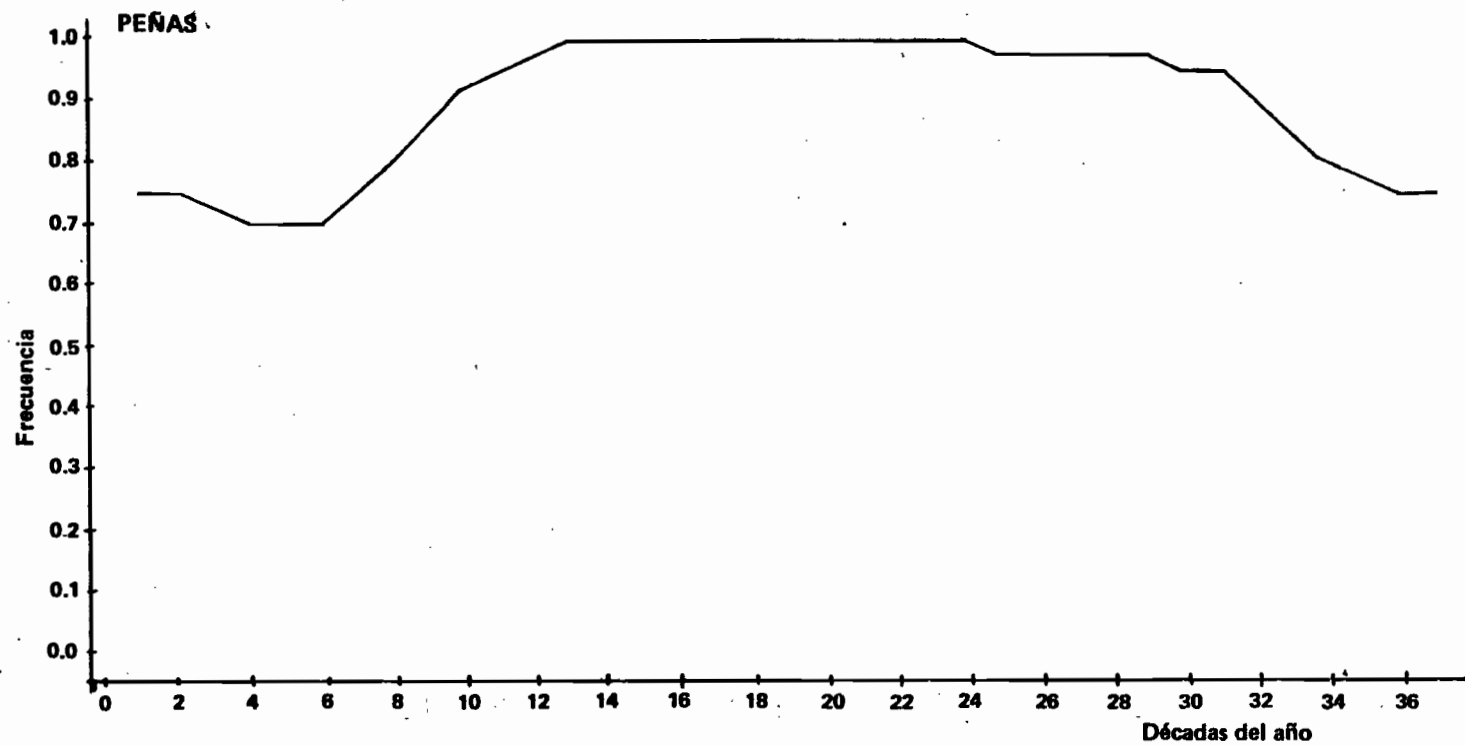


Fig.10b Evolución a lo largo del año de la frecuencia de ocurrencia de por lo menos uno de los tres riesgos, es decir, sea una sequía, sea una helada, sea una granizada (período elemental de análisis: 10 días).

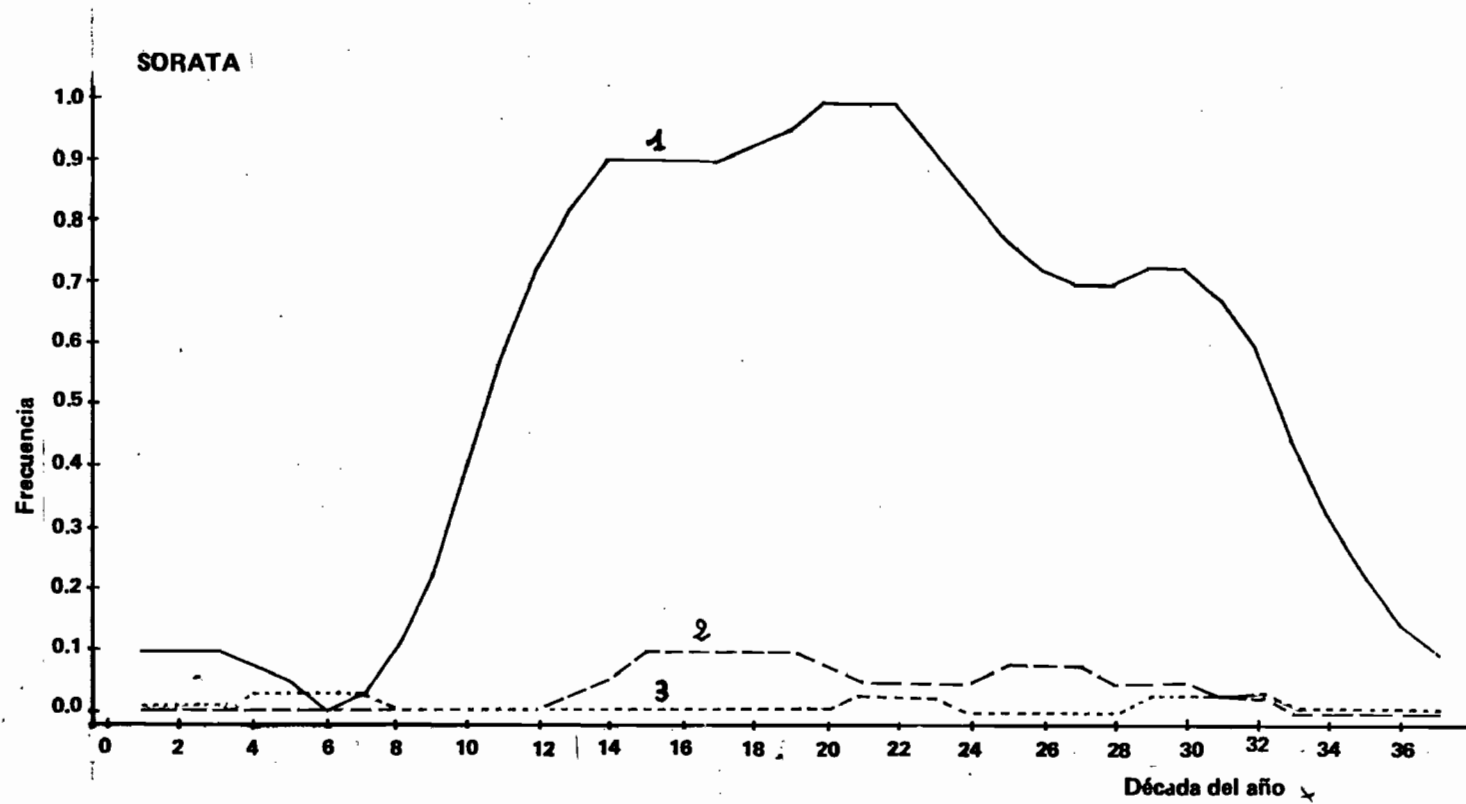


Fig.11a Evolución a lo largo del año de la frecuencia de sequía (1), helada (2) y granizada (3), con un período elemental de análisis de 10 días:

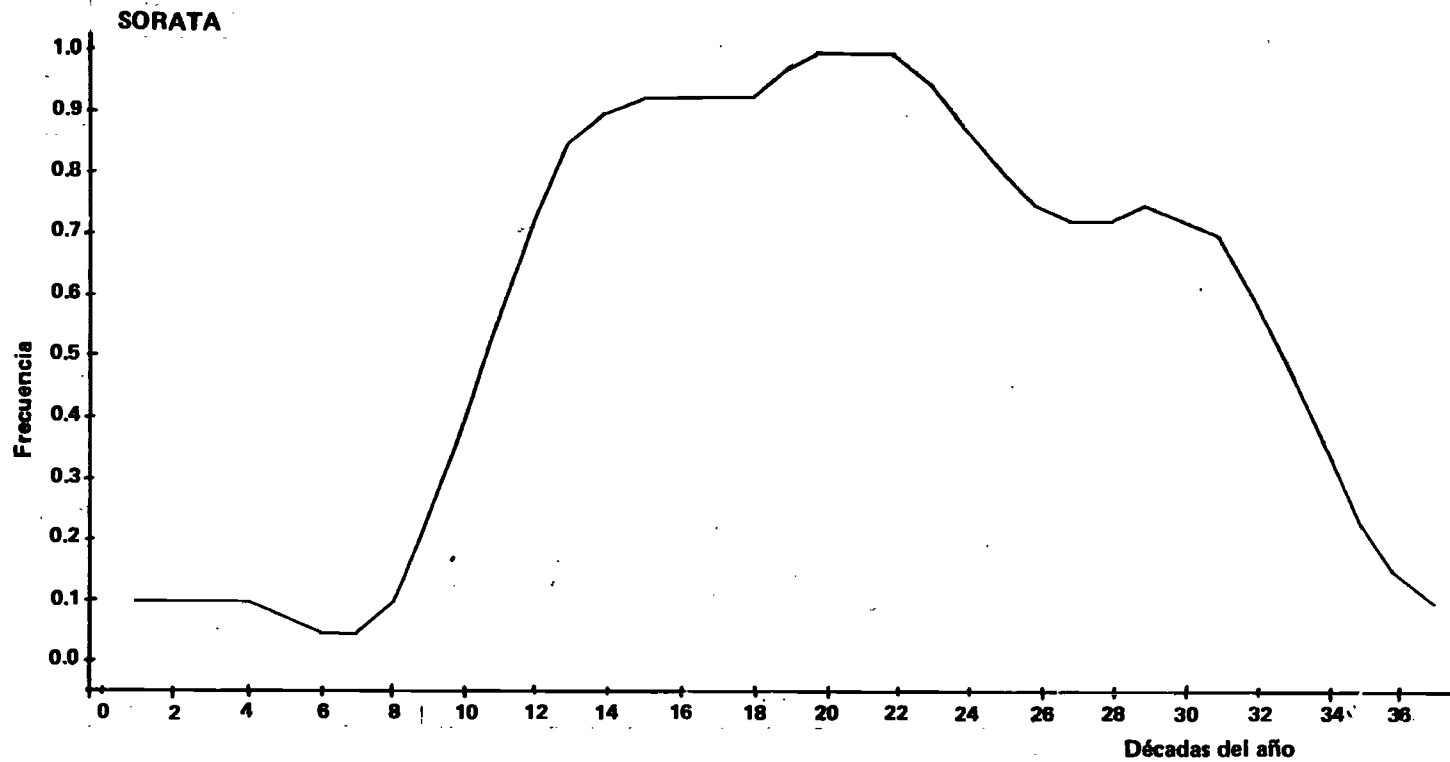


Fig. 11b Evolución a lo largo del año de la frecuencia de ocurrencia de por lo menos uno de los tres riesgos, es decir, sea una sequía, sea una helada, sea una granizada (período elemental de análisis: 10 días).

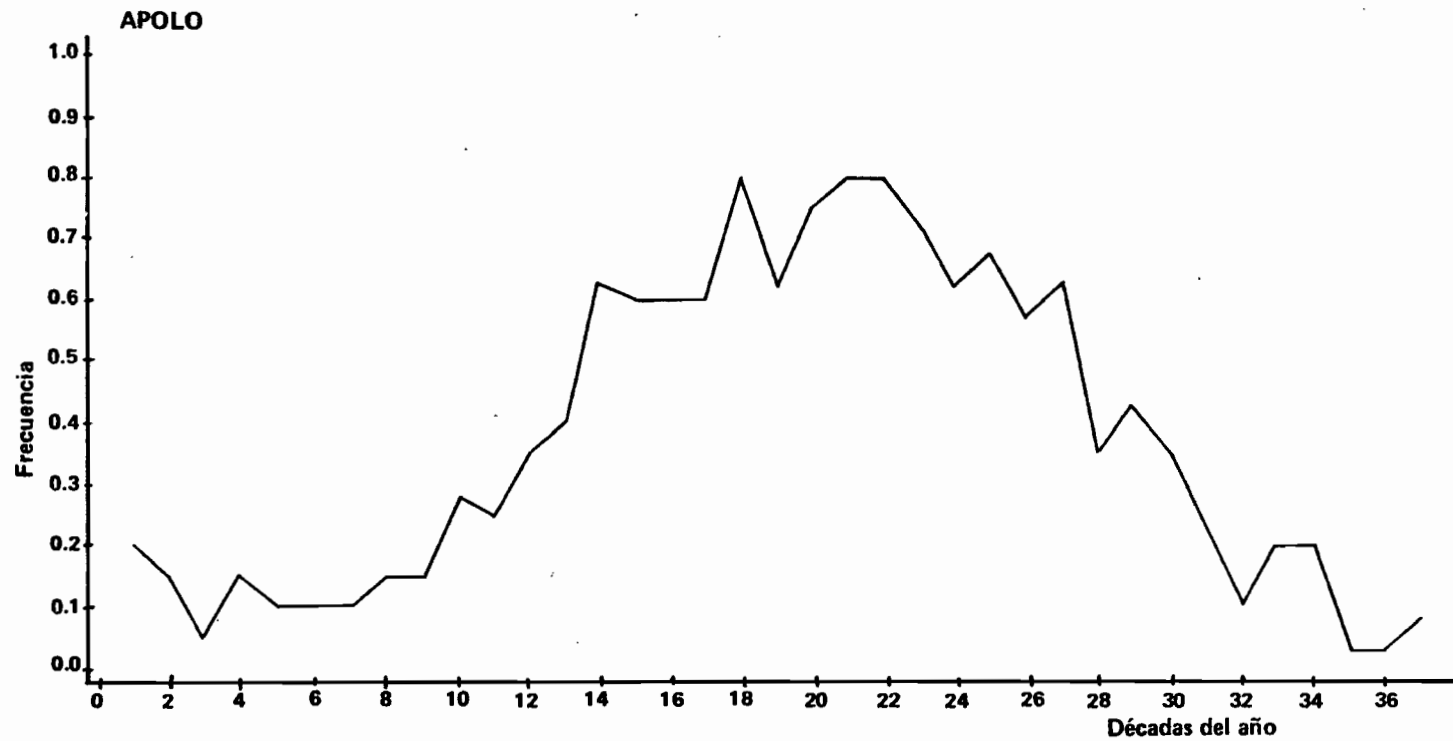


Fig. 12 Evolución a lo largo del año de la frecuencia de sequía con un período elemental de análisis de 10 días y sin ajuste a una serie de Fourier (los riesgos de helada y granizada no existen para esta estación).

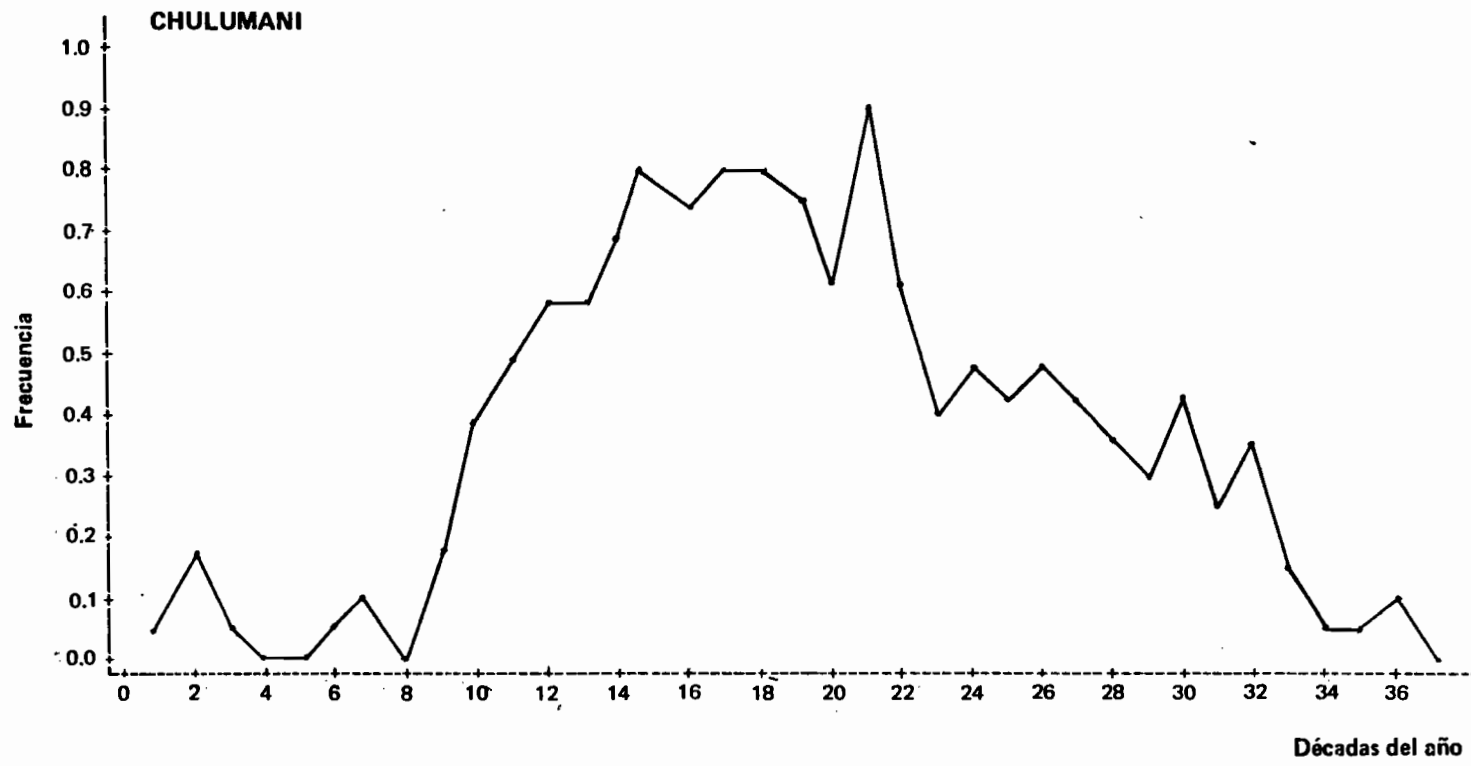


Fig.14 Evolución a lo largo del año de la frecuencia de sequía con un período elemental de análisis de 10 días y sin ajuste a una serie de Fourier (los riesgos de helada y granizada no existen para esta estación).

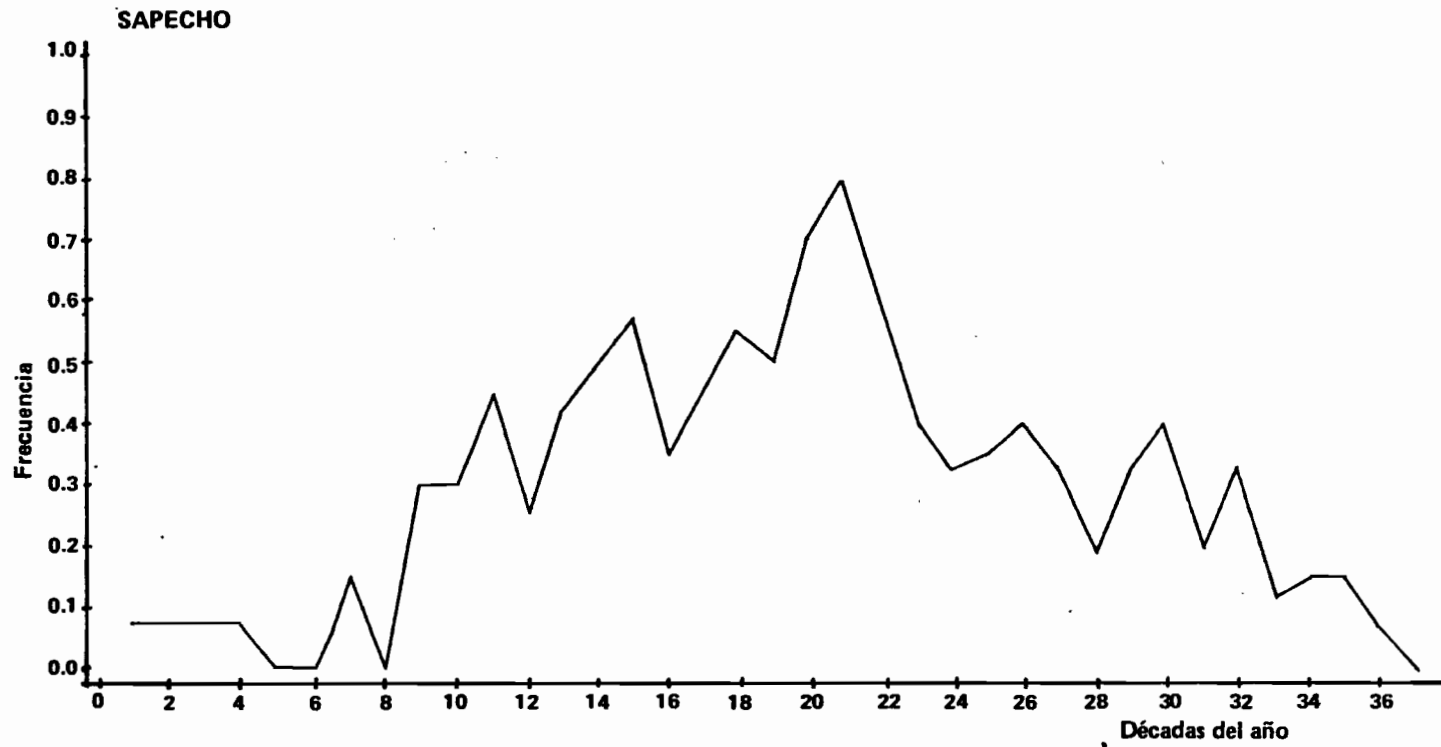


Fig. 15 Evolución a lo largo del año de la frecuencia de sequía con un período elemental de análisis de 10 días y sin ajuste a una serie de Fourier (los riesgos de helada y granizada no existen para esta estación).

3. Sequías y heladas extremas

En los cuadros 2 y 3 presentamos para las 12 estaciones consideradas, la frecuencia con la cual puede ocurrir, en el transcurso del año, una helada o una sequía de intensidad dada.

CUADRO N°2 Probabilidades de ocurrencia en el transcurso del año de períodos sin lluvia (número de días consecutivos secos) encima de ciertos umbrales

	50 días	75 días	100 días
Alcoche	0,06	0,00	0,00
Apolo	0,00	0,00	0,00
Copacabana	0,48	0,19	0,04
Charaña	1,00	0,94	0,58
Chulumani	0,26	0,00	0,00
El Alto	0,55	0,20	0,05
El Belén	0,61	0,30	0,13
La Paz	0,54	0,18	0,04
Patacamaya	0,77	0,45	0,05
Peñas	0,79	0,55	0,28
Sapecho	0,00	0,00	0,00
Sorata	0,56	0,28	0,22

CUADRO N° 3 Probabilidades de ocurrencia en el transcurso del año, de temperaturas abajo de ciertos umbrales

	0°C	-5°C	-10°C
Alcoche	0,00	0,00	0,00
Apolo	0,00	0,00	0,00
La Paz	0,75	0,04	0,00
Copacabana	0,65	0,10	0,00
Chulumani	0,00	0,00	0,00
El Alto	1,00	0,67	0,06
El Belén	1,00	1,00	0,90
Patacamaya	1,00	1,00	0,75
Sorata	0,37	0,14	0,05
Charaña	1,00	1,00	1,00
Peñas	1,00	1,00	0,57
Sapecho	0,00	0,00	0,00

CONCLUSION

Los resultados presentados permiten darse cuenta de la importancia de los diferentes riesgos para cada estación y comparar entre sí, las estaciones desde el punto de vista riesgo.

Las áreas que presentan los riesgos más grandes son el altiplano y los valles. Basándose sobre las curvas que dan el riesgo conjunto de sequía, helada y granizada para cada estación, puede establecerse cierta jerarquía de la estación más riesgosa a la menos riesgosa: Charaña, Peñas, El Alto, Patacamaya y El Belén, La Paz, Copacabana, Sorata.

A partir de estos resultados es posible contar con mejores elementos para la definición de una política agrocrediticia, ya que se podrá ajustar el monto de la prima al nivel de riesgo calculado. Esto es, las zonas con mayor riesgo tendrán un monto mayor que las zonas que se detectaron como menos riesgosas. Además, los mismos constituyen una herramienta útil en la definición de la fecha de siembra más adecuada de los cultivos anuales.

BIBLIOGRAFIA

- BRUNET-MORET, Y., 1969. Etude de quelques lois statistiques utilisées en hydrologie. Cahiers ORSTOM, série Hydrologie, VI, 3.
- PRIESTLEY, C. and TAYLOR, P.A., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. Month. Weather Rev., 100, 2.
- FRERE, M., RIJKS, J.Q. y REA, J., 1975. Estudio Agroclimatológico de la Zona Andina. Proyecto interinstitucional FAO/UNESCO/OMM en Agroclimatología. FAO, Roma.

ANEXO

CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL MEDIANTE
LA FORMULA DE PRIESTLEY-TAYLOR

Su expresión es la siguiente (Priestley y Taylor, 1972):

$$ETP = 1,26 \cdot ET_0$$

$$\text{con } ET_0 = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot (Rn + G)$$

ET_0 = evapotranspiración estándar

Rn = radiación neta

G = flujo de calor a nivel del suelo ($\approx 5\%$ de Rn)

$\Delta / (\Delta + \gamma)$ = término sin dimensión que varía con la temperatura del aire

El problema práctico consiste en estimar los términos $\Delta / (\Delta + \gamma)$ y Rn a partir de los parámetros registrados a nivel de la red meteorológica. Una fórmula de aproximación para estimar $\Delta / (\Delta + \gamma)$ en función de la temperatura es:

$$\Delta / (\Delta + \gamma) = f(t) = 0,430 + 0,012 t \quad 5^\circ < t < 30^\circ$$

Por otro lado la radiación neta diaria Rn puede estimarse a partir de la radiación global Rg , debido a que el cociente Rn/Rg es generalmente considerado como una constante para una región determinada:

$$\frac{Rn}{Rg} = c$$

La radiación global diaria Rg puede ser estimada a partir de la duración de insolación n mediante una fórmula de tipo Black:

$$\frac{Rg}{Rg_0} = a + b \cdot \frac{n}{N}$$

Rg_0 es la radiación solar al tope de la atmósfera

N es la duración del día

n es la duración de la insolación

a y b son coeficientes empíricos específicos para la región en estudio.

Los valores escogidos de los coeficientes a, b y c provienen del documento FAO/UNESCO/OMM titulado "Estudio agroclimático de la Zona Andina" (Roma, 1975):

$$a = 0,29$$

$$b = 0,42$$

$$c = 0,50$$