

**MANEJO Y USO DEL AGUA EN LAS CUENCAS
HIDROGRAFICAS DEL NORTE DE MEXICO**

CENID RASPA, ORSTOM

RIO DE NASAS

Folleto Científico N° 8
INIFAP-ORSTOM

**GEOGRAFÍA DE LAS LLUVIAS EN UNA CUENCA
DEL NORTE DE MÉXICO:
REGIONALIZACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES EN LA
REGIÓN HIDROLÓGICA 36**

Luc DESCROIX
Jean Francois NOUVELOT
Juan ESTRADA ÁVALOS

inifap
PRODUCE

CENID RASPA

ORSTOM

1997

*El Pueblo del Alamo es
fundo el cura del Pueblo de San Juan
D. Manuel del Real con algunas famil-
as de otro Pueblo en 1732. De tempera-
mento escaldadamente sensible goza de mu-
cha Agua de la q.ª está cercado por su parte
occidental tiene cerca los Salineros su At-
mosfera es opaca a causa de muchas va-
poras de la Agua y Lienegas. Sus
Abiladores son longeros algo ociosos.
Es muy fértil para granos
y muy pobre*

ISBN 968-6990-10-0

**GEOGRAFÍA DE LAS LLUVIAS EN UNA CUENCA
DEL NORTE DE MÉXICO:
REGIONALIZACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES EN LA
REGIÓN HIDROLÓGICA 36**

Luc DESCROIX
Jean François NOUVELOT

(Investigadores de ORSTOM)

Juan ESTRADA AVALOS

(Investigador de CENID RASPA)

PROYECTO INIFAP - ORSTOM

**Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación
Agua-Suelo-Planta-Atmósfera**

FOLLETO CIENTÍFICO N°8
(INIFAP-ORSTOM)
ISBN 968 - 6990 - 10 - 0
IMPRESO Y HECHO EN MEXICO
CENID-RASPA
km 6.5 margen derecha Canal Sacramento
Gómez Palacio, Dgo.
Apdo. Postal 41
35150 Cd. Lerdo, Durango. MEXICO
Tels. 01 (17) 19-10-76
Fax 19-11-34

COMITE EDITORIAL

| | |
|-------------|---|
| Presidente: | Dr. Ignacio Sánchez Cohen |
| Secretario: | Ing. Raquel Anguiano Gallegos |
| Vocales: | Dr. José Luis González Barrios M.C. Miguel Rivera González |

CONTENIDO

| | Página |
|---|--------|
| PRESENTACIÓN | 1 |
| RESUMEN | 2 |
| RESUME | 2 |
| ABSTRACT | 3 |
| INTRODUCCIÓN | 4 |
| 1. DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LAS PRECIPITACIONES | 6 |
| 1.1. Repartición de las precipitaciones en el espacio de la RH 36 | 6 |
| La circulación zonal y los factores azonales | 6 |
| 1.1.1. Introducción para una regionalización de las precipitaciones | 8 |
| 1.1.2. Definición de un vector regional | 9 |
| 1.2. El régimen y la evolución temporal de las precipitaciones | 13 |
| 1.2.1. El régimen pluviométrico | 13 |
| 1.2.2. Las precipitaciones diarias y extremas | 14 |
| 1.2.3. Las variaciones de la pluviometría al nivel anual | 17 |
| 1.2.4. Evolución en los 50 últimos años | 19 |
| 2. LOS FACTORES GEOGRÁFICOS DE LAS PRECIPITACIONES | 22 |
| 2.1. Los factores regionales | 22 |
| 2.1.1. La importancia del gradiente altitudinal | 22 |
| 2.2. Los factores locales de las precipitaciones | 25 |
| CONCLUSION | 30 |
| LITERATURA CONSULTADA | 31 |
| ANEXOS | 33 |

INDICE DE FIGURAS

| | Página |
|--|---------------|
| 1. Ubicación de la RH36. | 4 |
| 2. Esquema sintético de la RH36. | 5 |
| 3. La circulación zonal en verano y en invierno. | 7 |
| 4. Las cuatro regiones pluviométricas definidas por análisis de componentes principales (ACP). | 9 |
| 5. Las 3 grandes regiones geoclimáticas. | 10 |
| 6. Mapa de las regiones determinadas por el MVR. | 11 |
| 7. Mapa de isoyetas de la RH36. | 12 |
| 8. Ejemplo de estaciones de los dos sub regimenes pluviométricos determinados por clasificación ascendente jerárquica. | 15 |
| 9. Valores decenales de la precipitación máxima en 24 horas. | 16 |
| 10. Valores decenales de la precipitación total anual. | 18 |
| 11. Mapa de los coeficientes de variación interanual de la pluviometría. | 18 |
| 12 a 15. Evolución temporal de los vectores regionales. | 21 |
| 16. El relieve de la RH36 y alrededores. | 24 |
| 17. El espacio de las variables del AFC. | 27 |
| 18. Tipos de exposición de las vertientes de la Sierra Madre. | 28 |
| 19. Gradiente altitudinal pluviométrico y exposición. | 29 |

INDICE DE CUADROS

| | Página |
|--|---------------|
| 1. Distribución mensual de las precipitaciones en la cuenca del Nazas (en porcentaje del total anual). | 14 |
| 2. Pluviometrías diarias de frecuencia decenal en diferentes regiones áridas. | 16 |
| 3. Intensidad de las lluvias de frecuencia decenal en diferentes regiones áridas para 400 mm de precipitación anual (en mm/h). | 17 |
| 4. Coeficiente de variación de las precipitaciones anuales de diferentes regiones áridas. | 19 |
| 5. Matriz de correlación de las variables. | 23 |
| 6. Correlaciones entre variables y componentes principales. | 25 |
| 7. Las variables del AFC. | 26 |

PRESENTACIÓN

El mejor conocimiento de la pluviometría de la Región Hidrológica 36 (RH 36) es una condición preliminar para estudiar el balance del agua en esta cuenca endorreica ubicada en zonas áridas y semiáridas. Este análisis de las precipitaciones en dicha región fue iniciado en 1992 con los datos existentes, acopiados por la red de CONAGUA.

A lo largo de estos años se completó la base de datos y se siguieron examinando.

Sin embargo, el estudio y el análisis de los datos pluviométricos por el método del vector regional dio oportunidad de intentar una regionalización de la pluviometría de la cuenca de los ríos Nazas y Aguanaval y sus alrededores.

El trabajo aquí presentado sintetiza la repartición regional de las lluvias y permite conocer el clima y sus componentes regionales, así como los factores de distribución espacial de las precipitaciones. Se exponen diferentes métodos de clasificación de los datos pluviométricos y se comparan los resultados con los del método del vector regional.

Las metodologías empleadas se pueden utilizar en todas las partes en las que se desee conocer las variables explicativas de los elementos climáticos. Aquí se pudieron evidenciar el papel de la altitud, la distancia al océano, la exposición, la vegetación, etc.

Ya que la disponibilidad de agua es el problema principal de las actividades socio-económicas, esta regionalización permite prever las ocurrencias de sequías, de años lluviosos, y conocer las causas de la evolución espacial y temporal de las precipitaciones, introduciendo una información suplementaria en la base de datos regionales.

Luc Descroix
Hidrólogo de ORSTOM

RESUMEN

El análisis estadístico de las series pluviométricas de 200 estaciones de la Región Hidrológica 36 se hizo mediante métodos de clasificación tales como el análisis de componentes principales (ACP), el análisis factorial de correspondencias (AFC), la clasificación ascendente jerárquica (CAJ), y un método propuesto por hidrólogos de ORSTOM, el MVR, Método del vector Regional; este método de análisis de los datos pluviométricos está basado en la hipótesis de pseudo-proporcionalidad de los datos pluviométricos entre estaciones vecinas, y la existencia de fallas o aberraciones en esta hipótesis permite detectar los errores siempre existentes en bases de datos.

Se describen las metodologías que permiten hacer estas regionalizaciones así como las regiones climáticas que permitió determinar cada método. Se confirmó la existencia de tres subregiones de clima diferente de la RH 36 y los elementos explicativos de esta repartición, el papel del gradiente altitudinal, de la ubicación de la región en el centro del continente americano, la continentalidad inducida por la presencia de las dos Sierras Madres. Se confirma la importancia de la Sierra Madre Occidental como región abastecedora de agua para todo el noroeste de México.

Por otra parte, el estudio de las series pluviométricas dio oportunidad de conocer la evolución del clima desde hace más de medio siglo. Así se determinan periodos de sequías o series de años húmedos, periodicidad y ciclicidad de la pluviometría, y el impacto del fenómeno de El Niño (Oscilación Meridional El Niño).

RESUME

L'analyse statistique des séries pluviométriques de 200 stations de la Région Hydrologique 36 a été réalisée par des méthodes de classification telles que l'analyse en composantes principales (ACP), l'analyse factorielle de correspondances (AFC), la classification ascendante hiérarchique (CAH), et la méthode proposée par les hydrologues de l'ORSTOM, la MVR, Méthode du Vecteur Régional; cette méthode de critique des données pluviométriques est basée sur l'hypothèse de pseudo-proportionnalité des données pluviométriques entre stations voisines, et le non-respect de cette hypothèse permet de détecter les erreurs existant dans ces bases de données.

On décrit ici les méthodes qui permettent de réaliser ces régionalisations ainsi que les régions climatiques ainsi déterminées par chaque méthode. Cela a permis de confirmer l'existence de trois sous-régions de climats différents dans la RH 36 et les éléments explicatifs de cette répartition, le rôle du gradient altitudinal, de la situation de la région au centre du continent américain, la continentalité induite par la présence des deux Sierras Madres. Est confirmé aussi l'important rôle d'approvisionnement en eau de la Sierra Madre Occidentale, pour tout le Nord-Ouest du Mexique.

D'autre part, l'étude des séries pluviométriques a donné l'occasion de connaître l'évolution du climat depuis plus d'un demi-siècle. On a pu ainsi déterminer les phases de sécheresse, les séries d'années humides, la périodicité et la cyclicité de la pluviométrie, et l'effet du phénomène de El Niño (Oscillation Sud El Niño).

ABSTRACT

This paper describes the methodologies used in order to identify three sub-regions with different climate, and the importance of factors such as the altitudinal gradient. The Western Sierra Madre is defined as the main water supply in northwestern Mexico.

A statistical analysis of pluviometric series (200 stations) was undertaken, in the Mexican Hydrologic Region number 36. Using the following classification methods: the analysis on principal components (APC), the factorial analysis of correspondences (FAC), the ascendant hierarchical classification (AHC) and the method of regional vector (MRV) proposed by the Hydrology section of ORSTOM-France, to detect unavoidable errors within pluviometric measures from neighborial stations in data base.

The study of pluviometric series shows 50 years of climatic evolution to determin drought or humid year periods, periodicity and oscillation of rain, and the presence of ENSO (El Niño Southern Oscillation).

GEOGRAFÍA DE LAS LLUVIAS EN UNA CUENCA DEL NORTE DE MÉXICO: REGIONALIZACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES EN LA REGIÓN HIDROLÓGICA 36

Luc DESCROIX, Jean-François NOUVELOT*, Juan ESTRADA***

(*Hidrólogos de ORSTOM, AP 225-3, 35071 Gómez Palacio, DGO, México, e-mail: orstom@raspa.inifap.conacyt.mx; **Hidrólogo CENID-RASPA).

INTRODUCCIÓN

La Región Hidrológica 36 (RH 36) es una de las 37 regiones hidrológicas de México (Fig. 1) y a su vez una de las tres regiones endorreicas del norte del país. Se localiza sobre los estados de Durango, Zacatecas y Coahuila.

Se extiende desde la Sierra Madre Occidental, al oeste, hasta las lagunas de Mayrán y Viesca, al este, en una superficie aproximada de 92 000 km². Presenta un clima que va de subhúmedo en la sierra a árido en las lagunas, las cuales representan la extremidad meridional del desierto de Chihuahua. La pluviometría anual varía de 900 a 200 mm del oeste al este respectivamente (Descroix *et al*, 1993; Estrada *et al*, 1993).

Al centro de la RH 36 se localiza la Comarca Lagunera, una importante región agrícola, dedicada en un principio a la producción del algodón y que actualmente es considerada la cuenca lechera más importante del país (Figs. 1 y 2). Ubicada en una zona árida, este perímetro de riego de 160 000 hectáreas depende, en términos de aguas renovables, de los escurrimientos procedentes de la Sierra Madre Occidental a través del río Nazas (10⁹ m³/año); el otro proveedor importante, el río Aguanaval, aporta el 13 por ciento del total de las aguas superficiales de la cuenca que llegan a la depresión endorreica.

Sin embargo, el consumo de agua de este perímetro sobrepasa, desde hace más de 40 años, el volumen disponible de los escurrimientos; este déficit se complementa mediante la extracción directa del acuífero, lo que a ocasionado un fuerte abatimiento de su nivel freático (más de 1.5 metros anualmente; Rigal, 1988; González, 1992; Brouste, 1996). Entre la parte alta de la cuenca, que provee la mayoría de las aguas superficiales (almacenada en la presa Lázaro Cárdenas, en El



Figura 1. Ubicación de la RH 36.

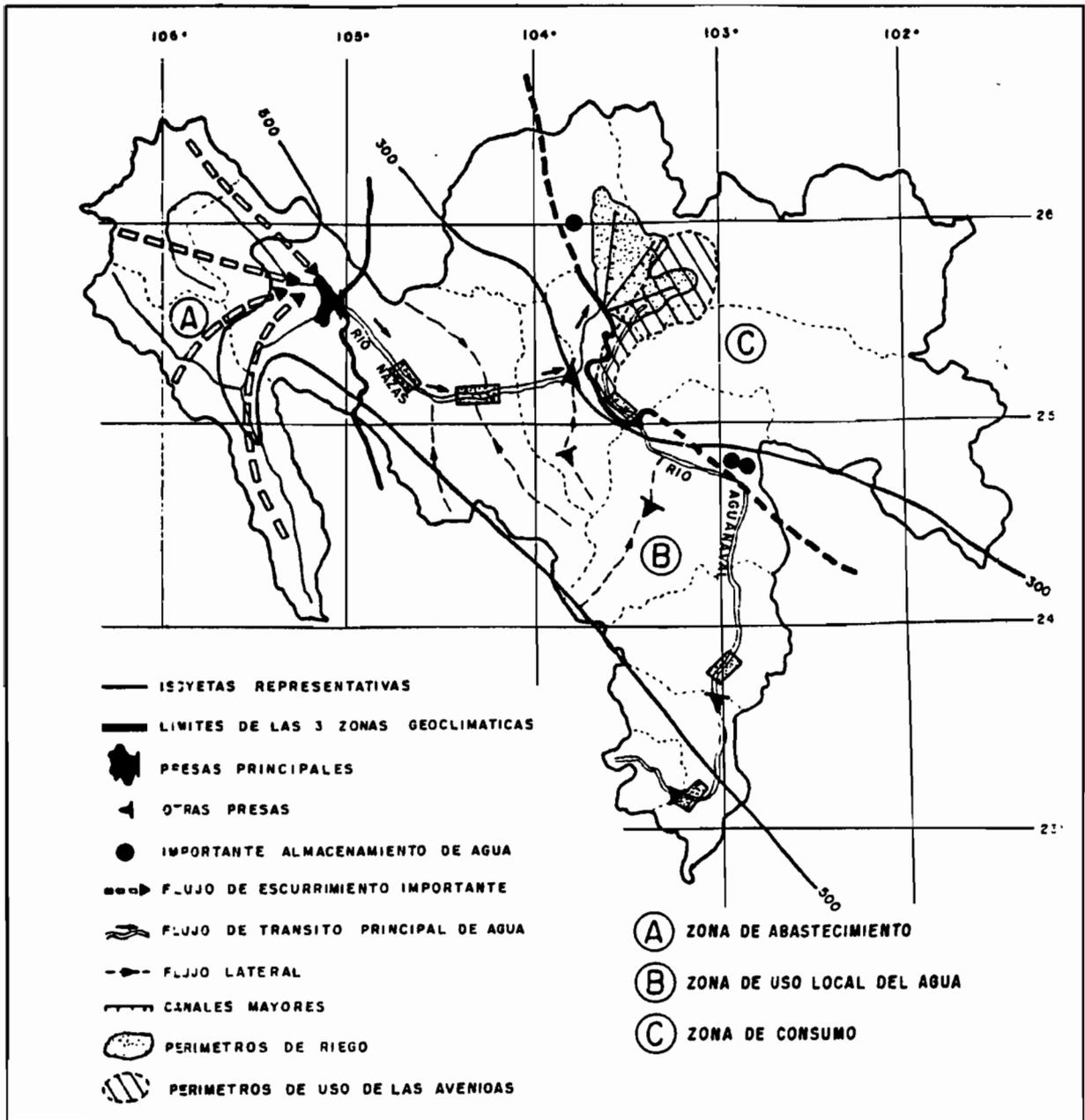


Figura 2. Esquema sintético de la RH 36.

Palmito, con una capacidad total de $4 \cdot 10^9 \text{ m}^3$), y la parte baja que la consume, se extiende una zona semiárida con pluviometría anual de 300 a 500 mm. En esta zona semiárida los escurrimientos son aprovechados mediante numerosos presones de retención que almacenan el agua para el abrevamiento del ganado o bien, para el riego de pequeños perímetros agrícolas.

1. DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LAS PRECIPITACIONES.

1.1 REPARTICIÓN DE LAS PRECIPITACIONES EN EL ESPACIO DE LA RH 36.

La circulación zonal y los factores azonales.

El clima general del norte de México está regido por:

- Situación en latitud
- Relieve

La Región Hidrológica 36 (Figs. 1 y 2) se extiende esencialmente al norte del Trópico de Cáncer (de la latitud 23° a la $26^\circ 30'$ norte), pero queda influenciada en gran parte por el clima tropical.

- De diciembre a junio, el régimen es el de las latitudes subtropicales: grandes zonas anticiclónicas de los $25\text{-}30^\circ$, en fachada occidental de continente (Fig. 3, Climatología de México, citada en Atlas del Agua, Comisión Nacional del Agua, México, 1976). Los vientos del este, dominantes a estas latitudes, penetran la llanura costera del golfo no logrando adentrarse fuertemente en el continente: de esta forma todos los altiplanos están bajo el régimen de altas presiones subtropicales, así como el litoral del Pacífico.

- De junio a noviembre, las altas presiones permanecen sobre el extremo noroeste de México y la California americana (con presencia de un desierto costero); el altiplano mexicano es entonces penetrado por aire oceánico procedente del este y del oeste (Santibañez, 1992; Cornet, 1993; Delhoume, 1995):

* Las masas de aire húmedo procedentes del Golfo de México se secan al pasar la Sierra Madre Oriental (cuya altitud local es de 3 500 a 4 000 metros), pero pueden aportar una inestabilidad que propicie la ocurrencia de lluvias de convección. Sin embargo, la RH 36, por su posición en latitud, se ubica al extremo norte de las zonas influenciadas por los alisios, además de estar abrigada por las cumbres de la Sierra Madre Oriental.

* Las masas de aire del Pacífico encuentran las anteriores sobre la Sierra Madre Occidental, formando el « Frente Tropical Mexicano » (Climatología de México), ubicado a 10 o 15 grados más al norte que el frente intertropical. Esto crea una inestabilidad que tiene como consecuencia una pluviometría elevada, siendo reforzada por el efecto orográfico: pocas cumbres superan los 3 300 metros de altitud, pero hay muy pocos puertos abajo de los 2 500 metros.

- A partir de fines de agosto, pero sobre todo al final de septiembre y durante el mes de octubre, las colas de ciclones, principalmente los que se forman sobre el Pacífico, dado que los provenientes del Golfo de México se dirigen por lo general hacia Texas y la costa norte de dicho golfo, pueden atravesar el obstáculo de la Sierra Madre Occidental y provocar precipitaciones importantes (aunque de poca intensidad con larga duración, pues la mayor

1.1.1 INTRODUCCIÓN PARA UNA REGIONALIZACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES.

Una primera regionalización basada en las características climáticas y físicas.

Antes de utilizar el Método del *vector* Regional (MVR) para regionalizar las características pluviométricas de la RH 36 se hizo una primera clasificación por ascendencia jerárquica. Para liberarse de los efectos de abundancia se definió, para 60 estaciones, repartidas en toda la RH 36, el régimen pluviométrico mensual medio, vector de los 12 valores mensuales medios de cada una de ellas, razonadas al total medio anual en porcentaje. Estos 60 perfiles fueron agrupados utilizando el método de clasificación ascendente jerárquica (CAJ). A partir de una clasificación inicial, donde cada estación representa una clase, este método permite, por aglomeraciones sucesivas de las clases más cercanas, constituir nuevas particiones o agrupaciones. El conjunto de las estaciones forman una nube de puntos en un espacio con 12 dimensiones; cada clase constituye una sub-nube caracterizada por su centro de gravedad. Obviamente, cada agrupación produce una pérdida de información que es más débil si las clases son homogéneas y las distancias que las separan más grandes. Para estudiar las reparticiones sin tomar en cuenta los efectos de abundancia, se escogió la distancia del Chi². Por otra parte, no había *a priori* ninguna razón para no atribuir el mismo peso a cada año de observación.

En una segunda fase, un análisis de componentes principales (ACP), en el cual las variables estudiadas son las precipitaciones anuales, altitud, latitud, longitud, distancia al océano Pacífico, así como las densidades local y regional de vegetación, permite a partir de los dos primeros ejes, distinguir cuatro grandes regiones pluviométricas (Fig. 4): « Sierra Madre Occidental »; « mesetas del Aguanaval »; « Medio Nazas »; « Laguna y alrededores ». En este ACP, el eje 1 (que explica 62 por ciento de la varianza) define esencialmente la abundancia pluviométrica y todas las variables que se correlacionan con ella, el eje 2 (16 por ciento de la varianza) determina sobre todo la latitud.

El añadido, en un análisis factorial de correspondencia (AFC) de variables cualitativas suplementarias que permitan tomar en cuenta, tanto al nivel local (de unos km) como regional (decenas de km), la exposición, el tipo de sitio, y de situación de la estación pluviométrica, sólo confirma una partición en tres grandes zonas geoclimáticas: al oeste, la Sierra Madre subhúmeda; al centro, las mesetas del Aguanaval y la cuenca media del Nazas, semiáridos; al este, la Laguna, árida (Fig. 5). Esta regionalización se acerca mucho a la que fue realizada en 1993 (Estrada *et al*, 1993) al analizar las agrupaciones de estaciones en función del gradiente altitudinal, comprobándose estar correlacionadas, además de con la altitud, con la distancia al océano Pacífico, aunque estas dos correlacionadas entre sí.

El ACP establece, dentro de la zona semiárida de la cuenca, una región sur (Aguanaval) y una región norte (Nazas), que no distingue el AFC. Esta diferenciación latitudinal ya subrayada, se confirma a partir del análisis de la estructura espacial de la pluviometría anual, basada en la determinación del variograma climatológico (Nouvelot *et al*, 1996). Este método, desarrollado para la determinación de los filones en prospección y explotación minera, permite definir una función experimental (variograma o correlograma) que describe la correlación entre medidas simultáneas, realizadas en diferentes puntos en el espacio, en relación con la distancia que los separa.

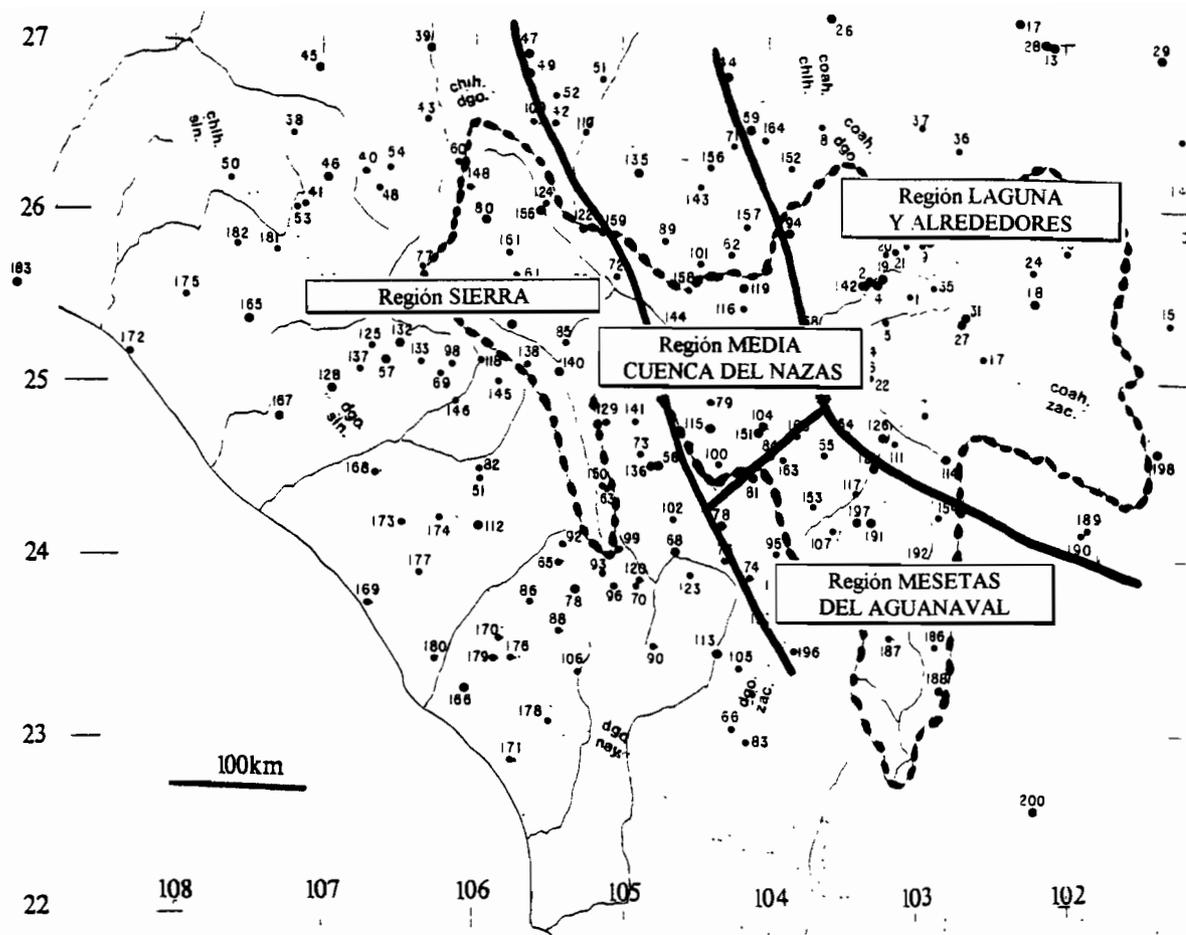


Figura 4. Las cuatro regiones pluviométricas definidas por análisis de componentes principales (ACP).

Los datos quedan espacialmente estructurados mientras la función variograma esté creciendo (o la función correlograma tienda hacia 0). Cuando el variograma tiende a ser horizontal, corresponde a una distancia máxima, llamada « alcance », más allá de la cual las mediciones ya no están correlacionadas ni estructuradas. En la cuenca del río Nazas, el « alcance » es de más de 300 km si se considera únicamente el eje este-oeste (un ángulo de 90° entre los acimuts NO-SE/SO-NE), mientras que en el sentido de norte a sur se tienen sólo 160 km..

1.1.2 DEFINICIÓN DE UN VECTOR REGIONAL.

El método propuesto (Hiez, 1977; Hiez *et al*, 1992) está basado en la pseudo-proporcionalidad de los valores totales pluviométricos entre estaciones « vecinas », cuyo conjunto de datos, considerado como una matriz, permite la elaboración de un vector de referencia de componentes anuales llamado « vector regional », al que se podrán comparar cada una de las estaciones. Esta elaboración se apoya en el principio de máxima verosimilitud, basado en el

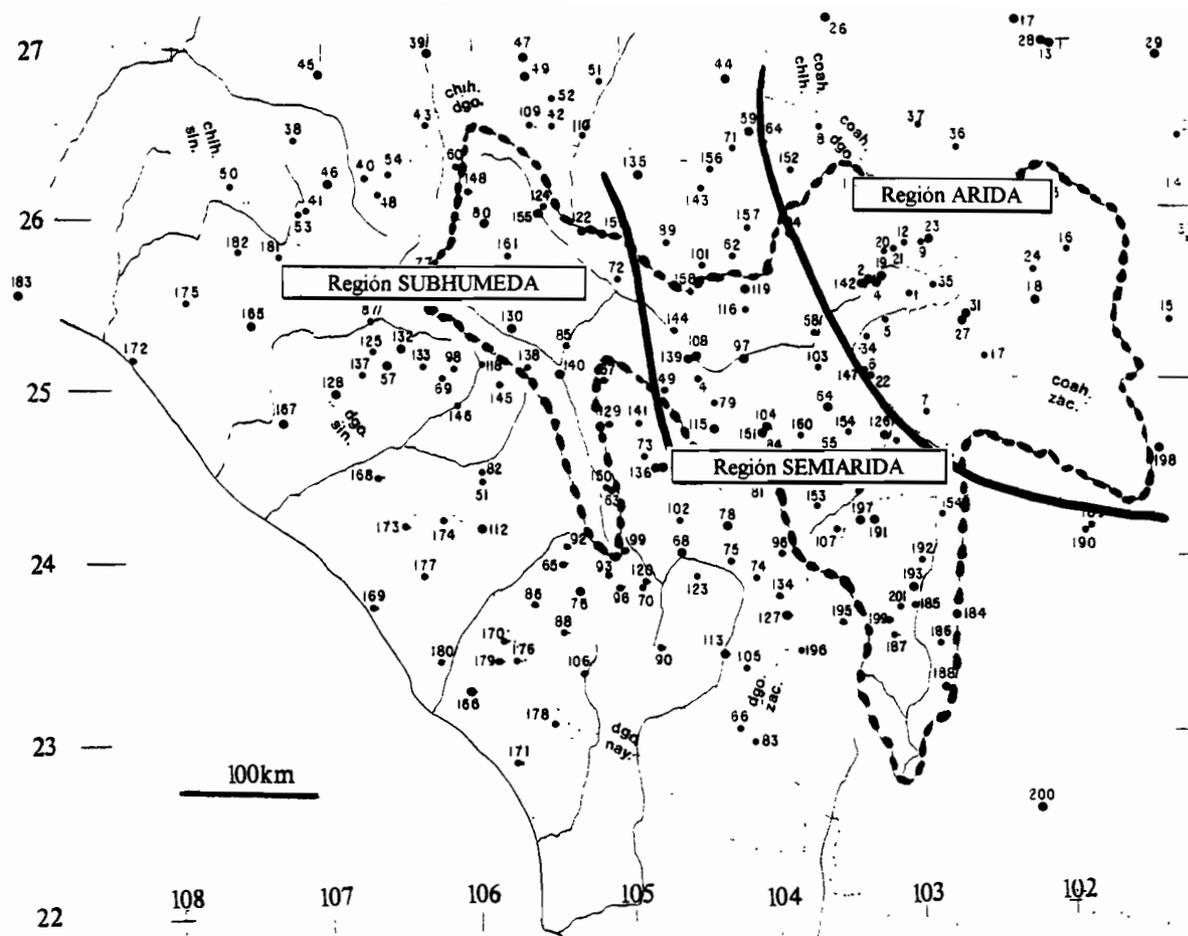


Figura 5. Las tres grandes regiones geoclimáticas.

postulado que la información la más verosímil es la que se repite con más frecuencia. El fundamento del método es que toda la información contenida en cada una de las estaciones debe contribuir a la elaboración del vector regional, sin que los datos erróneos puedan tener una influencia sensible sobre el resultado. Además, la información proporcionada por el vector regional permite conocer las fluctuaciones temporales de las precipitaciones de manera más confiable, en términos de representatividad espacial, que la información espacial proporcionada por cada una de las estaciones.

En la práctica, es indispensable delimitar *a priori* regiones supuestamente homogéneas a nivel pluviometría en el espacio, para que la hipótesis de pseudo-proporcionalidad sea comprobada y que el vector regional generado sea lo suficientemente correlacionado con cada una de las estaciones que sirvieron a su determinación. A partir de la CAJ, ACP, AFC se pudieron predeterminar tres o cuatro regiones homogéneas. Las estaciones situadas al límite de dos zonas pudieron ser utilizadas para la definición de ambos vectores. A pesar de algunas dificultades debidas a la gran superficie de la región estudiada (92 000 km²) y la gran heterogeneidad del

relieve, y al cabo de pruebas sucesivas que permitieron hacer correcciones en las crónicas de algunas estaciones y el trazado de zonas homogéneas, se pudieron diferenciar cuatro regiones pluviométricas (Fig.6):

- 1 - Sierra Madre Occidental y mesetas de Durango (esta última zona está fuera de la RH 36): 39 estaciones (ver lista en Anexo 1).
- 2 - Pie de monte oriental de la Sierra Madre: 17 estaciones.
- 3 - Mesetas de la cuenca del Aguanaval: 26 estaciones.
- 4 - Laguna y sur del Bolsón de Mapimí: 31 estaciones.

Para las tres primeras regiones se acepta la hipótesis de pseudo-proporcionalidad calculada por el MVR; es decir que el índice global que la define es inferior a 0.2. En cambio, en la cuarta región no está satisfecha la hipótesis dado que el índice es de 0.23. Sin embargo, esta es una región *a priori* geoclimáticamente homogénea, además de ser la parte árida de la RH 36, lo que le confiere rasgos particulares donde la irregularidad espacio-temporal de las precipitaciones es demasiado elevada para que, a pesar de distancias cortas, exista proporcionalidad entre las estaciones. Se le integró a esta región una estación ubicada fuera de la Laguna, San Juan de Guadalupe ubicada en el bajo valle del río Aguanaval, más próxima de esta región que de la llamada « mesetas del Aguanaval ».

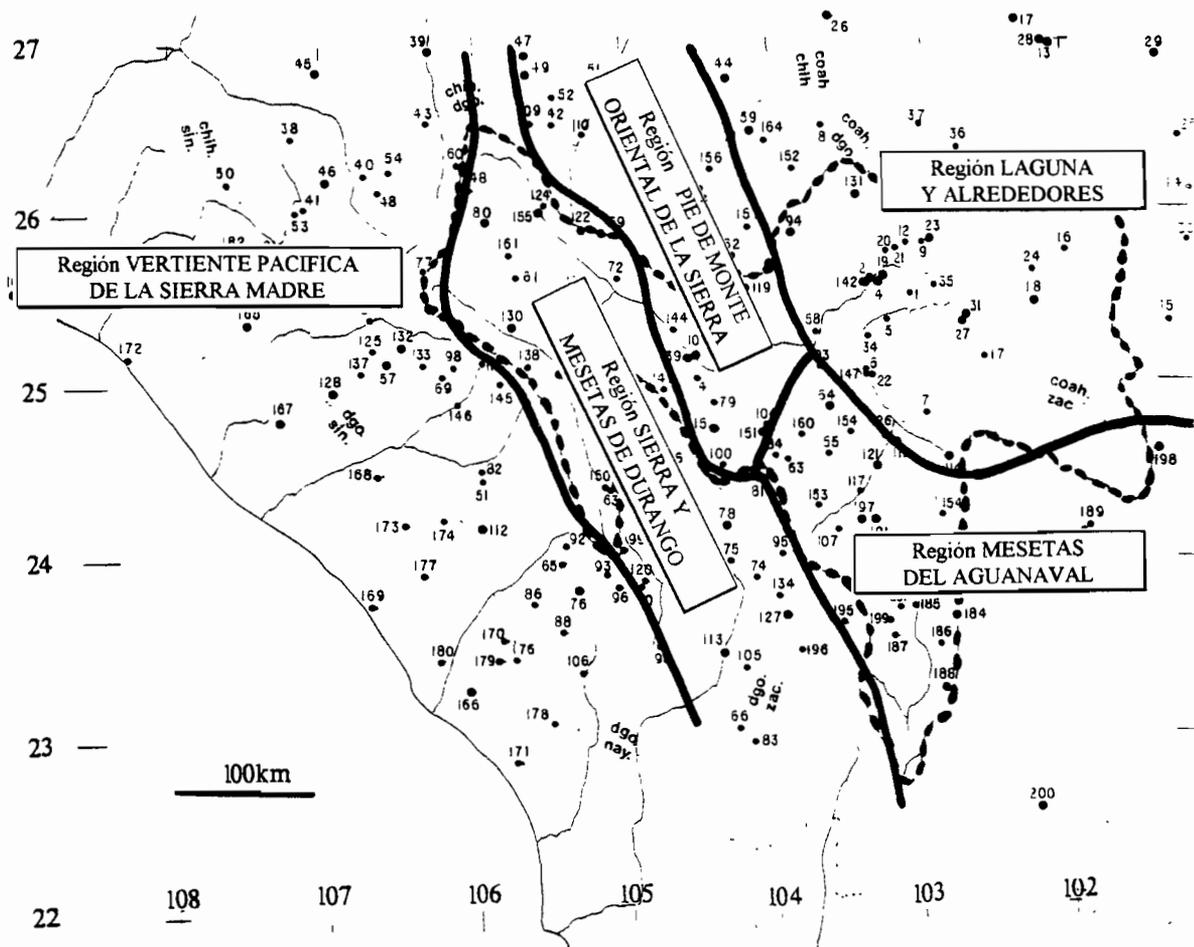


Figura 6. Mapa de las regiones determinadas por el MVR.

Sin embargo, se pudo vislumbrar en la Laguna una subregión con un comportamiento homogéneo: la subregión « Laguna sur », que agrupa 12 estaciones, cumpliéndose adecuadamente la hipótesis de pseudo-proporcionalidad. En este caso, el elemento unificador probablemente sea la línea de relieves que limita al sur la depresión endorreica, y que induce un comportamiento homogéneo de las precipitaciones (Fig. 7). De hecho, estas estaciones están alineadas por más de 200 km de oeste al este, en tanto que en el centro de la Laguna, la pseudo-proporcionalidad no se cumple para estaciones distantes de apenas 20 km. Se intentó, por otra parte, incluir en la región Laguna estaciones periféricas de clima igualmente árido, pero ninguna permitió satisfacer a las hipótesis de pseudo-proporcionalidad.

Por otra parte, se trató de conocer el comportamiento de la vertiente del Pacífico de la Sierra Madre Occidental (vertiente directamente expuesta a los flujos de precipitaciones de tipo « monzón » del frente intertropical). Así, unas cincuenta estaciones distribuidas en 400 km de norte a sur y con 3 000 metros de desnivel, del litoral hasta el parteaguas que forma la cresta de la Sierra Madre, se integraron en una misma región pluviométrica.

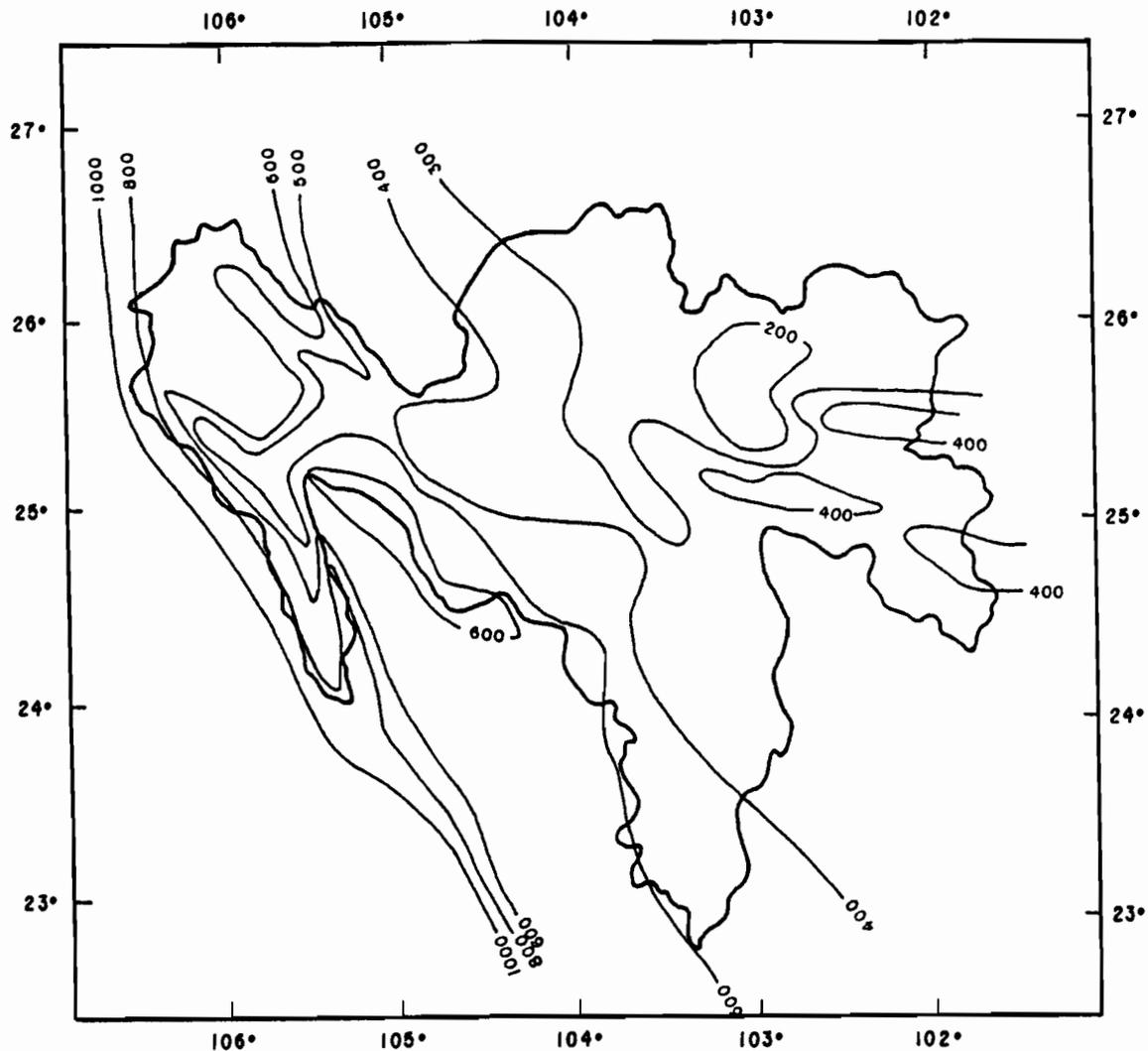


Figura 7. Mapa de isoyetas de la RH 36.

1.2 EL RÉGIMEN Y LA EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LAS PRECIPITACIONES.

Antes de todo análisis de la repartición anual y estacional de las precipitaciones, la validez de los datos fue corroborada por el método de doble masa. Los ajustes estadísticos fueron realizados con el programa DIXLOI (Lebel, ORSTOM).

Para establecer la estacionalidad temporal de las series pluviométricas anuales, se analizó el autocorrelograma de las estaciones con las crónicas más largas. Al considerar un valor de significancia del cinco por ciento, ningún fenómeno de persistencia fue puesto en evidencia. Sin embargo, al tomar el ejemplo de la estación de Tepehuanes se puede notar que, en todos los casos, los coeficientes de autocorrelación son pequeños (máximo 0.26 para 66 valores). Estos no disminuyen forzosamente con el intervalo de tiempo (en años) que separe dos observaciones. Los diez primeros rangos de tiempo corresponden a una correlación positiva, cuando los 21 siguientes indican una correlación negativa. Obviamente, estas relaciones no son bastante estrechas para indicar la presencia de elementos cíclicos, lo que es comprobado por el trazado del periodograma de la estación cuyo pico principal corresponde a un ciclo de período igual al período de observación, y los picos secundarios a períodos de 2 a 2.5 años.

Asimismo, las pluviometrías de las diferentes temporadas no están significativamente relacionadas. Una temporada seca, particularmente deficitaria, puede estar seguida por una temporada de lluvias abundante y viceversa. De la misma manera, no existe relación entre las precipitaciones de una temporada de verano y las del invierno siguiente. Sin embargo, se pudo observar para la estación de Tepehuanes (en la Sierra Madre Occidental), a través de 71 años (con 473 mm de pluviometría anual promedio), que los siete mayores valores de verano (de junio a septiembre, cuyo promedio en este periodo es 364 mm), los que son superiores a 470 mm, sucedieron en todos los casos a un invierno (de enero a abril), con precipitaciones inferiores a la normal (38 mm).

1.2.1 El régimen pluviométrico.

La repartición de las precipitaciones, o régimen pluviométrico, presenta una gran homogeneidad de la zona subhúmeda a la zona árida. El perfil medio fue definido utilizando la CAJ (clasificación ascendente jerárquica), a partir de 60 estaciones distribuidas en toda la cuenca. La temporada de lluvias de verano, de junio a septiembre, representa un 78 por ciento del total anual de las precipitaciones, con un máximo en agosto. Las lluvias de invierno no rebasan un ocho por ciento del total. Sin embargo, un análisis más fino permite distinguir una zona norte y noreste que está más expuesta a las pocas entradas de aire del este (colas de ciclones provenientes del Atlántico), y del noreste, originarias de frentes polares. Se caracteriza por una menor cantidad de lluvias de verano, cuyo total es inferior al 70 por ciento del total anual; las lluvias de invierno alcanzan el 12 por ciento, además de que en mayo y octubre también tienen lluvias más abundantes (Cuadro 1).

De hecho, al contrario de lo que se observa comunmente, la irregularidad temporal de las precipitaciones se incrementa con el aumento del total de éstas. Parece que las lluvias de invierno son más o menos las mismas, en valor absoluto, en toda la región y, por consecuencia, ésta conoce

CUADRO 1. DISTRIBUCION MENSUAL DE LAS PRECIPITACIONES EN LA CUENCA DEL NAZAS (EN PORCENTAJE DEL TOTAL ANUAL).

| Mes | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|-----|-----|-----|
| Zona N-NE | 3.9 | 2.2 | 1.1 | 2.6 | 6.0 | 13.5 | 17.2 | 19.7 | 18.1 | 8.0 | 3.3 | 4.4 |
| Resto Nazas | 3.0 | 1.1 | 0.7 | 1.6 | 3.5 | 12.9 | 22.3 | 24.2 | 18.4 | 6.9 | 2.4 | 3.2 |

el mismo régimen. En cambio, para las lluvias de verano, existe un gradiente pluviométrico positivo en el sentido noreste a suroeste, que explica el mayor porcentaje de precipitaciones de invierno en la parte seca de la RH 36. Se nota que en esta región, el mes de marzo es el más seco.

1.2.2 Las precipitaciones diarias y extremas.

De lo que precede se puede deducir que hay un crecimiento de la irregularidad interanual de las precipitaciones desde la Sierra Madre Occidental hacia la depresión endorreica árida y también del sur hacia el norte; este incremento resulta lógico dado que la aridez se acompaña de una gran variación de la pluviometría de un año a otro.

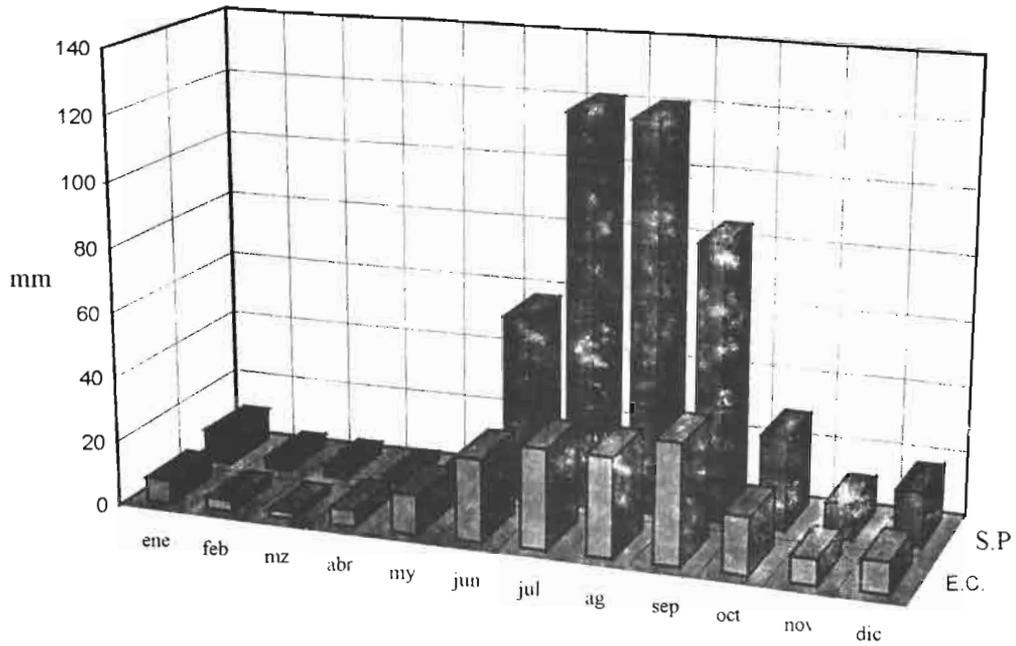
Esta heterogeneidad espacial también se observa a nivel de las precipitaciones diarias. Así, en la Figura 9 se puede apreciar que las áreas más húmedas de la RH 36 (cuencas altas del Nazas y del Aguanaval) presentan valores menores a los 60 mm de precipitación máxima en 24 horas, en tanto que para las zonas áridas y semiáridas, estos valores son mayores. Por otra parte, resulta difícil relacionar precipitación total anual con los máximos diarios.

Este hecho está confirmado por la estabilidad espacial de la distribución relativa del número de días con lluvia en relación con la pluviometría total. El aumento del total corresponde a un crecimiento relativo y homogéneo del número de días con lluvia en las diferentes clases de pluviometría. Para precipitaciones anuales de 200 a 600 mm se nota un gradiente de 14 ó 15 días con lluvia (superiores a 0.1 mm), por 100 mm de precipitación, de los cuales ocho son días con lluvias inferiores a 5 mm y uno sólo con lluvia superior a 22 mm.

El estilo de precipitaciones es similar entre la zona árida y la zona subhúmeda, variando únicamente la frecuencia de aparición de los eventos lluviosos. Un estudio geoestadístico demostró que para lluvias con una hora de duración, el alcance es cercano a 5 ó 6 km, con una área de cobertura de 20 a 30 km².

El Cuadro 2 indica que los valores de pluviometría diarios de frecuencia decenal son sensiblemente inferiores a los que se observan en diferentes regiones del mundo con clima similar. Sólo los Andes, entre 2 500 y 4 000 metros de altitud, se caracterizan por valores inferiores. Sin embargo, en ese caso, hay que hacer notar el efecto de la altitud: las estaciones de la RH 36, con altitudes de 1 100 a 2 300 metros, están muy por abajo de las de los Andes; por el contrario, en el Sahel, nordeste brasileño y sobre todo el litoral de Ecuador, están mucho más bajas.

**Pluviometría anual media de Santiago Papasquiario (S.P.)
y de El Cuije (E.C.)**



**Repartición mensual de la pluviometría en Santiago
Papasquiario (S.P.) y El Cuije (E.C.)**

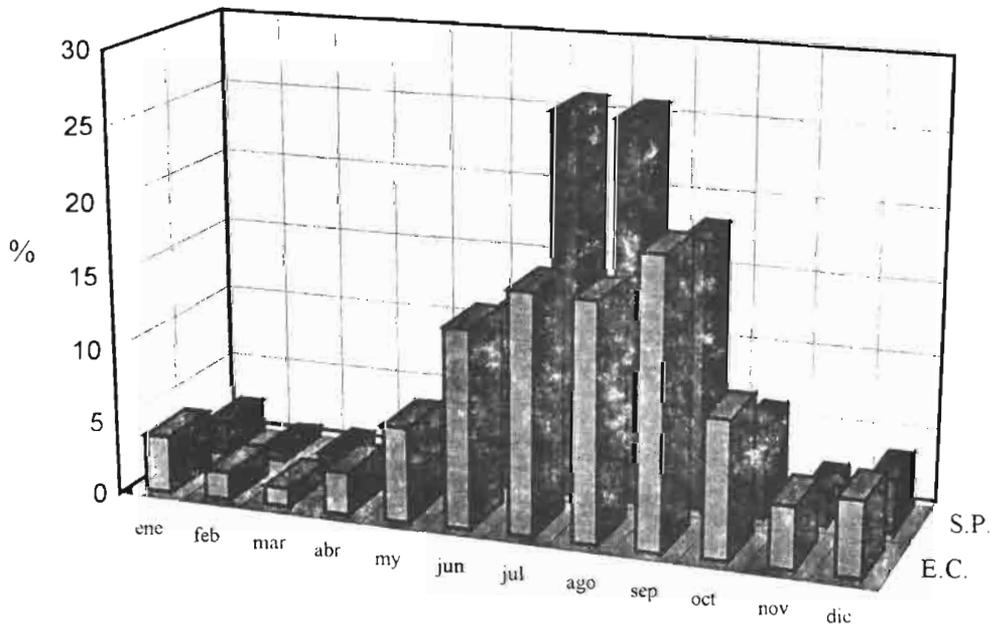


Figura 8. Ejemplo de estaciones de los dos subregímenes pluviométricos determinados por clasificación ascendente jerárquica.

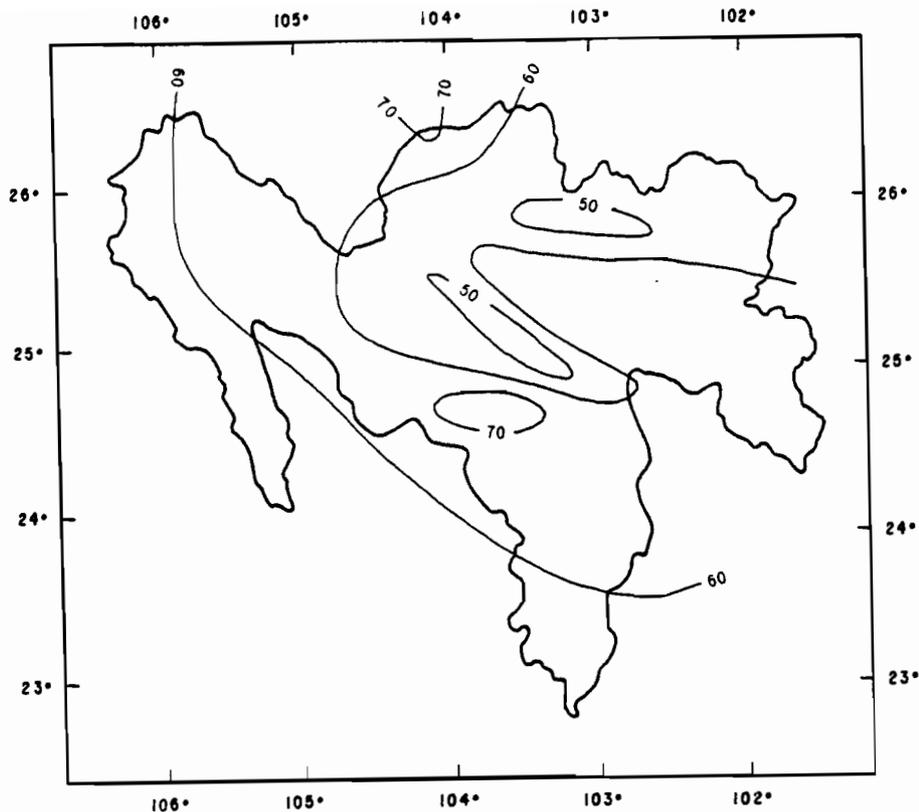


Figura 9. Valores decenales de la precipitación máxima en 24 horas.

CUADRO 2. PLUVIOMETRIAS DIARIAS DE FRECUENCIA DECENAL EN DIFERENTES REGIONES ARIDAS.

| Pluv. anual (mm) | Norte de México | Sahel (Africa) | Nordeste de Brasil | Costa de Ecuador | Andes ecuatorianos |
|------------------|-----------------|----------------|--------------------|------------------|--------------------|
| 200 | 40-60 | 55-75 | | 65-75 | |
| 300 | 40-65 | 70-90 | | 70-85 | |
| 400 | 45-70 | 80-100 | 90-115 | 75-100 | 20-40 |
| 500 | 45-72 | 90-105 | 95-120 | 80-110 | 25-45 |
| 600 | 47-75 | 95-110 | 100-120 | 90-120 | 30-50 |

Una evolución con la misma tendencia caracteriza las intensidades máximas de lluvia (Cuadro 3). Las lluvias del norte de México son de hecho no solamente menos abundantes (para la RH 36, de las zonas áridas a las zonas subhúmedas, sólo nueve por ciento de las lluvias son de más de 20 mm), sino también de intensidad inferior a las que se observan en otras regiones de clima similar. Esta menor agresividad de las lluvias tiene como consecuencia tasas de erosión moderadas que no exceden a 500 ton/km²/año.

CUADRO 3. INTENSIDAD DE LAS LLUVIAS DE FRECUENCIA DECENAL EN DIFERENTES REGIONES ARIDAS PARA 400 MM DE PRECIPITACION ANUAL (EN MM/H).

| Duración en minutos | Norte de México | Sahel (Africa) | Nordeste de Brasil | Costa de Ecuador | Andes ecuatorianos |
|---------------------|-----------------|----------------|--------------------|------------------|--------------------|
| 10 | 115 | 140 | 125 | 115 | 55-80 |
| 30 | 65 | 80 | 80 | 75 | 30-45 |
| 60 | 40 | 60 | 65 | 50 | 20 |

Cabe señalar que los escurrimientos superficiales pueden estar favorecidos por fenómenos de persistencia observados al nivel de los eventos lluviosos. El autocorrelograma de las observaciones diarias de las diferentes estaciones pluviométricas indica efectivamente una disminución de los coeficientes de autocorrelación en función de su orden. Esto significa que la probabilidad de que un día sea lluvioso depende del estado del día anterior. El esquema de Polyà, concebido para reproducir fenómenos de contagio en períodos de epidemias, se adapta particularmente bien a las crónicas estudiadas. El factor de persistencia disminuye con la abundancia pluviométrica: 2.26 para una precipitación de 600 mm, 1.25 para 400 mm, 0.22 para 200 mm (un coeficiente igual a 0 significa que las secuencias son independientes).

El valor máximo decenal del total anual de las precipitaciones evoluciona con más de 800 mm en la Sierra Madre hasta menos de 400 mm en la parte baja árida; esto obedece a la misma repartición espacial que para los valores medios. Sin embargo, los valores decenales nunca superan más del 70 por ciento al promedio en la Sierra Madre Occidental y en la cuenca alta del río Aguanaval, y en cambio puede ser el doble de la media en la cuenca baja del Aguanaval, así como en la zona árida (Fig.10).

1.2.3 Las variaciones de la pluviometría a nivel anual.

El mapa de los coeficientes de variación interanual de los totales pluviométricos (Fig.11) indica una progresión de la irregularidad desde los sectores más húmedos de la Sierra Madre (coeficientes inferiores a 0.2) hacia el centro de la Laguna, donde supera 0.45.

Una manera sencilla de definir la variabilidad de una serie de observaciones es de calcular su coeficiente de variación, C_v , que es la razón de la desviación estándar σ y el promedio m :

$$C_v = \sigma/m$$

La desviación estándar, o la varianza (σ^2), que mide la dispersión de las observaciones alrededor del promedio por un sencillo cálculo de distancias, está relacionada directamente con los valores de estas observaciones, lo que significa que puede ser muy elevada si los valores lo son. Dividiendo esta σ por el promedio, el efecto de abundancia se elimina.

La variabilidad de las precipitaciones en la cuenca del Nazas, como en todo el norte de México, disminuye al incrementarse la pluviometría anual. El coeficiente de variación pasa de valores de 0.4 ó 0.5 para una pluviometría de 200 mm a sólo 0.15 a 0.3 para 600 mm. El coeficiente de variación de la pluviometría total anual para las regiones definidas por su vector regional evoluciona de la siguiente manera:

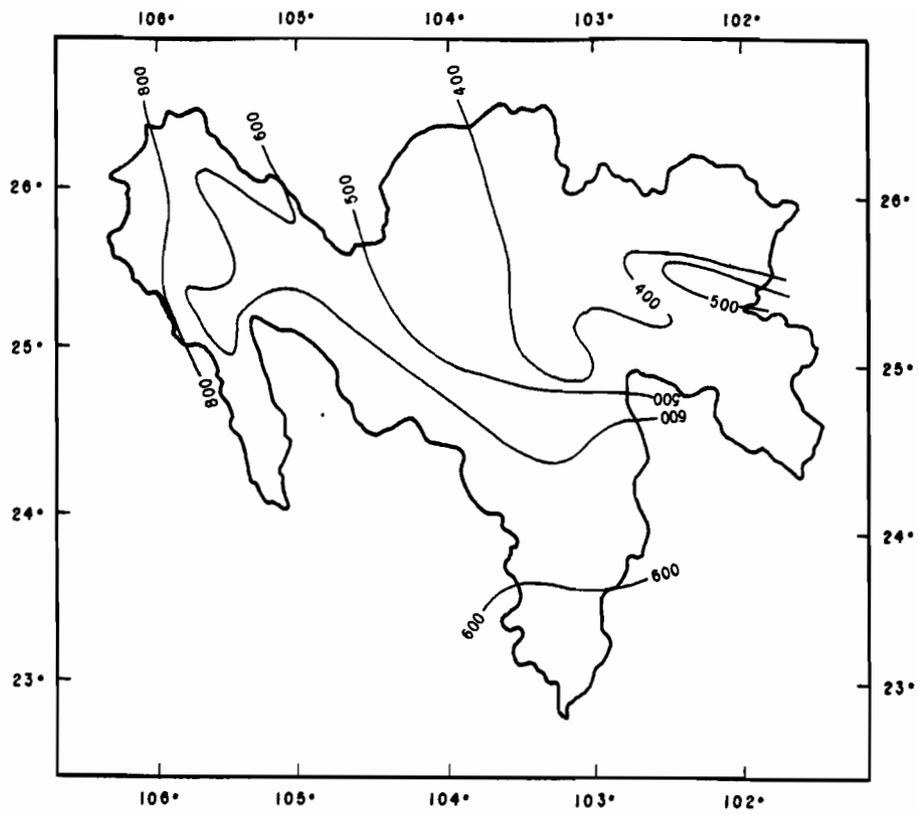


Figura 10. Valores decenales de la precipitación total anual.

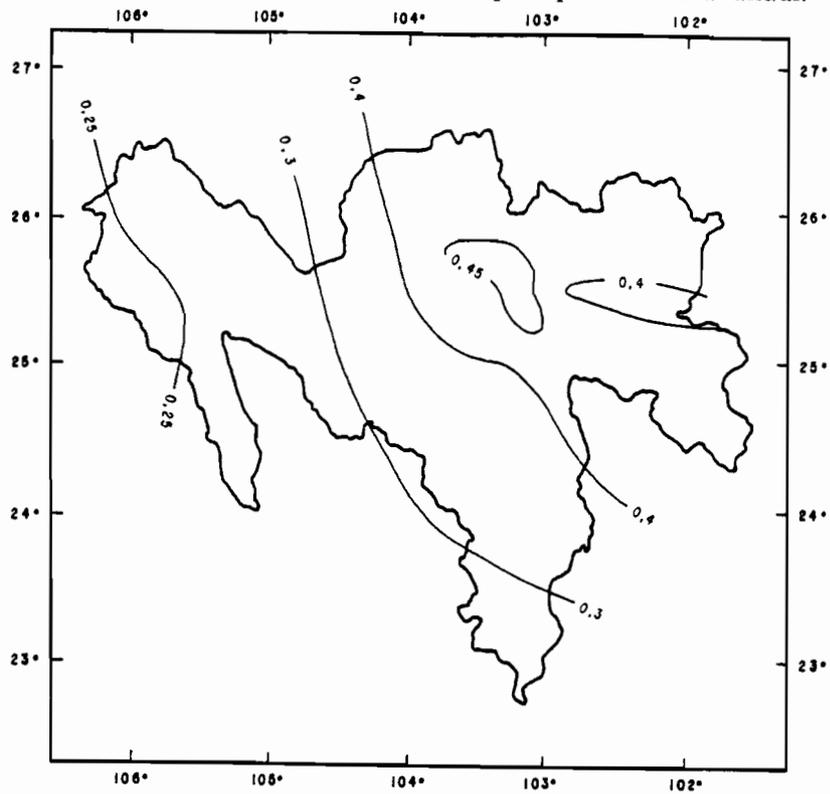


Figura 11. Mapa de los coeficientes de variación interanual de la pluviometría.

- Vertiente Pacífica de la Sierra Madre 0.18
- Sierra y mesetas de Durango 0.20
- Pie de monte de la sierra 0.26
- Mesetas del Aguanaval 0.25
- Laguna 0.36

Estos valores no son excepcionales y comparables con los que se encuentran en Africa (Sahel), inferiores a los del nordeste de Brasil, y mucho más bajos que los que caracterizan la zona costera sur del Ecuador (Cuadro 4).

El fenómeno de El Niño (ENSO por sus siglas en inglés = «*El Niño Southern Oscillation*»), que representa un sistema coplado, circulación oceánica/circulación atmosférica, caracterizado por un aumento significativo de las temperaturas de la superficie del Pacífico tropical central y oriental, es causa de esta gran irregularidad. Cuando este fenómeno, complejo y aún mal conocido, se presenta en ciertas regiones desérticas (sobre todo en Ecuador y Perú), éstas pueden beneficiarse de precipitaciones comparables con las de un clima tropical húmedo. En cambio, en el corredor interandino, cercano de estas mismas regiones de igual latitud pero con altitudes que varían entre 2 200 y 3 000 msnm y pluviometrías de 400 a 600 mm, el Cv es comparable al que se observa en el norte de México.

CUADRO 4. COEFICIENTE DE VARIACION DE LAS PRECIPITACIONES ANUALES DE DIFERENTES REGIONES ARIDAS.

| Precipitación anual (en mm) | Norte de México | Sahel (Africa) | Nordeste (Brasil) | Ecuador (litoral) | Ecuador (Andes) |
|-----------------------------|-----------------|----------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| 200 | 0.40-0.50 | 0.30-0.45 | | 0.75-1.00 | |
| 300 | 0.35-0.45 | 0.25-0.40 | | 0.60-0.80 | |
| 400 | 0.25-0.40 | 0.25-0.35 | | 0.45-0.65 | |
| 500 | 0.20-0.30 | 0.20-0.30 | 0.35-0.45 | 0.40-0.60 | 0.15-0.30 |
| 600 | 0.15-0.30 | 0.20-0.30 | 0.30-0.40 | 0.40-0.55 | |

Cabe señalar que cuando el Cv supera 0.20, la distribución estadística de las observaciones deja de ser gaussiana y presenta una asimetría (generalmente positiva para las precipitaciones), más marcada que el Cv.

1.2.4 Evolución en los 50 últimos años.

El análisis de los vectores regionales definidos precedentemente permite conocer región por región por lo menos desde la mitad de nuestro siglo. Las Figuras 12 al 15 indican la evolución de estos vectores para los períodos en que hay datos disponibles.

En todas las regiones ubicadas al este de la Sierra Madre Occidental se puede notar la siguiente evolución en la pluviometría:

- Un período excedentario de 1940 a 1947 (y a veces hasta 1948 ó 1949).
- Un período muy deficitario de 1948 (ó 1950) hasta 1957, prolongándose posteriormente aunque menos pronunciado después de 1958, año excedente en toda la RH 36 hasta 1965.
- Posteriormente se presenta un período más irregular, compuesto de años secos (como 1969 ó 1975) y de años húmedos (1968, 1973), que se suceden sin ciclicidad aparente

(fluctuaciones de 3 a 6 años), de 1966 a 1993, se nota en cambio un período seco obvio entre 1974 y 1981 en la zona semiárida, poco marcada en la Laguna e inexistente en la Sierra Madre.

- El año 1992 fue en toda la RH 36 un año deficitario, mientras que 1993 fue excedentario; los dos años siguientes fueron marcados por una fuerte sequía en toda la RH 36. El año de 1996 fue excedentario, y el invierno 1996-97 fue el segundo invierno más lluvioso desde 1946, año en que empezó a operar la presa de El Palmito.

La ubicación de la RH 36, cerca del litoral Pacífico del continente americano, podría exponerla a las consecuencias del fenómeno de El Niño. En la estación de Tepehuanes (a 1 800 msnm, y a 150 km del litoral) que cuenta con la más larga serie de observaciones (desde 1923), para 12 episodios de El Niño registrados y conocidos en el Pacífico oriental, seis se tradujeron por una pluviometría superior al promedio; los otros seis por déficits. Esto vuelve escéptico ante cualquier papel de El Niño; sin embargo, tomando como base de datos pluviométricos el conjunto de los vectores, y suponiendo que 1926 y 1939 se caracterizaron por pluviometría superior a la media, se obtienen ocho años de pluviometría excedentaria para 12 « Niños ». Por otra parte, el periodograma hace aparecer etapas que se pueden calificar de triviales, pues son de duración igual a la de la crónica o de media-crónica, o de más o menos dos años, pero jamás períodos de tres a ocho años, que se notan en la costa sudamericana donde es más conocido el fenómeno. En cambio, se nota que los años calificados con certidumbre como « fríos » (es decir sin Niño), son todos deficitarios: 1950, 1954-56, 1962, 1974-75 y 1984-85.

El año hidrológico 1991-92 fue excepcional en cuanto al nivel de precipitaciones: temporada de lluvias 1991 « normal » en cantidad, seguida por fuertes lluvias en septiembre y octubre, numerosas lluvias de invierno (de diciembre 1991 a febrero 1992). El río Nazas condujo los escurrimientos varias veces a través de la aglomeración Torreón-Gómez Palacio-Lerdo, debido a la apertura del vertedor de la presa El Palmito, alimentada por el escurrimiento en la Sierra Madre. Un hecho similar sólo se ha producido en 1968, desde la construcción de la presa.

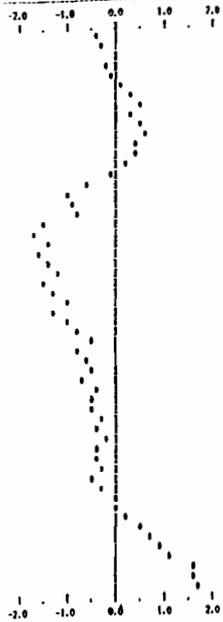
En 1993 y 1994 se presentó una fuerte sequía en el norte de México, teniéndose un déficit del 40 al 50 por ciento de la pluviometría en la RH 36, lo que corresponde a un tiempo de retorno de 30 años al considerarse los dos años consecutivos. Los estados de Chihuahua, Coahuila y Durango perdieron de 10 a 25 por ciento de su ganado vacuno. El nivel de la presa de El Palmito estuvo a su nivel más bajo en junio de 1996, y la superficie regada en la Laguna, ya disminuida en 1995, se redujo casi a la mitad para el ciclo de 1996. El nivel de la presa en junio de 1996 era comparable al que se observó en los períodos muy secos de los años 50, particularmente a los registrados antes de las lluvias en 1951, 1952, 1956, 1957 y 1962. En cambio, después de lluvias arriba de la normal en 1996, el ciclo 1997 quedó asegurado. Sin embargo el año 1997 fue deficitario y por lo tanto el ciclo 1998 está amenazado.

Claus y Jáuregui (citado en Santibañez, 1992) indican que desde 1930 se produciría un debilitamiento de los alisios en su parte derecha (es decir norte, o sea a la latitud de la Laguna) y un reforzamiento de la circulación « tropical » (de tipo monzón), lo que se traduciría por una disminución de las precipitaciones a pesar de un reforzamiento de los ciclones. Se aprecia, en efecto, desde estas fechas una disminución importante de las precipitaciones de agosto en la Laguna. Esto podría deberse (Santibañez, 1992, que no da ejemplos estacionales) a la instalación de una zona de alta presión sobre el altiplano norte de México a la mitad de la temporada de lluvias. Esto parece haberse producido también en 1994 y 1995.

Région: 0018 Sierra et plateau de Zamora

Périodes: 1923/1991
 Mois début de l'année hydrologique 01

| Date observations | Nombre d'années | Indices annuels |
|-------------------|-----------------|-----------------|
| 1 1928 | 3 | 1.10795 |
| 2 1929 | 3 | 1.08647 |
| 3 1930 | 3 | 1.17965 |
| 4 1931 | 3 | 1.21821 |
| 5 1932 | 3 | 1.27233 |
| 6 1933 | 3 | 1.37774 |
| 7 1934 | 3 | 0.79991 |
| 8 1935 | 3 | 1.21116 |
| 9 1936 | 3 | 1.18777 |
| 10 1937 | 3 | 0.78411 |
| 11 1938 | 3 | 1.02741 |
| 12 1939 | 3 | 0.80339 |
| 13 1940 | 3 | 0.72092 |
| 14 1941 | 3 | 0.63291 |
| 15 1942 | 3 | 0.66797 |
| 16 1943 | 3 | 1.08189 |
| 17 1944 | 3 | 1.08165 |
| 18 1945 | 3 | 0.82821 |
| 19 1946 | 3 | 0.86311 |
| 20 1947 | 3 | 1.23805 |
| 21 1948 | 3 | 0.84395 |
| 22 1949 | 3 | 1.17676 |
| 23 1950 | 3 | 1.27309 |
| 24 1951 | 3 | 0.79059 |
| 25 1952 | 3 | 1.21157 |
| 26 1953 | 3 | 1.20313 |
| 27 1954 | 3 | 1.29673 |
| 28 1955 | 3 | 1.29946 |
| 29 1956 | 3 | 1.34208 |
| 30 1957 | 3 | 1.74088 |
| 31 1958 | 3 | 1.27077 |
| 32 1959 | 3 | 1.01813 |
| 33 1960 | 3 | 0.79164 |
| 34 1961 | 3 | 1.20761 |
| 35 1962 | 3 | 0.96281 |
| 36 1963 | 3 | 0.79164 |
| 37 1964 | 3 | 1.31144 |
| 38 1965 | 3 | 0.88814 |
| 39 1966 | 3 | 1.07125 |
| 40 1967 | 3 | 0.94214 |
| 41 1968 | 3 | 0.86077 |
| 42 1969 | 3 | 1.14913 |
| 43 1970 | 3 | 0.81790 |
| 44 1971 | 3 | 1.18911 |
| 45 1972 | 3 | 1.31144 |
| 46 1973 | 3 | 1.42813 |
| 47 1974 | 3 | 0.75113 |
| 48 1975 | 3 | 1.31144 |
| 49 1976 | 3 | 1.26099 |
| 50 1977 | 3 | 2.09320 |
| 51 1978 | 3 | 1.20739 |
| 52 1979 | 3 | 1.20209 |
| 53 1980 | 3 | 0.79177 |
| 54 1981 | 3 | 1.10897 |
| 55 1982 | 3 | 1.10897 |



Indice de résolution initial: 4
 Indice de résolution final: 14
 Pas de balayage des indices: 2
 Nombre d'itérations: 9
 Valeur de seuil de convergence: 0.0010

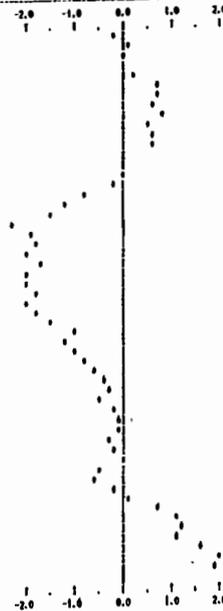
Point d'application | latitude 0 24°54'
 virtuel de vecteur | longitude 0 105° 0'

Valeur moyenne de vecteurs 1.06394

Région: 0015 piedmont oriental de la Sierra, Durango et Chihuahua

Périodes: 1923/1993
 Mois début de l'année hydrologique 01

| Date observations | Nombre d'années | Indices annuels |
|-------------------|-----------------|-----------------|
| 1 1929 | 3 | 1.37311 |
| 2 1930 | 3 | 0.88476 |
| 3 1931 | 3 | 1.22723 |
| 4 1932 | 3 | 1.22809 |
| 5 1933 | 3 | 0.94894 |
| 6 1934 | 3 | 0.85407 |
| 7 1935 | 3 | 1.31036 |
| 8 1936 | 3 | 0.74795 |
| 9 1937 | 3 | 1.30223 |
| 10 1938 | 3 | 1.00276 |
| 11 1939 | 3 | 0.52405 |
| 12 1940 | 3 | 0.86170 |
| 13 1941 | 3 | 0.54505 |
| 14 1942 | 3 | 0.68476 |
| 15 1943 | 3 | 0.83116 |
| 16 1944 | 3 | 0.44899 |
| 17 1945 | 3 | 1.08929 |
| 18 1946 | 3 | 1.07148 |
| 19 1947 | 3 | 0.81824 |
| 20 1948 | 3 | 1.31819 |
| 21 1949 | 3 | 0.70863 |
| 22 1950 | 3 | 1.08344 |
| 23 1951 | 3 | 1.27499 |
| 24 1952 | 3 | 0.81127 |
| 25 1953 | 3 | 1.06411 |
| 26 1954 | 3 | 1.23430 |
| 27 1955 | 3 | 0.83457 |
| 28 1956 | 3 | 1.18773 |
| 29 1957 | 3 | 1.20193 |
| 30 1958 | 3 | 1.27277 |
| 31 1959 | 3 | 1.20827 |
| 32 1960 | 3 | 1.06277 |
| 33 1961 | 3 | 0.79799 |
| 34 1962 | 3 | 1.38210 |
| 35 1963 | 3 | 1.04432 |
| 36 1964 | 3 | 1.09113 |
| 37 1965 | 3 | 0.73814 |
| 38 1966 | 3 | 1.07548 |
| 39 1967 | 3 | 1.15676 |
| 40 1968 | 3 | 0.63722 |
| 41 1969 | 3 | 0.91723 |
| 42 1970 | 3 | 1.47414 |
| 43 1971 | 3 | 1.27499 |
| 44 1972 | 3 | 0.87653 |
| 45 1973 | 3 | 1.07653 |
| 46 1974 | 3 | 1.05976 |
| 47 1975 | 3 | 0.92026 |
| 48 1976 | 3 | 1.48224 |
| 49 1977 | 3 | 1.43814 |
| 50 1978 | 3 | 0.88832 |
| 51 1979 | 3 | 1.38899 |
| 52 1980 | 3 | 1.38899 |



Indice de résolution initial: 4
 Indice de résolution final: 14
 Pas de balayage des indices: 2
 Nombre d'itérations: 24
 Valeur de seuil de convergence: 0.0010

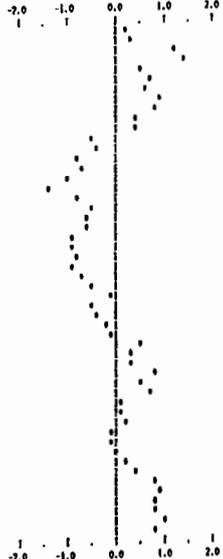
Point d'application | latitude 0 23°26'
 virtuel de vecteur | longitude 0 104°34'

Valeur moyenne de vecteurs 1.10268

Région: 0014 plateau du bassin de Aguascalientes

Périodes: 1923/1993
 Mois début de l'année hydrologique 01

| Date observations | Nombre d'années | Indices annuels |
|-------------------|-----------------|-----------------|
| 1 1942 | 3 | 1.12664 |
| 2 1943 | 3 | 1.41419 |
| 3 1944 | 3 | 1.31341 |
| 4 1945 | 3 | 0.42231 |
| 5 1946 | 3 | 1.14866 |
| 6 1947 | 3 | 0.79378 |
| 7 1948 | 3 | 1.23276 |
| 8 1949 | 3 | 0.89929 |
| 9 1950 | 3 | 0.42814 |
| 10 1951 | 3 | 0.98291 |
| 11 1952 | 3 | 0.42579 |
| 12 1953 | 3 | 1.09256 |
| 13 1954 | 3 | 0.87163 |
| 14 1955 | 3 | 0.87108 |
| 15 1956 | 3 | 0.74232 |
| 16 1957 | 3 | 0.81199 |
| 17 1958 | 3 | 0.76478 |
| 18 1959 | 3 | 1.37312 |
| 19 1960 | 3 | 0.93340 |
| 20 1961 | 3 | 0.98273 |
| 21 1962 | 3 | 0.71165 |
| 22 1963 | 3 | 0.91643 |
| 23 1964 | 3 | 1.07363 |
| 24 1965 | 3 | 0.98813 |
| 25 1966 | 3 | 1.12724 |
| 26 1967 | 3 | 1.11277 |
| 27 1968 | 3 | 1.42925 |
| 28 1969 | 3 | 0.63125 |
| 29 1970 | 3 | 1.27311 |
| 30 1971 | 3 | 1.27311 |
| 31 1972 | 3 | 1.09376 |
| 32 1973 | 3 | 1.29741 |
| 33 1974 | 3 | 0.80099 |
| 34 1975 | 3 | 0.87868 |
| 35 1976 | 3 | 0.86676 |
| 36 1977 | 3 | 0.72721 |
| 37 1978 | 3 | 1.06646 |
| 38 1979 | 3 | 0.53928 |
| 39 1980 | 3 | 0.93373 |
| 40 1981 | 3 | 1.12724 |
| 41 1982 | 3 | 0.70820 |
| 42 1983 | 3 | 0.92524 |
| 43 1984 | 3 | 1.16859 |
| 44 1985 | 3 | 1.13894 |
| 45 1986 | 3 | 1.31710 |
| 46 1987 | 3 | 1.42151 |
| 47 1988 | 3 | 1.14528 |
| 48 1989 | 3 | 0.84973 |
| 49 1990 | 3 | 1.03759 |
| 50 1991 | 3 | 1.25238 |
| 51 1992 | 3 | 0.85759 |



Indice de résolution initial: 4
 Indice de résolution final: 14
 Pas de balayage des indices: 2
 Nombre d'itérations: 17
 Valeur de seuil de convergence: 0.0010

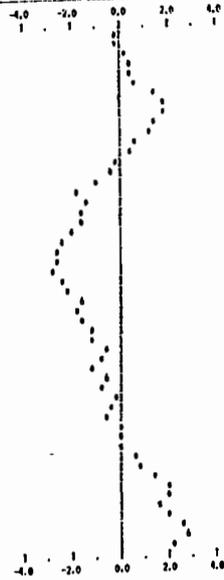
Point d'application | latitude 0 24°15'
 virtuel de vecteur | longitude 0 103°20'

Valeur moyenne de vecteurs 1.07010

Région: 0015 Laguna entera

Périodes: 1923/1993
 Mois début de l'année hydrologique 01

| Date observations | Nombre d'années | Indices annuels |
|-------------------|-----------------|-----------------|
| 1 1942 | 4 | 1.13040 |
| 2 1943 | 4 | 1.52873 |
| 3 1944 | 4 | 1.22215 |
| 4 1945 | 4 | 0.89256 |
| 5 1946 | 4 | 1.29238 |
| 6 1947 | 4 | 1.01813 |
| 7 1948 | 4 | 1.43474 |
| 8 1949 | 4 | 1.04227 |
| 9 1950 | 4 | 0.68114 |
| 10 1951 | 4 | 0.71108 |
| 11 1952 | 4 | 0.64884 |
| 12 1953 | 4 | 0.88243 |
| 13 1954 | 4 | 0.62411 |
| 14 1955 | 4 | 0.89163 |
| 15 1956 | 4 | 0.89079 |
| 16 1957 | 4 | 0.58789 |
| 17 1958 | 4 | 1.38876 |
| 18 1959 | 4 | 0.83454 |
| 19 1960 | 4 | 0.91036 |
| 20 1961 | 4 | 0.74176 |
| 21 1962 | 4 | 0.93340 |
| 22 1963 | 4 | 0.93983 |
| 23 1964 | 4 | 0.96645 |
| 24 1965 | 4 | 0.81864 |
| 25 1966 | 4 | 1.20746 |
| 26 1967 | 4 | 1.42518 |
| 27 1968 | 4 | 1.44847 |
| 28 1969 | 4 | 0.78217 |
| 29 1970 | 4 | 1.24372 |
| 30 1971 | 4 | 1.09141 |
| 31 1972 | 4 | 1.45317 |
| 32 1973 | 4 | 0.85468 |
| 33 1974 | 4 | 0.53668 |
| 34 1975 | 4 | 1.07722 |
| 35 1976 | 4 | 0.91299 |
| 36 1977 | 4 | 1.54754 |
| 37 1978 | 4 | 0.81742 |
| 38 1979 | 4 | 0.86761 |
| 39 1980 | 4 | 0.88799 |
| 40 1981 | 4 | 1.52403 |
| 41 1982 | 4 | 0.87579 |
| 42 1983 | 4 | 1.07221 |
| 43 1984 | 4 | 1.25272 |
| 44 1985 | 4 | 1.03819 |
| 45 1986 | 4 | 2.04871 |
| 46 1987 | 4 | 1.74104 |
| 47 1988 | 4 | 0.94482 |
| 48 1989 | 4 | 0.79442 |
| 49 1990 | 4 | 1.42728 |
| 50 1991 | 4 | 1.42924 |
| 51 1992 | 4 | 1.18717 |
| 52 1993 | 4 | 0.64660 |



Indice de résolution initial: 4
 Indice de résolution final: 14
 Pas de balayage des indices: 2
 Nombre d'itérations: 13
 Valeur de seuil de convergence: 0.0010

Point d'application | latitude 0 25°39'
 virtuel de vecteur | longitude 0 104°30'

Valeur moyenne de vecteurs 1.12742

Figuras 12 a 15. Evolucion temporal de los vectores regionales.

En relación a la sequía de los años 1994 y 1995, ésta se tornó más dramática porque también fue muy dura en la Sierra Madre Occidental (Bovin, 1995), principal proveedora de agua de todo el noroeste de México. Como consecuencia de esta sequía, el abastecimiento de agua de los perímetros circundantes fue problemático (estados de Sonora, Sinaloa, Chihuahua, Coahuila, Durango y Zacatecas).

Anteriormente se han presentado períodos de sequía de tal intensidad, e inclusive de mayor fuerza. En la estación de Tepehuanes se pueden apreciar períodos muy secos en 1926-1929 y en 1950-1952. Por otra parte, el período de 1947 a 1965 está marcado por una larga disminución de las precipitaciones. Los efectos de la sequía fueron más acentuados en los 50 que a principios de los 90. Efectivamente, en estas fechas la demanda de agua en el perímetro de riego era mayor debido parcialmente a las pérdidas por conducción, muy elevadas hasta antes de la cementación de los canales en 1968. De 1950 a 1954, durante cinco años consecutivos, la aportación promedio a la presa fue de 450 millones de m³ por año (promedio de 1946 a 1996: 1 030 Mm³). De 1948 a 1965, las aportaciones sólo dos veces fueron superiores al promedio (en 1955 y 1958). El análisis estadístico indica que la aportación de 1995 tiene un tiempo de retorno de diez años, y la de 1994, sensiblemente más seca, de 21 años. En cambio, una aportación consecutiva de los dos años deficitarios, tiene un tiempo de retorno más elevado, 45 años.

2. LOS FACTORES GEOGRÁFICOS DE LAS PRECIPITACIONES.

2.1 LOS FACTORES REGIONALES.

2.1.1 La importancia del gradiente altitudinal.

La situación de « cruceo climático » de la RH 36, ubicada al sur del gran corredor de los altiplanos norteamericanos, a igual distancia de los dos océanos Pacífico y Atlántico, aporta cierta complejidad en la repartición de las precipitaciones y de algunas características de éstas, aunque se han podido apreciar constantes interesantes en esta repartición.

De manera clásica, el gradiente altitudinal explica bastante bien la repartición espacial de las precipitaciones anuales: la temperatura disminuye al incrementarse la altitud, facilitando la condensación y acentuándose las lluvias. Esto se añade al obstáculo orográfico relacionado con la rugosidad del relieve y exagerado por una buena cobertura de bosques (Escourrou, 1980).

Cabe señalar que en el caso de la RH 36, y debido al paralelismo del eje de la Sierra Madre Occidental con el litoral (la orientación de los dos está relacionada geológicamente), es difícil distinguir el papel del gradiente altitudinal de la distancia al océano: efectivamente, en la vertiente interior (oriental) de la Sierra Madre Occidental, la disminución de la altitud es proporcional al alejamiento del océano (Fig.16). Al realizar un ACP, los dos parámetros redundantes entre sí explican una gran parte de la varianza de la pluviometría, siendo aún más explicativa la distancia al Pacífico.

En toda la RH 36, la relación precipitación/altitud tiene la forma siguiente (para los años 1941-1990):

$$P = 0.3 \text{ Alt} - 97$$

$$R^2 = 0.74 \text{ (para 59 estaciones)}$$

Al separar las dos principales sub-cuencas (Nazas y Aguanaval), cuya orientación y dirección difieren sensiblemente, se nota:

Para la cuenca del Nazas $P = 0.32 \text{ Alt} - 128$ $R^2 = 0.78$

Para la cuenca del Aguanaval $P = 0.21 \text{ Alt} + 5$ $R^2 = 0.80$

o $P = 852 \log(\text{Alt}) - 2\,286$ $R^2 = 0.85$

El gradiente es de 32 mm/100 m en la cuenca del Nazas, y de 21 mm/100 m en la del Aguanaval; esta diferencia importante se puede explicar por:

* Un relieve más vigoroso (crestas más elevadas, valles más profundos), lo que incrementa los efectos de obstáculos y de abrigos topográficos, y probablemente el efecto de Foehn (Fig. 16).

* El hecho que la cuenca alta del río Aguanaval no esté en contacto con los relieves más altos de la Sierra Madre Occidental, pero ya en un parteaguas secundario: las masas de aire, procedentes del suroeste no tienen tanta humedad como en la Sierra Madre, lo que compensa su ubicación más meridional, *a priori* más húmeda.

Con el fin de evaluar el papel de otros factores físicos sobre la repartición espacial de las precipitaciones anuales (PRE), se seleccionaron, además de la altitud (ALT), seis variables explicativas suplementarias:

- Distancia al océano Pacífico (OCE)
- Coordenadas geográficas (LAT y LON)
- Densidad de vegetación en los alrededores de la estación pluviométrica, en

una área de 30 hectáreas (VG1), de 16 km² (VG2) y de 94 km² (VG3); ésta es el promedio de los valores del NDVI (índice de la diferencia normalizada de vegetación) medido en 49; 2 601 y 14 641 píxeles de imágenes Landsat MSS de 1992. Las correlaciones entre variables aparecen en el Cuadro 5.

CUADRO 5. MATRIZ DE CORRELACION DE LAS VARIABLES.

| | PRE | ALT | OCE | LAT | LON | VG1 | VG2 | VG3 |
|-----|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| PRE | 1 | 0.85 | -0.85 | 0.32 | 0.70 | 0.58 | 0.65 | 0.63 |
| ALT | | 1 | -0.75 | -0.55 | 0.49 | 0.57 | 0.57 | 0.51 |
| OCE | | | 1 | 0.38 | -0.84 | -0.48 | -0.54 | -0.57 |
| LAT | | | | 1 | 0.12 | -0.11 | -0.22 | -0.11 |
| LON | | | | | 1 | 0.42 | 0.45 | 0.54 |
| VG1 | | | | | | 1 | 0.77 | 0.73 |
| VG2 | | | | | | | 1 | 0.93 |
| VG3 | | | | | | | | 1 |

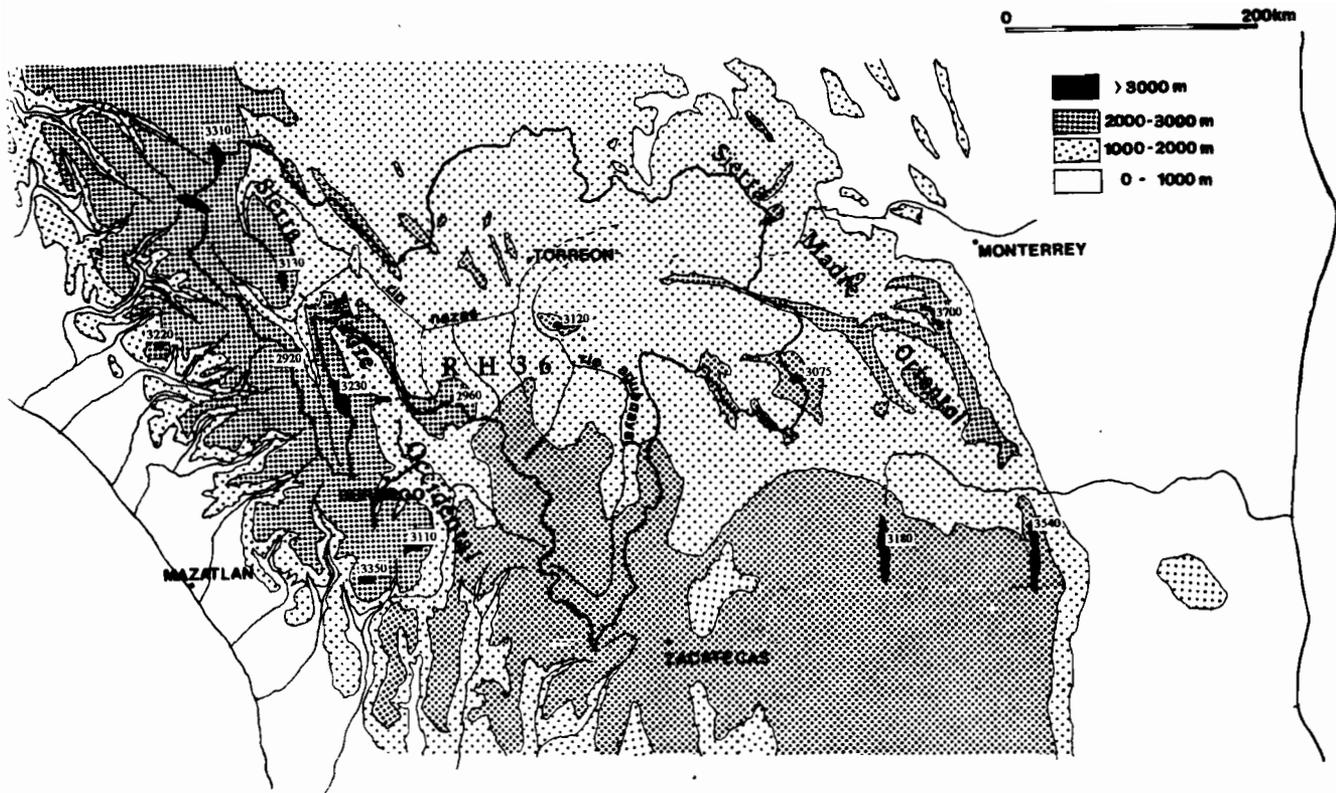


Figura 16. El relieve de la RH 36 y alrededores.

- **La distancia al Pacífico:** es difícil separar la influencia de la distancia al océano Pacífico del efecto de la altitud. En toda la RH 36, la altitud, que va bajando hacia el centro de la depresión endorreica, es inversamente proporcional a la distancia al Pacífico, por donde entran las masas de aire húmedo que provocan la mayoría de las precipitaciones en las partes más lluviosas de la cuenca; los flujos procedentes del este son menos frecuentes, al contrario de lo que se observa en regiones más meridionales del altiplano mexicano.

En la matriz de correlación (Cuadro5) se nota que la altitud (ALT) y la distancia al Pacífico (OCE) tienen el mismo coeficiente de correlación (aproximadamente 0.85) con la pluviometría. Pero refiriéndose a las correlaciones entre variables y componentes principales (Cuadro 6), también se puede ver que la distancia al océano es la variable mejor correlacionada con el eje 1 (determinado también por la pluviometría anual, la altitud y la vegetación regional): parece entonces que es esta variable la que *a priori* explica mejor la repartición de las lluvias en la RH 36.

CUADRO 6. CORRELACIONES ENTRE VARIABLES Y COMPONENTES PRINCIPALES.

| VARIABLES | EJE 1 | EJE 2 | EJE 3 |
|-----------|-------|-------|-------|
| PRE | -0.91 | 0.17 | 0.20 |
| ALT | -0.83 | 0.43 | 0 |
| OCE | 0.88 | -0.22 | -0.34 |
| LAT | 0.35 | -0.79 | 0.43 |
| LON | -0.74 | -0.19 | 0.61 |
| VG1 | -0.69 | -0.40 | -0.40 |
| VG2 | -0.85 | -0.29 | -0.36 |
| VG3 | -0.84 | -0.37 | -0.23 |

La relación con la precipitación anual se mejora en una regresión múltiple:

$$P = 0.18 \text{ ALT} - 0.77 \text{ OCE} + 339 \quad R^2 = 0.8 \text{ (para 59 observaciones)}$$

- **La latitud y la longitud:** el mismo tipo de comparación se realizó con las coordenadas geográficas de las estaciones. Aunque el trazado de las isoyetas (ver Fig.7) y del relieve (Fig.16) de manera transversal de NO a SE, pudiera indicar una mejor relación debida en gran parte al paralelismo de las isoyetas con las isoypsas (curvas de nivel). De manera similar, al tomar en cuenta la vegetación existe una mejor relación múltiple (aunque no se mejora significativamente, dado que son variables obviamente redundantes).

2.2 LOS FACTORES LOCALES DE LAS PRECIPITACIONES.

* La altitud.

En las tres series de cuencas que se estudiaron para el balance hidrográfico de la RH 36, también se aprecia un gradiente altitudinal de la pluviometría anual media.

- En la zona árida, la cuenca de La Ventana (3 km²) está equipada con ocho pluviómetros, presentó un gradiente de sólo 3.3 mm/100 m (30 para la RH 36) debido probablemente al clima árido.

- En la zona semiárida, la cuenca de Atotonilco (350 km²) cuenta con un gradiente altitudinal de 34 mm/100 m.

- En la parte subhúmeda se determinó el gradiente altitudinal de la pluviometría mediante diferentes transectos, considerando todos los tipos de orientación; desde el parteaguas con la vertiente pacífica de la Sierra Madre Occidental hasta el límite con la zona semiárida (aproximadamente la isoyeta de 500 mm). De esta forma, el gradiente medio calculado es de 38 mm/100m (contra 32 mm/100 m en la cuenca del Nazas);

*** Los otros factores.**

Para analizar al nivel local todos los factores que se conocen y que pueden influenciar la pluviometría se realizó un análisis factorial de correspondencia (AFC) a fin de poder incluir en este estudio variables no cuantitativas. Se utilizaron nuevamente algunas variables numéricas asignándoles una clave cualitativa (Cuadro 7).

Considerando únicamente las dos primeras componentes (que sólo explican 40 por ciento de la varianza), el AFC permitió agrupar las variables en cuatro conjuntos, de los cuales los dos últimos tienen muchas interconexiones (Fig.17):

CUADRO 7. LAS VARIABLES DEL AFC.

| Pluviometría anual media | | Distancia al Pacífico | | Altitud |
|----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------|--------------------|
| TFP | P < 300 mm | TFM | D < 250 km | TBA A < 1200 m |
| FAP | 300-400 mm | FAM | 250-300 km | BAA 1200 1600 |
| MOP | 400-500 mm | MOM | 300-350 km | MOA 1600 2000 |
| ELP | 500-600 mm | MDM | 350-400 km | HAA A > 2000 m |
| TEPP > 600 mm | | ELM | 400-450 km | |
| | | TEM | D > 450 km | |
| | | | | |
| Vegetación local (30 ha) | Regional (16 km ²) | General (94 km ²) | | Tipo de sitio |
| LTF | RTF | GTF | NDVI 120-128 | FON fondo de valle |
| LFA | RFA | GFA | NDVI 128-135 | VER vertiente |
| LMO | RMO | GMO | NDVI 135-141 | PLA planicie |
| LEL | REL | GEL | NDVI 141-146 | FVE valle profundo |
| LTE | RTE | GTE | NDVI 146-154 | COL puerto |
| | | | | PIE pie de monte |
| Exposición del sitio (XXL) | | Exposición de la región (XXR) | | |
| NNL y NNR | Norte | EEL y EER | Este | |
| NEL y NER | Noreste | SEL y SER | Sureste | |
| NWL y NWR | Noroeste | SWL y SWR | Suroeste | |
| WWL y WWR | Oeste | SSL y SSR | Sur | |

* El primero agrupa precipitaciones muy bajas con poca vegetación, gran distancia al océano, planicie y altitud baja; son las estaciones de la zona árida.

* El segundo agrupa precipitaciones bajas a medias, densidad vegetal media, sitios de puerto y pie de monte, distancia media al océano, altitud entre 1 200 y 1 600 m, mayor exposición al norte y al este. Este grupo corresponde a los alrededores norte, oeste y sur de la Laguna.

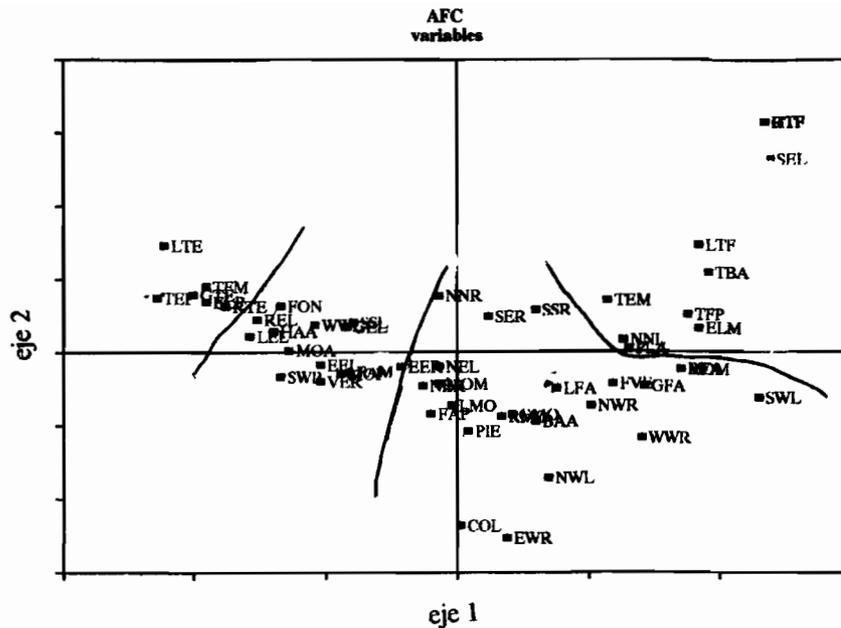


Figura 17. El espacio de las variables del AFC.

* El tercer grupo corresponde a una pluviometría media (400-500 mm), una vegetación bastante densa, una menor distancia al océano (250-300 km), una altitud elevada (1 600-2 000 m), exposiciones variadas que son las de los valles y vertientes de la Sierra Madre y algunas partes altas de la cuenca del Aguanaval.

* El último grupo abarca una pluviometría más importante, mayores densidades vegetales, cercanía al océano, y son las características de las estaciones más altas de la Sierra.

* La exposición.

Se pudo determinar, particularmente en la Sierra Madre Occidental, que a pesar de la poca diferencia de latitud (tres grados como máximo), la vegetación muestra una clara oposición entre las vertientes expuestas al norte y las expuestas al sur. Esto se observa de manera clara en la cuenca del río Tepehuanes y en la del río Sextín, así como en los valles de los arroyos que desembocan a la presa El Palmito: entre 1 700 y 2 000 msnm, también se aprecia que las vertientes expuestas al sur están cubiertas por una formación de sabana de acacias, y las que están expuestas al norte están cubiertas por una sabana de encinos; esto se debe probablemente al contraste de exposición a los rayos del sol que aridifica las vertientes más expuestas. Arriba de 2 000 metros, domina el bosque de encinos, y arriba de 2 500 metros el bosques de pinos. La altitud es el factor principal de explicación de la vegetación.

A nivel de la pluviometría se quiso establecer la existencia local de contrastes de exposición en las vertientes. Se dispusieron transectos de captos pluviométricos en la Sierra Madre Occidental a través de toda la cuenca alta del Nazas, del parteaguas con el Pacífico (puerto Buenos Aires, cerca a Tepehuanes) hasta el límite de la RH 36 cerca de Santa María del Oro, o sea, un transecto de 100 km. Se dispusieron los transectos de tal forma que cubrieran todos los tipos de exposición a las masas de aire oceánico (suroeste o noreste) según su ubicación en relación con los parteaguas intermedios (Fig. 18).

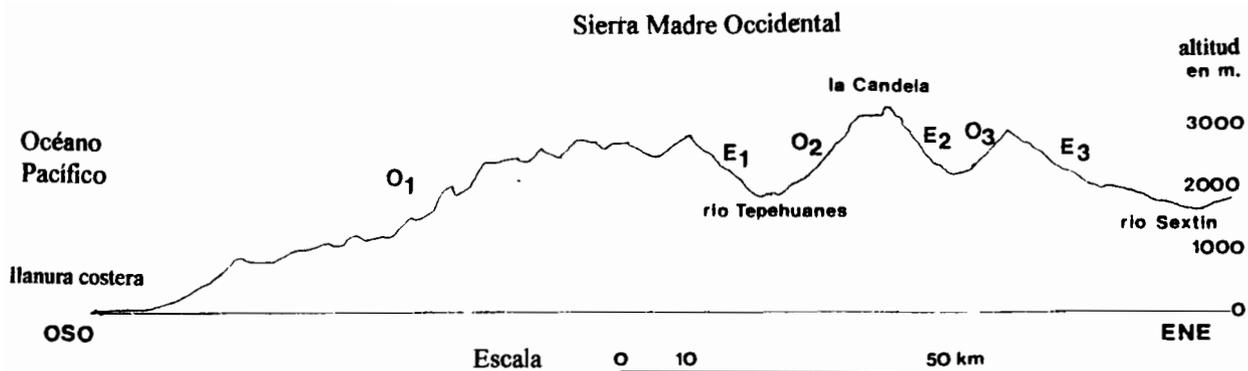


Figura 18. Tipos de exposición de las vertientes de la Sierra Madre.

La Figura 19 muestra cómo se agrupan en la relación pluviometría/altitud las estaciones de acuerdo a su ubicación y tipo de vertiente: existe mayor pluviometría en la primera vertiente expuesta al este, en tanto que la segunda vertiente de misma exposición registró una menor pluviometría anual acentuándose aún más en la tercera vertiente. En cambio, fuera de la vertiente pacífica de la Sierra Madre, las vertientes expuestas al oeste no tienen diferencias sensibles de pluviometría al alejarse del litoral.

Se puede apreciar que la principal diferencia está en el valle del río Tepehuanes, donde la vertiente expuesta al este recibe una pluviometría superior de 100 a 150 mm anuales que la vertiente expuesta al oeste, aunque ésta se encuentre protegida de los vientos del suroeste (sotavento). Al parecer, el hecho de estar cerca del parteaguas tiene un papel más relevante que el de la exposición, siendo nuevamente la distancia al océano la variable que domina.

*** El tipo de ubicación de la estación.**

Como se observa en el Cuadro 7, a cada estación se le atribuyó un tipo de localización. En el AFC se presentan éstas con su ubicación en el espacio de las variables (Fig. 17). Debido a la cercanía del océano Pacífico y a la importancia que representa el obstáculo orográfico de la Sierra Madre Occidental no es extraño que las estaciones de valle con altitud similar, reciban mayor pluviometría que las de llanura. En cambio, *a priori*, es poco común que la pluviometría sea superior en el valle del río Sextín que en el del río Ramos (y sus componentes, el Santiago y el Tepehuanes) con altitudes similares, dado que están más cerca al parteaguas del Pacífico. Esto se puede explicar de la manera siguiente:

- A menos de 2 000 msnm, las estaciones del valle del Sextín pueden ser favorecidas por precipitaciones procedentes del este, las cuales están protegidas las estaciones del valle del Ramos (Fig. 16);

- Arriba de 2 000 msnm, las estaciones del Alto Sextín, beneficiadas por una mayor pluviometría debido a la altitud, se localizan en una orografía más abierta que las que están al fondo de los valles del Santiago y del Tepehuanes, y de hecho, menos sometidas al efecto de Foehn.

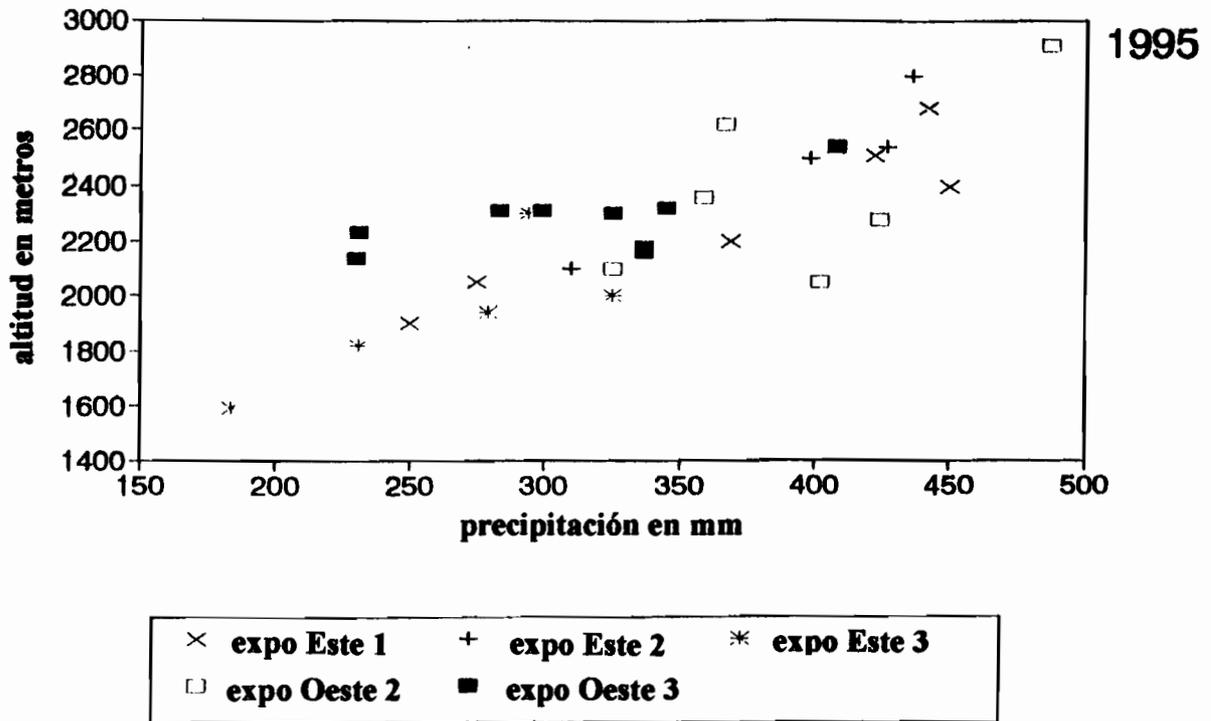


Figura 19. Gradiente altitudinal pluviométrico y exposición.

CONCLUSIÓN

La regionalización de las precipitaciones por los métodos estadísticos empleados es similar a la realizada considerando el gradiente altitudinal (Estrada *et al*, 1993); esto resulta lógico dada la estrecha correlación que existe entre pluviometría y altitud. Muchos de los otros parámetros aportan redundancias (distancia al Pacífico, coordenadas geográficas, vegetación), pero mejoran las relaciones de la regresión múltiple.

Sin embargo, la regionalización utilizando el método del vector regional, más allá de las correcciones de datos de las estaciones, aporta una precisión suplementaria al tomar en cuenta la totalidad de las crónicas disponibles; a diferencia de las relaciones que se establecieron a partir de los promedios interanuales totales dependientes de la altitud, lo cual no permite una comparación del comportamiento pluviométrico.

En la Sierra Madre es donde las áreas cubiertas por un vector son más extensas, y la pseudo-proporcionalidad entre estaciones es mayor; esto se observa más claramente en la vertiente del Pacífico de dicha Sierra, fuera de la RH 36. En la zona semiárida (mesetas del Aguanaval y, en parte fuera de la RH 36, las mesetas de Durango), las relaciones entre estaciones son buenas. En cambio, en las zonas más secas, Laguna y Bolsón de Mapimí, las hipótesis de pseudo-proporcionalidad en muchos casos no se pueden comprobar (con coeficientes superiores a 0.2 en MVR). Es un hecho conocido que la irregularidad espacio-temporal de las precipitaciones aumenta con la aridez, y aquí se comprueba esta observación al punto que las correcciones propuestas por el MVR son numerosas y muchas veces difíciles de aceptar. De hecho, se debió crear en la Laguna una subregión en la cual se respeta la hipótesis de pseudo-proporcionalidad.

Se nota que cuando va disminuyendo la pluviometría se incrementa la irregularidad interanual, el método puede tener dificultades debido al menor tamaño de los « campos pluviométricos ». Las mismas dificultades aparecen en las regiones sahelianas (Albergel, 1988), así como en las zonas áridas andinas o litorales del sur de Ecuador (Nouvelot *et al*, 1994).

Se confirmó el papel importante de la altitud, se observó que la distancia al Pacífico puede ser la primer variable explicativa de la repartición de las lluvias, pero el paralelismo de la costa y de la sierra hace redundantes estos parámetros. El estudio de correlación múltiple permitió demostrar la poca influencia que tienen las otras variables (exposición, vegetación y tipo de sitio).

LITERATURA CONSULTADA

- Albergel, J. 1988. Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso Etudes et Thèses, éditions ORSTOM, 273p + anexos, Paris.
- Bouvier, Ch. 1983. Etude des effets de dépendance dans une série chronologique, application à l'étude des séquences de jours de pluie Cahiers Orstom, sér. Hydrol. (XX) 2: 79-116, Paris.
- Bovin, Ph. 1995. Les sécheresses au Mexique, en Sécheresse, Vol.6, N°1, marzo 1995, pp.53-78.
- Brouste, L. 1996. Hydrochimie et géochimie isotopique de la nappe phréatique de la Comarca Lagunera (Nord-Mexique), tesis de doctorado, Université Paris-Sud-Orsay, 220p.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 1976. Atlas del Agua, México, 360 p.
- Cornet, A. 1993. Principales caractéristiques climatiques, en Actas del Seminario Mapimí, Gómez Palacio, Dgo. oct 1989, pp 57-64.
- Delhoume, J.P. 1995. Fonctionnement hydro-pédologique d'une toposéquence de sols en milieu aride (Réserve de la Biosphère de Mapimí, Nord-Mexique), tesis de doctorado, Universidad de Poitiers, Francia, 293 p.
- Descroix, L. 1993. Hidrometría, cap. en Estudio de los factores que influncian el escurrimiento del agua en la RH 36 public. ORSTOM-CENID-RASPA, Gómez Palacio, Dgo., 330 p.
- Escourrou, G. 1980. Climat et environnement: les facteurs locaux du climat; manual de geografia, Masson, Paris, 230p.
- Estrada A., J. 1993. Pluviometría, cap. en Estudio de los factores que influncian el escurrimiento del agua en la RH 36 public. ORSTOM-CENID-RASPA, Gómez Palacio, Dgo., 330 p.
- _____ 1995. Modélisation conceptuelle appliquée aux bassins versants du Nord-Mexique DEA N° d'Hydrologie, USTL, Montpellier, Francia, 74 p.
- González B., J.L. 1992. Eaux d'irrigation et salinité des sols en zone aride mexicaine: exemple dans la Comarca Lagunera, tesis de doctorado, Université Montpellier II, 315 p.
- Hiez, G. 1977. L'homogénéité des données pluviométriques, cahiers ORSTOM, serie Hidrología, Vol. XIV, N°2, pp 129-172.
- Hiez, G. y J. Cochonneau. 1992. MVR 1.5, la Méthode du Vecteur Régional, instructivo del paquete informático de regionalización pluviométrica, ORSTOM, Laboratorio de Hidrología, Montpellier, Francia, 200 p.

- Lebel, Th. 1988. Dixloi, logiciel de fonctions statistiques pour l'hydrologie, ORSTOM, laboratorio de Hidrología, Montpellier, Francia.
- Lebel, Th. y J.P. Laborde. 1988. A geostatistical approach for areal rainfall statistics assessment, en Stochastic Hydrology and Hydraulics, 2 (1988), pp. 245-261.
- Nouvelot, J.F. y Pourrut, P. 1994. Anomalies et phénomènes climatiques extrêmes in l'eau en Equateur, pp 87-98, Orstom, Paris.
- Nouvelot, J.F.; P. Le Goulven y P. Pourrut. 1994. Analyse statistique et régionalisation des précipitations en Equateur in L'eau en Equateur pp 43-86, ORSTOM, Paris.
- Nouvelot, J.F. y L. Descroix. 1996. Aridité et sécheresses du Nord-Mexique in Trace (revista del Centro Francés de estudios Mexicanos y Centro Americanos, México), N°30, Dic. 1996, pp 9-25.
- Rigal, G. 1988. Etude du problème de l'irrigation dans une région agricole du Centre-Nord du Mexique; reporte de titulación del Institut National Agronomique Paris Grignon, 100p.
- Santibañez, E. 1992. La Comarca Lagunera, ensayo monográfico Ed. E. Santibañez, 266p, Torreón, Méx, 266 p.

ANEXO 1. LISTA DE LAS ESTACIONES.

| # Mapas | #clicom | Estación | latitud | longitud | altitud |
|---------|---------|---------------------------------|---------|----------|---------|
| 1 | 12 | CONG. HIDALGO | N253000 | O103070 | 1120 |
| 2 | 13 | CENID-RASPA | N253530 | O103270 | 1130 |
| 3 | 22 | ESTANQUE DEL LEON | N260600 | O102120 | 1350 |
| 4 | 32 | HIGUERAS | N250200 | O104310 | 1420 |
| 5 | 39 | LA ROSITA | N251600 | O103130 | 1190 |
| 6 | 40 | LA FLOR | N250600 | O103200 | 1280 |
| 7 | 74 | TANQUE AGUILEREÑO | N244830 | O102580 | 1460 |
| 8 | 75 | TORTUGAS | N262800 | O103440 | 1155 |
| 9 | 5001 | AGUA NVA.SN.P.DE LAS COLONIAS | N254500 | O103000 | 1094 |
| 10 | 5004 | BAJIO DE AHUICHILA | N250700 | O102373 | 1300 |
| 11 | 5006 | COL. TORREON JARDIN, TORREON | N253200 | O103270 | 1130 |
| 12 | 5007 | CONCORDIA SAN PEDRO DE LAS COL. | N254700 | O103070 | 1100 |
| 13 | 5009 | CUATRO CIENEGAS | N265900 | O102050 | 740 |
| 14 | 5011 | EJIDO REATA | N260800 | O101050 | 950 |
| 15 | 5016 | GENERAL CEPEDA | N252300 | O101280 | 1480 |
| 16 | 5018 | LAS NIEVES | N254500 | O102000 | 1140 |
| 17 | 5022 | OCAMPO | N271900 | O102240 | 1050 |
| 18 | 5024 | PARRAS | N252630 | O102110 | 1520 |
| 19 | 5026 | PRESA COYOTE | N253200 | O103295 | 1140 |
| 20 | 5027 | EL CUIJE | N254140 | O103203 | 1120 |
| 21 | 5028 | PRESA DE GUADALUPE | N254530 | O103131 | 1110 |
| 22 | 5029 | PRESA LA FLOR | N250400 | O103170 | 1295 |
| 23 | 5036 | SAN PEDRO, COAH. | N254530 | O102590 | 1095 |
| 24 | 5037 | SAN VICENTE PARRAS | N253700 | O102130 | 750 |
| 25 | 5038 | SANTA TERESA CASTAÑOS | N262300 | O101220 | 1050 |
| 26 | 5039 | SIERRA MOJADA | N271700 | O103420 | 1252 |
| 27 | 5041 | VIESCA | N252000 | O102480 | 1100 |
| 28 | 5044 | CUATRO CIENEGAS | N265900 | O102050 | 740 |
| 29 | 5047 | MONCLOVA | N265400 | O101250 | 600 |
| 30 | 5048 | SALTILLO | N252500 | O101020 | 1600 |
| 31 | 5051 | VIESCA | N252000 | O102480 | 1093 |
| 32 | 5060 | DERRAMADERO | N251600 | O101150 | 1780 |
| 33 | 5130 | LA SAUCEDA | N255100 | O101190 | 1020 |
| 34 | 5133 | LA VENTANA | N251930 | O103260 | 1240 |
| 35 | 5139 | EMILIANO ZAPATA | N253000 | O102560 | 1090 |
| 36 | 5157 | SAN FRANCISCO DEL VALLE | N261900 | O102490 | 890 |
| 37 | 5159 | ACATITA | N262800 | O103010 | 1100 |
| 38 | 8003 | BABORIGAME (GPE Y CALVO) | N262600 | O107160 | 1870 |
| 39 | 8005 | BALLEZA | N265800 | O106200 | 1580 |
| 40 | 8042 | CHINATU (GPE Y CALVO) | N261300 | O106460 | 2030 |
| 41 | 8045 | DOLORES (GPE Y CALVO) | N255900 | O107100 | 1000 |
| 42 | 8054 | EL ORO S. F. DEL ORO | N262400 | O105310 | 1445 |
| 43 | 8061 | EL VERGEL | N262800 | O106230 | 2750 |
| 44 | 8062 | ESCALON | N264500 | O104203 | 1263 |
| 45 | 8071 | GUACHOCHIC | N264900 | O107030 | 2410 |
| 46 | 8073 | GPE Y CALVO | N260600 | O106580 | 2300 |
| 47 | 8074 | HIDALGO DEL PARRAL | N265600 | O105390 | 1450 |
| 48 | 8128 | SAN PEDRO (GPE Y CALVO) | N261100 | O106380 | 2600 |

| | | | | | |
|----|-------|-------------------------|---------|---------|------|
| 49 | 8130 | SANTA BARBARA | N264800 | O105400 | 1500 |
| 50 | 8145 | TOAHAYANA | N260900 | O107420 | 300 |
| 51 | 8156 | VILLA CORONADO | N244400 | O105100 | 1520 |
| 52 | 8186 | PRESA TORREONCILLOS | N264000 | O105300 | 1700 |
| 53 | 8197 | DOLORES (MINERAL) | N260000 | O107100 | 1000 |
| 54 | 8321 | SAN JUAN CHINATU | N261300 | O106390 | 2700 |
| 55 | 10001 | ATOTONILCO | N243830 | O103420 | 1960 |
| 56 | 10002 | CANATLAN | N243130 | O104463 | 1980 |
| 57 | 10003 | CANELAS | N250700 | O106330 | 1350 |
| 58 | 10004 | CAÑON DE FERNANDEZ | N251600 | O103454 | 1200 |
| 59 | 10005 | CEBALLOS | N263100 | O104080 | 1188 |
| 60 | 10006 | CENDRADILLAS GENERACION | N261700 | O106010 | 2250 |
| 61 | 10007 | CIENEGA DE ESCOBAR | N253640 | O105443 | 2170 |
| 62 | 10008 | 5 DE MAYO | N254600 | O104180 | 1700 |
| 63 | 10010 | IGNACIO ZARAGOZA | N242200 | O105090 | 2250 |
| 64 | 10012 | CUENCAME | N245220 | O103420 | 1580 |
| 65 | 10014 | CHARCO VERDE (EL SALTO) | N235800 | O105270 | 2163 |
| 66 | 10015 | CHARCOS (MEZQUITAL) | N230100 | O104180 | 2800 |
| 67 | 10016 | CHINACATES (SANTIAGO) | N250100 | O105120 | 2080 |
| 68 | 10017 | DURANGO, DGO. | N240300 | O104400 | 1880 |
| 69 | 10018 | EL CANTIL, (SANTIAGO) | N250400 | O106170 | 2500 |
| 70 | 10019 | EL CARMEN | N235100 | O104550 | 2035 |
| 71 | 10020 | EL DERRAME | N262120 | O104163 | 1270 |
| 72 | 10021 | PALMITO | N253730 | O105002 | 1540 |
| 73 | 10022 | EL PINO (CANATLAN) | N243500 | O104540 | 2004 |
| 74 | 10023 | EL PUEBLITO | N235400 | O104150 | 1770 |
| 75 | 10024 | EL SALTITO | N240000 | O104220 | 1889 |
| 76 | 10025 | EL SALTO (PUEBLO NUEVO) | N234700 | O105220 | 2520 |
| 77 | 10026 | TARAHUMAR | N254000 | O106210 | 2850 |
| 78 | 10027 | FRANCISCO I. MADERO | N254500 | O103150 | 1930 |
| 79 | 10028 | FRANCISCO PRIMO VERDAD | N245400 | O104280 | 1550 |
| 80 | 10029 | GUANACEVI | N255550 | O105573 | 2060 |
| 81 | 10030 | GUADALUPE VICTORIA | N242700 | O104080 | 2000 |
| 82 | 10031 | HUAHUAPAN SAN DIMAS | N243100 | O105570 | 1150 |
| 83 | 10032 | HUATZMOTA MEZQUITAL | N225500 | O105110 | 1150 |
| 84 | 10033 | IGNACIO ALLENDE | N242800 | O103590 | 1950 |
| 85 | 10035 | SALOME ACOSTA | N251330 | O105265 | 1670 |
| 86 | 10036 | LA CIUDAD | N234400 | O105420 | 2670 |
| 87 | 10037 | LA HUERTA | N252100 | O105420 | 1300 |
| 88 | 10038 | LA PEÑA | N233400 | O105280 | 2800 |
| 89 | 10039 | LA ZARCA | N254900 | O104440 | 1840 |
| 90 | 10040 | LAS BAYAS | N233000 | O104483 | 2650 |
| 91 | 10042 | LAS TRUCHAS | N242800 | O105583 | 2400 |
| 92 | 10043 | LAS VEGAS (SAN DIMAS) | N240500 | O105240 | 2230 |
| 93 | 10044 | LLANO GRANDE | N235200 | O105120 | 2400 |
| 94 | 10045 | MAPIMI | N255000 | O103510 | 1300 |
| 95 | 10047 | NARCIZO MENDOZA | N240100 | O103580 | 2000 |
| 96 | 10048 | NAVIOS VIEJOS | N235300 | O105030 | 2550 |
| 97 | 10049 | NAZAS | N251330 | O104070 | 1260 |
| 98 | 10050 | OJITOS DE CAMELLONES | N250300 | O106130 | 2400 |
| 99 | 10051 | OTINAPA | N240300 | O105010 | 2400 |

| | | | | | |
|-----|-------|-----------------------------|---------|---------|------|
| 100 | 10052 | PANUCO DE CORONADO | N243220 | O104193 | 2140 |
| 101 | 10053 | PEÑOLES | N253900 | O104320 | 1945 |
| 102 | 10054 | PEÑA DEL AGUILA | N241200 | O104390 | 1940 |
| 103 | 10055 | PEDRICENA | N250730 | O103470 | 1330 |
| 104 | 10056 | PEÑON BLANCO | N244710 | O104021 | 1680 |
| 105 | 10057 | PRESA STA. ELENA SUCHIL | N232300 | O104150 | 2480 |
| 106 | 10058 | PUEBLO NUEVO | N232300 | O105230 | 1600 |
| 107 | 10059 | RAMON CORONA | N241100 | O103373 | 2130 |
| 108 | 10060 | RODEO | N251100 | O104340 | 1850 |
| 109 | 10061 | ROSARIO | N263000 | O105380 | 1780 |
| 110 | 10062 | SAN ANTONIO | N262400 | O105200 | 1680 |
| 111 | 10063 | SAN BARTOLO | N244100 | O103130 | 1687 |
| 112 | 10064 | SAN DIMAS | N240900 | O105570 | 970 |
| 113 | 10065 | SAN FCO. DEL MEZQUITAL | N232900 | O104240 | 1420 |
| 114 | 10067 | SAN JUAN DE GPE. | N243800 | O102470 | 1520 |
| 115 | 10068 | SAN JUAN DEL RÍO | N244700 | O104273 | 1700 |
| 116 | 10069 | SAN LUIS DEL CORDERO | N252500 | O104164 | 1480 |
| 117 | 10070 | SAN MARCOS | N241800 | O103330 | 2050 |
| 118 | 10071 | SAN MIGUEL DE LOBOS | N250900 | O105580 | 2380 |
| 119 | 10072 | SAN PEDRO DEL GALLO | N253400 | O104173 | 1660 |
| 120 | 10073 | SANTA BARBARA | N235000 | O104560 | 2280 |
| 121 | 10074 | SANTA CLARA | N242830 | O103220 | 1800 |
| 122 | 10075 | STA. MA. DEL ORO | N255700 | O105215 | 1700 |
| 123 | 10076 | SANTIAGO BAYACORA | N235300 | O104370 | 1880 |
| 124 | 10078 | SARDINAS | N260500 | O105340 | 1650 |
| 125 | 10079 | SIANORI TOPIA | N251600 | O106460 | 800 |
| 126 | 10080 | SIMON BOLIVAR | N244120 | O103133 | 1525 |
| 127 | 10081 | SUCHIL | N233700 | O103560 | 1980 |
| 128 | 10082 | TAMAZULA | N245800 | O106590 | 1580 |
| 129 | 10083 | TEJAMEN | N244800 | O105080 | 2090 |
| 130 | 10084 | TEPEHUANES | N252030 | O105432 | 1800 |
| 131 | 10085 | TLAHUALILO | N260630 | O103270 | 1095 |
| 132 | 10086 | TOPIA | N251300 | O106340 | 1780 |
| 133 | 10087 | VASCO GIL CANELAS | N250800 | O106220 | 2400 |
| 134 | 10088 | VICENTE GUERRERO | N234400 | O103590 | 1950 |
| 135 | 10089 | VILLA HIDALGO | N261500 | O104550 | 1754 |
| 136 | 10090 | CANATLAN | N243130 | O104463 | 1950 |
| 137 | 10091 | COLUTA TAMAZULA | N250300 | O106470 | 1135 |
| 138 | 10096 | LA CHAPARRA | N250300 | O105410 | 2100 |
| 139 | 10098 | RODEO | N251100 | O104333 | 1320 |
| 140 | 10100 | SANTIAGO PAPASQUIARO | N250240 | O105251 | 1735 |
| 141 | 10102 | GUATIMAPE, CANATLAN | N244500 | O104550 | 1990 |
| 142 | 10108 | LERDO | N253200 | O103313 | 1130 |
| 143 | 10109 | HACIENDA EL OJO VILLA UNION | N261000 | O104300 | 1300 |
| 144 | 10118 | ABASOLO | N251900 | O104390 | 1380 |
| 145 | 10121 | LOS ALTARES | N250000 | O105540 | 2500 |
| 146 | 10122 | SAN DIEGO | N245300 | O106080 | 1640 |
| 147 | 10124 | LA FLOR | N250600 | O103200 | 1260 |
| 148 | 10125 | LA ROSILLA GUANACEVI | N260730 | O106200 | 2810 |
| 149 | 10129 | CONETO DE COMONFORT | N245840 | O104461 | 1950 |
| 150 | 10130 | IGNACIO ZARAGOZA | N242230 | O105090 | 2300 |

| | | | | | |
|-----|-------|----------------------------|---------|---------|------|
| 151 | 10131 | PEÑON BLANCO DGO. | N244710 | O104021 | 1610 |
| 152 | 10134 | CONEJOS MAPIMI | N261400 | O103520 | 1135 |
| 153 | 10135 | CUAUHTEMOC | N241630 | O103483 | 2175 |
| 154 | 10136 | 12 DE DICIEMBRE | N244230 | O103341 | 1960 |
| 155 | 10138 | SAN BERNARDO | N260000 | O105313 | 1640 |
| 156 | 10139 | AGUA PUERCA | N261410 | O104293 | 1400 |
| 157 | 10140 | LA CADENA | N255220 | O104093 | 1510 |
| 158 | 10142 | EL CASCO | N253230 | O104350 | 1850 |
| 159 | 10143 | INDE | N255450 | O105134 | 1870 |
| 160 | 10146 | YERBANIS | N244420 | O103503 | 1890 |
| 161 | 10147 | EL ZAPE | N254610 | O105473 | 1960 |
| 162 | 10149 | GRAL. ESCOBEDO | N253100 | O105143 | 1570 |
| 163 | 10150 | LUIS MOYA | N243300 | O103575 | 1920 |
| 164 | 10161 | YERMO | N262400 | O104010 | 1180 |
| 165 | 25006 | BADIRAGUATO | N252200 | O107330 | 170 |
| 166 | 25011 | CONCORDIA | N231600 | O106040 | 178 |
| 167 | 25015 | CULIACAN | N244800 | O107210 | 40 |
| 168 | 25012 | COSALA | N242500 | O106420 | 366 |
| 169 | 25021 | DIMAS SAN IGNACIO | N234400 | O106480 | 12 |
| 170 | 25029 | EL PALMITO CONCORDIA | N233300 | O105501 | 1875 |
| 171 | 25034 | ESCUINAPA | N225000 | O105480 | 14 |
| 172 | 25030 | EL PLAYON ANGOSTURA | N251300 | O108100 | 5 |
| 173 | 25036 | GUADALUPE DE LOS REYES | N241400 | O106300 | 650 |
| 174 | 25047 | JOCUIXTITA SAN IGNACIO | N241400 | O106160 | 1150 |
| 175 | 25064 | MOCORITO | N252900 | O107550 | 60 |
| 176 | 25070 | PANUCO CONCORDIA | N232600 | O105450 | 600 |
| 177 | 25072 | PIAXTLA SAN IGNACIO | N235600 | O106250 | 600 |
| 178 | 25073 | PLOMOSAS ROSARIO | N230400 | O105280 | 850 |
| 179 | 25074 | POTRERILLOS CONCORDIA | N232700 | O105500 | 1600 |
| 180 | 25091 | SIQUEIROS MAZATLAN | N232000 | O106140 | 55 |
| 181 | 25092 | SOYATITA BADIRAGUATO | N254500 | O107190 | 670 |
| 182 | 25093 | SURUTATO BADIRAGUATO | N254800 | O107340 | 1500 |
| 183 | 25098 | TOPOLOBAMPO AHOME | N253700 | O109030 | 34 |
| 184 | 32005 | CAÑITAS DE FELIPE PESCADOR | N233700 | O102440 | 2020 |
| 185 | 32006 | CAZADERO | N234000 | O103070 | 1930 |
| 186 | 32012 | CHALCHIHUITES | N232900 | O103530 | 2280 |
| 187 | 32018 | EL SAUZ | N233000 | O103140 | 2100 |
| 188 | 32020 | FRESNILLO | N231100 | O102520 | 2200 |
| 189 | 32022 | LA GRUÑIDORA | N241300 | O101560 | 1840 |
| 190 | 32022 | GRUÑIDORA MAZAPIL | N241300 | O101560 | 1850 |
| 191 | 32028 | JUAN ALDAMA | N241630 | O103250 | 1980 |
| 192 | 32038 | NIEVES MURGUÍA | N240000 | O103000 | 1950 |
| 193 | 32045 | RIO GRANDE | N235000 | O103010 | 1850 |
| 194 | 32049 | SAN FRANCISCO | N241800 | O102530 | 1670 |
| 195 | 32054 | SOMBRERETE | N233800 | O103380 | 2300 |
| 196 | 32065 | CHALCHIHUITES | N232900 | O103530 | 2280 |
| 197 | 32083 | MIGUEL AUZA | N241700 | O103270 | 1970 |
| 198 | 32087 | CONCEPCION DEL ORO | N243700 | O101250 | 2100 |
| 199 | 32096 | SAN ALTO | N233500 | O103150 | 2050 |
| 200 | 32122 | LUIS MOYA ZAC. | N222600 | O102140 | 1940 |
| 201 | 32129 | PRESA SUSTICACAN | N233600 | O103080 | 2070 |

ANEXO 2

MVR

Principios generales.

El conocimiento de las variaciones espacio-temporales de un elemento climático, por ejemplo la lluvia, esencial para muchas aplicaciones (agronomía, ingeniería, hidráulica, etc.), necesita del acopio de observaciones puntuales en una red de estaciones de medición distribuidas en el espacio. El intervalo de tiempo que separa dos observaciones puede ser muy corto (caso de aparatos registradores) o, al contrario, más largo (diario, semanal, mensual, anual). Sin embargo, la repartición espacial y temporal están fuertemente ligadas. Se puede concebir fácilmente que dos estaciones pluviométricas situadas en una zona geoclimática tengan pluviometrías tanto más ligadas mientras más cercanas estén, y que la pluviometría que registren represente una suma de intervalos más largos. Parece entonces lógico iniciar un trabajo de regionalización a partir de datos acumulados de larga duración, que sean compatibles con la necesidad de percibir alguna tendencia climática regional única, así como un cierto grado de redundancia en los datos acopiados. En algunas partes del mundo los acumulados anuales responden a estos imperativos, por lo que se utilizan en prioridad para posteriormente pasar, si la red de observaciones lo permite, a un estudio de acumulados mensuales.

Un valor puntual (por ejemplo, la pluviometría observada en una estación para un año dado) constituye una « señal » cercana a un promedio regional, estimado a partir del conjunto de una red de estaciones y estando sujeta a variaciones interanuales. Sin embargo, por varias causas como el sitio de la estación, el aparato de medición, el tratamiento de la información, el tipo de difusión, etc., esta señal contiene frecuentemente un cierto número de « errores », por lo que la información de base está constituida por una pareja « señal + error », y es necesario « filtrar » esta información para poder estimar lo mejor posible el valor de la « señal » original. El vector regional es una de las herramientas que permiten corregir los datos alterados.

G. Hiez autor de este método (Hiez y Cochonneau, 1992), define el vector regional de la siguiente manera:

« Una serie cronológica es la síntesis de índices pluviométricos o hidrométricos, anuales o mensuales, procedentes de la extracción de la información más probable contenida en un conjunto de puestos de observación, agrupados por regiones »

Este método se apoya en dos principios fundamentales:

1. *« Los totales anuales o mensuales de estaciones cercanas comprueban la regla de pseudo-proporcionalidad ».*

Si se grafican los datos de dos estaciones cercanas en el tipo de representación en « doble masa », cada año (l) está representado por un punto de coordenadas X_i , Y_i (acumulado de l años del valor físico anual (i) considerado, medido en dos estaciones cercanas; por ejemplo, P_i para la pluviometría anual). Cada vector elemental P_i tiene entonces como coordenadas:

$$x_i = X_i - X_{i-1}$$

$$y_i = Y_i - Y_{i-1}$$

La regla de pseudo-proporcionalidad se escribe entonces:

$$X_i/Y_i = X_{i-1}/Y_{i-1} \quad \text{o} \quad X_i/X_{i-1} = Y_i/Y_{i-1}$$

2. « *La información más probable es la que se repite con mayor frecuencia* »

Se trata aquí de un principio de máxima verosimilitud, muy utilizado en estadística.

La elaboración del vector regional se apoya también en algunas hipótesis de trabajo complementarias:

- No hay variaciones sensibles de tendencias climáticas en un mismo grupo regional de estaciones.

- Toda observación puntual en el espacio y en el tiempo podría ser errónea, una sólo estación no puede, *a priori*, servir de referencia regional.

- Paralelamente, la información global, provista de un conjunto de estaciones, contiene un valor « estimativo » de las fluctuaciones temporales más significativo (en término de representatividad del conjunto regional) que la información generada por cada estación aislada.

Sintetizando, el principio de elaboración del vector regional puede expresarse de la siguiente manera:

« Toda la información contenida en cada estación de observación debe contribuir a la definición del vector, sin que los datos erróneos puedan tener una influencia sensible en el resultado ».

Tratamiento de datos.

El Cuadro de las observaciones (pluviometrías anuales, por ejemplo) representa una matriz provista de dos espacios: el de las estaciones en columna, y el de los años en línea:

$$[A] = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & X_{ij} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{1n} & \dots & \dots & X_{nm} \end{bmatrix}$$

La matriz A contiene n años de observaciones, en m estaciones. Así, las m observaciones efectuadas en un determinado año i representan las coordenadas de un vector anual en el espacio de las estaciones.

Se puede escribir que:

$$[A] = [B] + [E]$$

[A] siendo, como se dijo, la matriz de los datos observados;

[B] la matriz de los datos teóricos o « verdaderos »;

[E] la matriz de los errores o anomalías.

que la utilización de la moda, que corresponde a la norma de orden 0, es decir, a la minimización de $\Sigma(x_i - m)^0$, permite reducir numéricamente los errores y así utilizar un método de máxima verosimilitud, cuya solución está en la búsqueda de valores modales de la distribución de los datos x_i .

La matriz $[E] = [A] - [B]$ puede escribirse $[E] = [A] - [L] * [C]$.

Un elemento e_{ij} de $[E]$ está entonces definido por: $e_{ij} = a_{ij} - l_i * c_j$

La búsqueda del valor modal como método de minimización de $[E]$, equivale a decir que l_i y c_j estarán correctamente estimados cuando el valor de e_{ij} más frecuente, más probable o más verosímil, en $[E]$, sea 0.

En la práctica es más cómodo utilizar el error relativo, es decir, minimizar los elementos de una matriz $[E]$, definidos por: $r_{ij} = (a_{ij}/l_i * c_j) - 1$, para determinar los l_i y c_j satisfactorios. El valor más frecuente de r_{ij} será 0 si el valor modal de $a_{ij} / l_i * c_j$ es 1. La principal dificultad proviene de que no existe un método de cálculo preciso de la moda. Hiez (1992) propone un método iterativo original de estimación del valor modal de las líneas y de las columnas de la matriz inicial, llamado "tratamiento L C". El resultado de este tratamiento es la creación de un vector de referencia regional cuyas componentes L traducen las variaciones temporales (anuales, por ejemplo) y las componentes C el coeficiente de cada una de las estaciones de observación (factor espacial).

Es frecuente encontrar para algunas estaciones distribuciones plurimodales. Reiteradamente sucede que la mejor elección consiste en escoger la moda principal. Sin embargo, será útil averiguar que la moda elegida permita proponer un promedio estimado cercano al de las estaciones vecinas.

Este método del vector regional puede, en primer lugar, utilizarse para criticar los datos; bastará para eso comparar las observaciones de cada estación con el vector de referencia. Puede también servir para reconstituir datos faltantes y así calcular los valores característicos para períodos homogéneos.

ANEXO 3

EL ANALISIS EN COMPONENTES PRINCIPALES

Definición.

El análisis en componentes principales (ACP) es un método esencialmente descriptivo que permite reducir un conjunto de numerosas variables cuantitativas, más o menos correlacionadas entre sí, en un número reducido de nuevas variables no correlacionadas, llamadas "componentes principales".

Principio.

A partir de un cuadro de datos que contenga n variables dispuestas en columna e i individuos distribuidos en línea, se puede decir que estos últimos pueden ser representados en un espacio de n dimensiones, cuya visualización es imposible. La meta del ACP es encontrar espacios de dimensiones más reducidas, siendo estas nuevas variables (llamadas índices sintéticos) combinaciones lineales de las n variables iniciales. Por razones evidentes se escogerán con frecuencia espacios de dos dimensiones (planos).

La primer componente se define buscando el « índice sintético » para el cual la varianza de los individuos i es máxima (lo que permite visualizarlos mejor); además, sólo puede explicar una cierta proporción de la variación total de los individuos.

Posteriormente se busca una segunda componente, con el fin de obtener una correlación lineal nula con la primera y tener también la mayor varianza (sin embargo, inferior a la de la primera componente). De esta manera, esta segunda provee la mayor información complementaria de la primera.

El mismo procedimiento puede repetirse hasta conseguir N componentes: el n -ésimo componente no tiene correlación lineal con los $N-1$ componentes precedentes y presenta la n -ésima varianza mayor. El porcentaje de información (o de variación total de los individuos) explicado por cada uno de estos componentes se vuelve cada vez menos significativo a medida que aumenta su orden. Es obvio que con n variables sólo es posible conseguir n componentes si no existe ninguna relación lineal entre estas variables.

Tipos de datos que pueden ser procesados.

El ACP sólo se puede aplicar a variables cuantitativas o por lo menos consideradas como tal: observaciones, medidas, notas, rangos, etc.

Muchas veces las variables son de tipo diferente y no pueden ser expresadas con las mismas unidades. Como, por otra parte, las varianzas están relacionadas con los valores de los individuos (crecen por lo general en el mismo sentido) y que además las varianzas más dispersas (es decir, las que presentan las mayores varianzas) son las que definen las primeras componentes, los resultados del ACP están influenciados por el orden del tamaño de las variables. Como *a priori* no hay ninguna razón para no dar la misma importancia o peso a las diferentes variables, sus valores serán « reducidos » dividiéndolos por su desviación estándar respectiva. Por ejemplo, en un estudio espacial de las precipitaciones es muy útil procesar de este modo para borrar el efecto de abundancia inducido por la variabilidad de la lluvia.

En la práctica el ACP se puede realizar ya sea a partir de la matriz de las varianzas-covarianzas entre variables usando los datos centrados (lo que significa tomar como origen de cada variable el promedio de los individuos) o bien, a partir de la matriz de correlación entre variables, refiriéndose a los datos centrados-reducidos.

Interpretación de los resultados.

Los paquetes disponibles permiten generalmente visualizar, en los planos generados por las diferentes componentes (plano 1-2 o plano general, plano 2-3, etc.), por una parte las variables iniciales y por la otra los individuos. En las representaciones planas la visualización es más o menos deformada. Por ejemplo, no es seguro que dos individuos, cercanos en uno de los planos,

lo sean realmente en el espacio de n dimensiones. Para juzgar la calidad de la representación de los individuos o de las variables se deberá referir a algunos indicadores estadísticos.

Para analizar la estructura de las variables habrá que referirse a los coeficientes de correlación de cada una de ellas con los diferentes componentes, representados por círculos de correlaciones. Elevando al cuadrado el coeficiente de correlación se obtiene el coeficiente de determinación, que es el porcentaje de la varianza explicado por el componente. Por otra parte, una variable estará mejor representada en el plano si está cerca del centro de éste.

Para estudiar la repartición de los individuos hay que examinar sus coordenadas buscando los que más contribuyan a la formación de las componentes (es decir, los que más contribuyen a las varianzas o bien, las más alejados de sus promedios). Cuando las variables son centradas o centradas-reducidas, los promedios son nulos y son los individuos los que tienen, en valor absoluto, las mayores coordenadas que contribuyen a la formación de los ejes. Asimismo, es necesario que los individuos analizados estén bien representados en el plano seleccionado. Para esto, es indispensable conocer, para cada punto representando un individuo, el coseno del ángulo formado por la dirección de este punto (línea que junte el origen de los ejes con este punto) y su proyección en el plano. Así, la mejor manera de estimar la calidad de la representación de los individuos es sumar los cuadrados de los cosenos de los dos ejes (o componentes): una suma superior a 0.50 corresponde a una buena representación. Evidentemente, las proximidades aparentes pueden ser erróneas. En general, cuando el coseno del ángulo es grande, este punto está cercano al eje (un menor ángulo). Sin embargo, esta regla no se comprueba cuando el punto está relativamente cerca del origen.

ANEXO 4

SERIES CRONOLÓGICAS

Definiciones.

Una serie cronológica es una sucesión de observaciones cuantitativas ordenadas en el tiempo. Puede ser *continua*, si la característica cuya evolución se estudia, se observa permanentemente; puede ser *discreta*, si las observaciones sólo se hacen a ciertos momentos, aunque el fenómeno seguido sea continuo.

En numerosos casos, las series cronológicas estudiadas en hidroclimatología son series univariadas. Cuando varios factores se observan simultáneamente su evolución en el tiempo se estudia separadamente, sabiendo que otras técnicas podrán ser utilizadas posteriormente para analizar sus eventuales relaciones.

Las diferentes relaciones de dependencia que afectan los términos de una serie, supuestamente limpios de errores sistemáticos, pueden diferenciarse de la manera siguiente:

- Un *Efecto de tendencia*, cuando la serie no es estacionaria, es decir, cuando el promedio de los valores observados crece o disminuye en el tiempo.

- Un *Efecto cíclico*, si el valor promedio es función de la cronología, pero queda estacional cuando se calcula en un tiempo bastante largo, traduciendo de este modo un comportamiento periódico a mediano o largo plazo.

- Un *Efecto estacional*, correspondiente al mismo criterio de estacionalidad que el precedente, pero con una componente periódica relativamente corta.
- Un *Efecto de persistencia*, si cada valor de la crónica no es independiente del o de los valores que lo preceden, quedando estacional el conjunto de la serie.

Así, el valor de una variable medida a un momento t puede escribirse:

$$P(t) = T(t) + C(t) + S(t) + E(t)$$

Donde T = es la tendencia general.

C = la componente cíclica.

S = la componente estacional.

E = un término que contiene a la vez el efecto de persistencia y variaciones residuales aleatorias.

Métodos de desestacionalización.

El método más sencillo para eliminar el efecto de las variaciones periódicas temporales consiste en "suavizar" la crónica por el cálculo de *promedios móviles simétricos*, reemplazando cada elemento de la serie por el promedio de un conjunto de $n + 1$ valores (correspondiendo a $n + 1$ intervalos de tiempo unitarios consecutivos, cuya duración total es igual al período), incluyendo los $n/2$ elementos que lo anteceden y los $n/2$ elementos que lo siguen. Tal tratamiento permite obtener una nueva serie cronológica más corta de n intervalos pero liberada del efecto de estacionalidad.

Al dividir los valores iniciales por los valores correspondientes de promedios móviles se consigue una serie de coeficientes estacionales, de los cuales se puede calcular el promedio a nivel de cada elemento del período (por ejemplo, el coeficiente estacional correspondiente a cada mes en un período de 12 meses). Si se dividen los datos de la crónica inicial por los coeficientes estacionales así calculados, se consigue una nueva serie cronológica corregida de las variaciones estacionales. Esta nueva serie corresponde a la asociación de los componentes siguientes: tendencia, componente cíclico y componente irregular. Cuando no hay componente cíclico de mediano o largo período (caso frecuente en climatología), el efecto de tendencia puede entonces ponerse en evidencia.

El método del promedio móvil puede, de la misma manera, ser utilizado para eliminar una componente cíclica de período más largo que las componentes estacionales. Pero cabe notar que pueden en este caso aparecer pseudo-ciclos de largos períodos, sin significación verdadera (efecto Sulsky).

Estudio de los efectos de dependencia y de periodicidad.

1- Método del autocorrelograma.

El autocorrelograma tiende a describir las dependencias que pueden existir entre variables en el caso de procesos estacionarios, es decir, de procesos para los cuales las distribuciones de probabilidad no cambian en el tiempo. En tales condiciones, la correlación entre dos variables, por ejemplo dos valores P_t y P_{t+k} de una serie cronológica, no dependen del valor t , sino únicamente de k , es decir, del número de intervalos que separan los dos valores. De esto resulta que la

correlación entre P_t y P_{t+k} es idéntica a la correlación entre P_{t-k} y P_t . Se le llama autocorrelación de orden k .

En la práctica, el coeficiente de autocorrelación r_k se calcula a partir del muestreo de valores de la serie:

$$r_k = \frac{1/(n-k) \sum_{t=1}^{n-k} [P(t)-m][P(t+k)-m]}{1/n \sum_{t=1}^n [P(t)-m]^2}$$

Donde:

- $P(t)$ = representa los valores de la serie.
- m = el promedio de estos valores.
- k = el número de intervalos de tiempo que separa los valores uno del otro.
- n = el número de valores contenidos en la serie.

El numerador de la expresión representa, con el error de una constante, la covarianza de la serie inicial y de la misma serie aplazada de k unidades de tiempo, y el denominador representa, también con el error de una constante, la varianza de la serie.

El valor absoluto $|r_k|$ expresa el grado de dependencia que relaciona las observaciones separadas por k intervalos de tiempo. Cuanto más $|r_k|$ se acerca de 1, más los valores son dependientes, por consecuencia los valores de la serie cronológica son independientes entre sí

$$r_1 = r_2 = r_3 \dots = r_j = \dots r_k = 0.$$

Estas estimaciones están caracterizadas por un error-estándar que se puede calcular, de manera aproximada, por la relación siguiente:

$$e = \sqrt{1/n \left(1 + 2 \cdot \sum_{j=1}^{k-1} r_j^2 \right)}$$

A partir de estos errores-estándar es posible determinar los límites de confianza aproximados de los coeficientes de correlación r_k . Así, para un nivel de significancia $\alpha = 0.05$, los límites del intervalo de confianza son aproximadamente iguales al doble del error-estándar de los coeficientes de autocorrelación.

El correlograma representa la curva obtenida reportando el valor del coeficiente de autocorrelación de orden k en función del valor k . Su interpretación está facilitada por algunos aspectos característicos:

- Cuando se presenta una cierta periodicidad de período T, los términos de la serie cronológica están también afectados por una ciclicidad de mismo período.
- Si la persistencia es el factor dominante en la organización de la serie, los coeficientes de autocorrelación disminuyen en función de su orden: de hecho, es lógico que la dependencia que puede existir entre valores sucesivos disminuya cuando crece el intervalo de tiempo que separa las observaciones.
- El efecto de tendencia no aparece generalmente de manera característica en el correlograma.

En la RH 36, no se apreció ningún efecto de dependencia en la serie cronológica de las precipitaciones anuales; en cambio, es diferente si el intervalo de tiempo escogido pasa de anual a diario. La repartición de los días a lo largo de un período determinado no es, en efecto, absolutamente aleatoria. La probabilidad de observar un día con lluvia depende del estado de los días anteriores.

Ciertos paquetes permiten calcular también los coeficientes de autocorrelación parcial r_{kk} . Se interpretan de la misma manera que los coeficientes de correlación parcial en regresión múltiple: la autocorrelación parcial de orden k es la correlación que existe entre $P(t)$ y $P(t+k)$, cuando se eliminan de estas dos variables el efecto de las $k-1$ variables intermedias. La gráfica correspondiente se llama autocorrelograma parcial. Los errores-estándar son aproximadamente iguales a $1/\sqrt{n}$, y se puede, por consecuencia, averiguar la hipótesis de nulidad de los coeficientes de correlación parcial teóricos: un coeficiente de autocorrelación parcial es significativamente diferente de 0 al nivel $\alpha = 0.05$, si el valor estimado correspondiente es superior, en valor absoluto, a $2/\sqrt{n}$.

Cuando los datos procesados no son estacionarios se puede intentar « estabilizarlos » por una transformación. Entre las formas más utilizadas se puede citar la transformación logarítmica y el uso de la raíz cuadrada de los datos originales. Se puede también eliminar una tendencia general aplicando un filtro diferencia de orden d (método propuesto por Box y Jenkins), que consiste en sustraer los valores de la serie unos de otros, en un orden determinado:

| | |
|-----------|---|
| - Orden 1 | ${}^1Oy_t = P_t - P_{t-1}$ |
| - Orden 2 | ${}^2Oy_t = y_t - y_{t-1} = (P_t - P_{t-1}) - (P_{t-1} - P_{t-2}) = P_t - 2P_{t-1} + P_{t-2}$ |
| -..... | |
| -..... | |
| - Orden d | ${}^dOy_t = {}^{d-1}Oy_t - {}^{d-1}Oy_{t-1}$ |

2- Método del periodograma.

Este método autoriza el estudio del elemento cíclico de una serie a partir de una decomposición de un número indeterminado de ciclos elementarios aproximadamente sinusoidales. Aunque todo elemento periódico se pueda descomponer en serie de Fourier, no siempre es fácil interpretar resultados que comprendan muchos picos, a veces muy cercanos unos de otros. En cambio, la interpretación se hace mucho más fácil e interesante cuando la serie está constituida por la superposición de un número limitado de ciclos (sensiblemente sinusoidales):

$$P_t = C_0 + C_1 \sin \frac{2\pi t}{T_1} + C_2 \sin \frac{2\pi t}{T_2} \dots$$

Donde, C_0, C_1, C_2, \dots son constantes y T_1, T_2, \dots las duraciones de los periodos de amplitud $2C_1, 2C_2, \dots$

En el caso de que: $Q_t = \psi(t) * P_t$ (factor multiplicativo), la amplitud del elemento cíclico queda indeterminada.

Suponiendo hipotéticamente que una larga serie pluviométrica anual sea dominada a la vez por una periodicidad pluridecenal (como en el Sahel, con período de 25 años) y una periodicidad de tipo El Niño (por ejemplo de 5 años), el periodograma que da la duración de los periodos (en intervalos unitarios de tiempo, aquí el año) y la amplitud de cada uno de ellos mostraría dos picos bien distintos. En cambio, el correlograma de la misma serie sólo podría mostrar el período del elemento que afecta los valores de la serie, es decir, 125 años ($25 * 5$), período que no aparece debido a la duración de las crónicas disponibles generalmente, y de la necesidad de poder calcular los coeficientes de autocorrelación con bastante precisión.

Cuando se busca la existencia de periodicidad en una serie cronológica constituida por la superposición de un número limitado de ciclos aproximadamente sinusoidales, el periodograma da más información que el correlograma. En cambio, este último resulta de utilidad en el análisis de los efectos de dependencia o de persistencia.

3- Modelación de los efectos de persistencia.

El esquema de Polyà.

El esquema de Polyà, que se elaboró para reproducir el fenómeno de contagio en tiempo de epidemias, está particularmente bien adaptado para reproducir ciertos fenómenos climáticos en los cuales intervienen los efectos de persistencia, por ejemplo en las series cronológicas de precipitaciones diarias.

Este esquema puede ser reproducido al considerar que hay una interdependencia entre sorteos sucesivos y efectuados en un cierto orden en varias urnas conteniendo todas bolas blancas y bolas negras en proporción diferente. Es decir que después de cada sorteo la bola retirada se vuelve a colocar en la urna al mismo tiempo que un cierto número de bolas del mismo color, lo que permite caracterizar el fenómeno de contagio o de persistencia.

Así, la probabilidad P_k de k ocurrencias de un evento, en una serie de n observaciones, es:

$$P_0 = \frac{1}{(1+d)^{m/d}}$$

y, para $k \geq 1$

$$P_k = \frac{m(m+d) \dots [m+(k-1)d]}{k(1+d)^{m/d+k}}$$

o sea:

$$P_k = P_{k-1} \cdot \frac{m+(k-1)d}{k(1+d)}$$

La ley está perfectamente definida por los dos parámetros m y d que representan:

m , el promedio de las ocurrencias del evento considerado;
 $d = \sigma^2/m-1$, con σ^2 varianza de las ocurrencias del mismo evento.

d caracteriza la persistencia del fenómeno, cuyos valores pueden interpretarse de la manera siguiente:

- Si $d = -1$, pues $\sigma^2 = 0$, se obtiene siempre el mismo número de ocurrencias, lo que significa, particularmente, que el hecho de haber observado n ocurrencias hace imposible una ocurrencia suplementaria del mismo evento.

- Si $d = 0$, es decir, si $\sigma^2 = m$, la ocurrencia de un evento es independiente de las precedentes y la fórmula que da P_k corresponde a la ley de Poisson.

- Si $-1 < d < 0$, la ocurrencia de un evento hace más probable la ocurrencia de un evento contrario.

- Si $d > 0$, la ocurrencia de un evento hace más probable una nueva ocurrencia del mismo evento.

En el caso de las secuencias de días de lluvia, el evento que hay que tomar en cuenta es: « *un día con lluvia sucede a otro día con lluvia* ». Así, una secuencia de k días de lluvias se traduce por $(k-1)$ ocurrencias del evento considerado; por ejemplo, un día con lluvia aislado, es decir, una secuencia de longitud 1, corresponde a 0 ocurrencia.

Si S_k es el número de secuencias observadas de longitud k y S_T el número total de las secuencias observadas, las probabilidades experimentales de k ocurrencias $P_e(k)$, en que k varía de 0 al infinito, serán iguales a:

$$P_e(k) = \frac{S_{k+1}}{S_T}$$

Los parámetros m y d son calculados según el muestreo disponible:

$$m = \sum_0 [k \cdot P_e(k)] = \sum_0 \left[k \cdot \frac{S_{k+1}}{S_T} \right] = \sum_1 \left[\frac{(k-1)S_k}{S_T} \right] = \frac{N - S_T}{S_T}$$

Donde $N = \sum_1 [k \cdot S_k]$ representa el número total de días con lluvia.

$$\sigma^2 = \sum_0 \left[(k-m)^2 \cdot P_e(k) \right] = \sum_1 \left[(k-m-1)^2 \cdot \frac{S_k}{S_T} \right]$$

De esto se deduce que $d = \sigma^2/m - 1$, también llamado parámetro de contagio.

Los números de secuencias de longitud k , correspondientes a $(k-1)$ ocurrencias, calculados por el esquema de Polya, están obtenidos al mutiplicar S_T por P_{k-1} .

Nota:

El esquema de Polya no es el único esquema que permite tomar en cuenta el efecto de persistencia en series cronológicas. Las cadenas de Markov de orden 1 a k representan también un método de análisis interesante. Tratándose de métodos relativamente conocidos, su teoría no se explicará aquí.

Cálculo de recurrencias

Una vez ajustado el modelo de persistencia es posible estimar el tiempo de retorno de una secuencia determinada. Por ejemplo, cual es la recurrencia, en años, de una secuencia de 10 días con lluvia consecutivos.

La recurrencia anual (Ra) tal que una secuencia de longitud superior a k días empiece, en promedio, cada Ra años es expresada por la relación:

$$Ra(k) = \frac{Na}{Ns(k)}$$

Donde:

Na = es el número de años de observación;

$Ns(k)$ = el número de secuencias de longitud $\geq k$.

El mismo cálculo se puede efectuar en número de días. En este caso, la recurrencia diaria $Rj(k)$ se escribe:

$$Rj(k) = \frac{Nj}{Ns(k)}$$

Donde:

Nj número de días de observaciones.

Se puede notar que:

$$Ra(k) = Rj(k) * \frac{Na}{Nj}$$

De modo que si el estudio trata de años completos, tendremos:

$$Ra(k) = Rj(k)/365.25$$

En cambio, si sólo se toma en cuenta una temporada determinada, por ejemplo la estación de lluvias de junio a septiembre, únicamente serán tomados en cuenta los días que pertenecen a este período, Np , el cálculo de $R_j(k)$, se realiza tomando también en cuenta únicamente las secuencias de la temporada escogida:

$$Ra(k) = R_j(k)/Np$$

Este método tiene aplicaciones obvias, por ejemplo en agronomía.

ANEXO 5

VARIOGRAMA

Definición.

Un variograma es una función experimental que permite describir la correlación que puede existir entre mediciones u observaciones efectuadas simultáneamente en diferentes puntos del espacio, en función de la distancia que los separa.

Determinación.

Para conocer los parámetros (promedio, varianza, etc.) de una variable Z definida en el espacio y conocida a partir de un número determinado de observaciones o mediciones, es necesario realizar un número determinado de hipótesis sobre el comportamiento del fenómeno que representa la variable.

La hipótesis intrínseca es suficiente para definir el variograma de la variable. Esta hipótesis precisa que los crecimientos $[Z(x) - Z(x + h)]$ entre dos puntos distantes de h (y no la variable Z misma) admiten, en el dominio estudiado, los dos momentos estacionarios siguientes:

$$E[Z(x) - Z(x + h)] = M(h) = 0$$

$$\text{Var}[Z(x) - Z(x + h)] = 2\gamma(h)$$

E y Var o $M(h)$ y $\gamma(h)$ representan respectivamente la esperanza matemática y la media-varianza de los crecimientos. $\gamma(h)$ es el medio-variograma, también llamado variograma.

También se puede señalar:

$$\text{Var}[Z(x) - Z(x + h)] = E\{Z(x) - Z(x + h) - E[Z(x) - Z(x + h)]\}^2$$

Sabiendo que $E[Z(x) - Z(x + h)] = 0$

$$\text{Var}[Z(x) - Z(x + h)] = E[Z(x) - Z(x + h)]^2$$

Es decir:

$$\gamma(h) = 1/2 E[Z(x) - Z(x + h)]^2$$

Así, el variograma corresponde pues al crecimiento cuadrático promedio entre los valores medidos en dos puntos distantes de h .

A la hipótesis intrínseca se añade la hipótesis de ergodicidad que determina que los promedios de conjunto (promedio cuando el tamaño de la población tiende hacia el infinito), son equivalentes a los promedios espaciales. Es decir que cada realización particular basta para exponer el conjunto de las realizaciones eventuales.

Trazado e interpretación.

El trazado del medio-variograma (o variograma) consiste en graficar en el eje de las x el valor de h , y en el de las y el de $\gamma(h)$, sabiendo que este último se puede escribir:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1, N(h)} [Z(t_i+h) - Z(t_i)]^2$$

Donde: h es una clase de distancias;

$N(h)$ = el número de puntos en la clase h .

El variograma bruto, así definido, está influenciado por una fuerte varianza de población cuando se determina a partir de un sólo individuo. Además, depende de la selección de clases adoptado. Se recomienda proceder con selecciones sucesivas.

Si se admite que la función aleatoria representada por el muestreo tiene una varianza σ^2 , se puede escribir:

$$\gamma(h) = \sigma^2 [1 - \rho(h)]$$

$\rho(h)$ representando la auto-correlación a la distancia h .

Esto supone que el variograma depende sólo de la distancia h entre dos puntos de medición, independientemente de su posición y de su orientación relativa, es decir que el fenómeno analizado sea idéntico en toda el área de estudio (condición de isotropía). Cuando no ocurre eso (anisotropía), es necesario determinar diferentes variogramas por direcciones o acimuts, dividiendo el área de estudio en una sucesión de sectores angulares y de corroborar si tienen o no características cercanas.

Características.

El estudio y el trazado del variograma bruto permiten evidenciar sus principales características:

- El efecto de *pepita*, que hace que cerca del origen $\gamma(\epsilon) = C_0$ no sea nulo. Esto se debe ya sea a la presencia de una estructura cuya escala es muy inferior a los intervalos de las observaciones, o a una no-continuidad en el espacio del fenómeno estudiado, o bien, de una manera más sencilla, a las incertidumbres de la medición.

- La presencia (o la ausencia) de un *descanso* en el variograma (cuando la curva del variograma tiende a ser horizontal aunque posteriormente esta pueda continuar), $\gamma(h) = C + C_0$, correspondiendo a $\gamma(h) = \sigma^2$ o $\rho(h) = 0$, indica que la varianza del área de observación esta limitada (o no limitada, en el caso contrario). La ausencia de *descanso* puede indicar la presencia de una deriva, es decir una variación en el espacio del promedio. En este caso, el variograma

experimental no representa la variabilidad propia del fenómeno, sino que una variabilidad aparente, debida a la sobreposición de sus fluctuaciones y de un gradiente espacial. Obviamente, habrá que eliminarla calculando en cada punto de medición los residuos que genera. La ausencia de un *descanso* también puede indicar que el espacio instrumentado no es bastante grande para apreciar, el total del proceso estudiado.

- la definición del *alcance* p que corresponde al valor de h que señala el principio del *descanso* de $\gamma(h)$, o sea: $\gamma(p) = C + C_0$.

Modelación.

Desde hace varias décadas, los geoestadísticos han desarrollado varios tipos de funciones variogramas. Entre las más conocidas, se pueden diferenciar los modelos de *descanso*: esférico, exponencial (con comportamiento lineal al origen), gaussiano, pseudo-gaussiano (con comportamiento parabólico al origen), y los modelos sin *descanso* (con covarianza y varianza no limitadas): potencial, logarítmico. Se pueden seguramente combinar ciertos de estos para lograr modelos más elaborados. Los paquetes disponibles ofrecen generalmente un surtido bastante amplio de modelos y de transformación de variables.

Para el estudio de las lluvias, el modelo esférico y el modelo exponencial aparentemente proporcionan resultados más satisfactorios.

Se puede anotar:

- para el modelo esférico:

$$\gamma(h) = C + \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] + C_0 \quad \text{si } a \geq h \geq 0$$

$$\gamma(h) = C + C_0 \quad \text{si } h \geq a$$

$$\gamma(0) = 0$$

y entonces $p = a$

- para el modelo exponencial:

$$\gamma(h) = C_0 + C [1 - e^{-a/p}]$$

No hay explícitamente un alcance, pero en cuanto h es superior a $3a$, el incremento de $\gamma(h)$ en función de h es muy débil. Y existe un alcance virtual que es cercano de $3a$.

Variograma climatológico.

La determinación de un variograma se realiza generalmente para una distribución espacial dada, es decir sin tomar en cuenta las variaciones temporales (caso de muchos paquetes). Sin embargo, en climatología, es muy frecuente disponer de una serie de eventos observados del mismo proceso aleatorio (una serie de eventos lluviosos del mismo tipo, por ejemplo). Es posible representarla por un variograma único, determinado por el cálculo del promedio de los incrementos reducidos.

Para un evento n y la clase de distancia h , se calcula el incremento reducido:

$$\left\{ \frac{[Z_n(t+h) - Z_n(t)]}{S_n} \right\}^2$$

El valor del variograma climatológico de la clase de distancia h esta dado por:

$$\gamma_u(h) = \frac{1}{2 \cdot n \cdot N(h)} \sum_{t=1, N(h)} \sum_{n=1, C} \left\{ \frac{[Z_n(t+h) - Z_n(t)]}{S_n} \right\}^2$$

Donde:

$N(h)$ = número de puntos de la clase de distancia h .

C = número de eventos.

S_n = desviación estándar de la realización n .

En teoría, este variograma es unitario si existe un *descanso*. En la práctica, cuando una desviación estandar (factor de reducción) es calculada a partir de datos correlacionados, está subestimada y por consecuencia, el *descanso* del variograma climatológico puede ser superior a 1.

Aplicaciones.

La definición del o de los variogramas de un fenómeno espacializado es un medio que permite apreciar mejor su estructura: por ejemplo, la repartición espacial de las lluvias de una región determinada en función de su duración.

Por otra parte, el análisis de los datos espaciales, con el variograma, es una etapa esencial para llevar a cabo una interpolación utilizando el método de *kriging*. Este último, cuyo interpolador es lineal (el valor interpolado es una combinación lineal de los valores medidos), sin deformación (teóricamente, el valor interpolado es igual al valor verdadero) y optimo (pues minimiza la varianza de estimación del valor interpolado), necesita, efectivamente, el conocimiento de la varianza de estimación y la determinación del peso que afecta cada punto de medición.

En la serie de los Folletos Científicos, ya publicados :

N° 1.- LOYER J. Y.; J. ESTRADA; R. JASSO; L. MORENO. eds. 1994. *Estudio de los factores que influyen los escurrimientos y el uso del agua en la Región Hidrológica 36. 367 p.*

N° 2.- ORONA, I., D. GALLARD. 1994. *Organización y manejo del agua en la parte media de la cuenca Aguanaval. 36 p.*

N° 3.- VIRAMONTES, D. 1995. *Caracterización de los suelos y vegetación en la parte alta de la Cuenca Nazas. 45p.*

N° 4.- SANCHEZ, I. 1995. *Erosión y productividad en la Comarca Lagunera. 30 p.*

N° 5.- ANAYA, E., H. BARRAL. 1995. *La ganadería y su manejo en relación con los recursos agua y pastizal en la zona semi-árida de México. 77 p.*

N° 6.- LOYER, J. Y., S. MORIAUD. 1996. *Tipología de las unidades de paisaje en la Región Hidrológica 36. 117 p.*

N° 7.- DESCROIX, L., J. F. NOUVELOT. 1997. *Escurrecimiento y erosión en la Sierra Madre Occidental. 50 p.*

**Esta publicación se terminó de imprimir en el mes
de marzo de 1998 en los talleres del
Centro Nacional de Investigación
Disciplinaria en Relación
Agua-Suelo-Planta-Atmósfera.
km. 6.5 margen derecha
Canal Sacramento.
Gómez Palacio, Dgo.
Su tiraje consta de 300 ejemplares.**

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES
FORESTALES AGRÍCOLAS Y PECUARIAS

ING. JORGE KONDO LÓPEZ

Director en Jefe

M.C. MANUEL GARCÍA LÓPEZ

Director General de Coordinación y Desarrollo

DR. LUIS ÁNGEL RODRÍGUEZ DEL BOSQUE

Director General de Intercambio Científico

DR. RODRIGO AVELDAÑO SALAZAR

Director General División Agrícola

DR. HERIBERTO ROMÁN PONCE

Director General División Pecuaria

DR. CARLOS RODRÍGUEZ FRANCO

Director General División Forestal

LIC. DAVID VEGA OSORIO

Director General de Administración

DR. IGNACIO SÁNCHEZ COHEN

Director del CENID-RASPA

C.P. ALEJANDRA MARTÍNEZ MARTÍNEZ

Coordinador Administrativo

ING. HILARIO MACÍAS RODRÍGUEZ

Jefe de Operación

M.C. LEOPOLDO MORENO DÍAZ

Coordinador de Investigación

ING. RAQUEL ANGUIANO GALLEGOS

Difusión Técnica



ORSTOM