

Nuevos logros en el estudio de la pluviosidad en Cuba: Mapa Isoyético para el período 1961-2000

Por

SERVICIO HIDROLÓGICO NACIONAL*

DIRECCIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

INSTITUTO NACIONAL DE RECURSOS HIDRÁULICOS

Introducción

La variabilidad implícita en el comportamiento de las variables hidrológicas ha afectado al hombre históricamente. El rápido crecimiento de la población y de sus múltiples necesidades han impulsado acciones tendientes a evaluar, aprovechar y proteger el recurso hídrico. El manejo óptimo de este recurso, sin embargo, tiene que estar basado en el conocimiento de sus disponibilidades reales, en tiempo y espacio. Ante la escasez de información sobre el escurrimiento fluvial, las precipitaciones adquieren un papel primordial en el proceso del conocimiento hidrológico. A ellas se dedicó este estudio.

Es cada vez más preocupante el impacto que sobre los recursos hídricos e hidráulicos tendrán las variaciones climáticas de las que nadie duda en la actualidad. El cambio climático es ya un hecho, y la economía no puede manejarse racional y oportunamente manteniendo como referencia un régimen pluviométrico inoperante, obsoleto.

Con este estudio, el Servicio Hidrológico Nacional del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) persiguió el objetivo global de *lograr una caracterización hidrológica del régimen pluvial de Cuba, que fuera suficiente y capaz de posibilitar la identificación y cuantificación de su variabilidad actual, tanto en espacio como en tiempo, dentro de los marcos endoanual e hiperanual.*

La caracterización pluvial lleva implícitos varios tópicos, de modo que las salidas principales propuestas fueron:

1. **Mapa Isoyético para el período 1961-2000.**- Interpreta el carácter de la distribución espacial de la Norma Estándar de las precipitaciones anuales para dicho período.
2. **Mapa de Isolíneas del coeficiente de variación.**- Caracterización de la distribución, en todo el territorio nacional, de la variabilidad temporal de las precipitaciones anuales.
3. **Regionalización de las distribuciones interanuales.**- Identificación de regiones diferenciadas en cuanto a la distribución temporal de la lluvia, así como de modelos tipificados del comportamiento regional de la misma dentro del año, considerando niveles diferentes de acuosidad.
4. **Regionalización de los límites del Año Hidrológico.**- Detalla las diferencias espaciales en cuanto a los límites de los períodos húmedo y seco en todo el territorio nacional.
5. **Regionalización de la ciclicidad de las precipitaciones.**- Identifica las regiones homogéneas en cuanto a la sincronización de la marcha anual de las precipitaciones, así como recomendaciones para el paso de la Norma Estándar a la Norma Hiperanual.
6. **Evaluación de las lluvias hiperanuales para los períodos 1931-1960, 1931-1990, 1971-2000.**- Mediante la interpretación de

las relaciones entre los valores definidos para estos períodos y los registros de observación más largos del país, se pueda acceder a las lluvias para esas épocas en cualquier espacio de la geografía nacional.

Materiales y métodos

Aún en el caso de Cuba, cuyas cambiantes condiciones a lo largo del Año Hidrológico son muy conocidas, las precipitaciones anuales pueden modelarse con relativa facilidad mediante la técnica de regresión y correlación. O sea, mediante la modelación bidimensional pueden extrapolarse características desde una serie larga de observación hacia otra de corta data, expresándose la componente determinística con mayor o menor fuerza en dependencia de la representatividad de la serie análoga o de larga duración.

Para la modelación probabilística se eligió el dato anual como tiempo básico de cómputo debido a que es el que mejores ajustes logra, por una parte, y el que menores errores conlleva al requerir el mínimo completamiento de datos faltantes, por otra. Sin embargo, al llegar a esta simplificación fue oportuno trazar la estrategia a seguir para garantizar otras salidas del estudio. Por la teoría de la economía se llegó al siguiente esquema: “*cálculo de la lluvia media hiperanual – cálculo de la variabilidad hiperanual para acceder a las lluvias anuales de distintas probabilidades de ocurrencia – distribuciones típicas mensuales*”. Para alcanzar los objetivos, empleando este camino, se hizo necesario clasificar las estaciones pluviométricas en distintos tipos de redes, respondiendo a los criterios siguientes:

1. Los objetivos del estudio, que exigían series anuales y/o mensuales completas.
2. Historia de las estaciones (constancia de los observadores, condiciones de instalación, etc).
3. Registros (necesidad de interpolación y/o extrapolación para lograr la concurrencia serial requerida).
4. Ubicación relativa en el contexto del espacio de los factores de las precipitaciones.

La estimación de parámetros a partir exclusivamente de una muestra, de reduci-

do tamaño numerosas veces, presentó dificultades debido a la incertidumbre existente respecto a la representatividad de dicha muestra. Incluso asumiendo una única población, el coeficiente de variación (C_v) y sobre todo el de sesgo (C_s), calculado en distintas muestras extraídas de dicha población, presentaron una elevada varianza, que se tradujo así mismo en una elevada dispersión en los parámetros y cuantiles estimados, tanto mayor cuanto más reducida era la muestra y más alto el C_s de la población.

En Cuba la variabilidad es muy alta en virtud de la elevada dinámica de los procesos tropicales y, por otra parte, las series en su inmensa mayoría son de cortos registros de observación. Todo ello condujo al empleo de una metodología que asumió la existencia de una región homogénea respecto a una variable hidrológica; en este caso, la lluvia anual. Este concepto permitió aprovechar el conjunto de información disponible en dicha región para completar información faltante en los casos muy necesarios, así como, para extrapolar información de larga data hacia aquellas que no la poseían.

La regionalización puede realizarse lo mismo por criterios geográficos que por estadísticos. En un principio, en este estudio se zonificó a todo el país en función de los factores condicionantes de la precipitación, o sea, bajo criterios exclusivamente geográficos o hidrológicos. Como marco de referencia inicial para delimitar las zonas pluviométricas homogéneas (ZPH) se adoptó la regionalización físico-geográfica del Atlas Nacional de Cuba de 1989. Los factores considerados en la zonificación fueron:

En el caso de las llanuras

1. la distancia a un macizo montañoso
2. su ubicación relativa entre los macizos y las costas, variantes
3. su cubrimiento boscoso y/o su densidad poblacional
4. la cercanía a los mares del sur o del norte del país
5. la orientación de las costas respecto a la dirección del viento húmedo

En el caso de las montañas y premontañas

1. su orientación respecto a las costas y a la dirección del viento predominante

2. su morfología: pendientes del terreno, elevaciones absoluta (*s.n.m.m*) y relativa respecto a otros macizos montañosos, existencia de cadenas paralelas o encontradas
3. el nivel de agrupamiento de sus elevaciones (el nivel de erosión de los ríos que las drenan)
4. su ubicación relativa: entre otras montañas, entre llanuras, variantes
5. la distancia a otro macizo montañoso, interposición de otros sistemas montañosos en el camino de la fuente de humedad
6. su cubrimiento boscoso
7. la distancia hasta una fuente de humedad

Métodos y vías de cálculo

Entre los distintos métodos de cálculo tradicionales, el isoyético es el de mayor utilización por ser el que más fielmente refleja la variabilidad espacial natural del campo pluviométrico y porque permite, y exige, el máximo despliegue del criterio de experto.

En el marco de la investigación, las isoyetas representan las líneas sobre las que cae igual cantidad de lluvia en un año de acuosidad media para un período concurrente para todo territorio en estudio. Este método es por demás el que mejor respondió a los intereses del INRH, y a los intereses primarios de otros organismos e instituciones del país. Otras vías no hubieran satisfecho toda la variedad de situaciones en las que los hidrólogos suelen necesitar del conocimiento detallado de las precipitaciones en espacios tan complejos como suelen ser, incluso, las pequeñas cuencas de orografía compleja, donde la relación exposición-sombra pluvial cambia con una frecuencia espacial muy intensa.

Período representativo

La variabilidad característica del clima y las tendencias que en éste se observan en el transcurso del tiempo, son consecuencias del comportamiento de los fenómenos que dan lugar al mismo y, a un tiempo, constituyen la razón fundamental en la persistencia de ciertas condiciones de relativa homogeneidad temporal del régimen pluviométrico. Se comprobó, mediante el empleo de la técnica de las curvas integradas diferenciadas

(CID) aplicadas a diversas variables hidrológicas, que las fluctuaciones hiperanuales de éstas siguen ciertos patrones, observándose la agrupación de años de diferentes grados de acuosidad: conjunto de años predominantemente húmedos (rama ascendente) siguen a una agrupación de años mayoritariamente secos (rama descendente), rutina que se repite de forma continua.

Es evidente que si una muestra cae exclusivamente en una de las ramas o en parte de ellas, pero sin llegar a completarlas como parejas, el procesamiento de la muestra ofrecerá valores por debajo o por encima del real según la posición temporal relativa de la serie. De ahí, la importancia que en la hidrología se le presta a la comprobación de la homogeneidad de las muestras y a que dicho período complete un ciclo total o cerrado de acuosidad (aproximadamente iguales pesos relativos de los diferentes años acuosos). Puesto que el valor medio de una muestra depende de los registros de observaciones, conviene repasar los conceptos de promedio y norma, entre otros, todos referidos a la magnitud más esperada que aflora durante la modelación estadística de las series hidrológicas:

1. PROMEDIO PROPERÍODO.- Media de los datos calculada para cualquier período de, por lo menos, diez años, comenzando por aquel que acabe en 1 (ej. 1961-70).
2. PROMEDIO HIPERANUAL.- Media calculada para una serie cualquiera, de acuerdo a un período de muchos años, sin que se precisen sus límites ni extensión.
3. NORMA ESTÁNDAR.- Media calculada para cualquier período de, por lo menos, tres plazos consecutivos de diez años (ej. 1931-1960, 1931-1970, 1931-1990, 1961-2000, 1971-1990, etc).
4. NORMA HIPERANUAL.- Media establecida para un período sin cotas previas, que abarque al menos un ciclo completo de acuosidad, debiendo observarse igual número de ramas de ascenso y descenso. Se considera óptimo cuando la muestra abarca 2 ó más ciclos completos de acuosidad.

Aceptando el concepto de Norma Hiperanual como el de máximo interés para las investigaciones hidrológicas, es evidente que tras la delimitación del período ópti-

mo de cálculo se requiere la construcción de las CID ya referidas, pues sólo mediante ellas puede considerarse el carácter cíclico de las variables hidrológicas e, incluso, la asincronización real entre las marchas de las fluctuaciones particulares de diferentes puntos geográficos o cuencas hidrográficas dentro de un territorio mayor, con vistas a ser consideradas en un mapa de ciclicidad de todo el país.

En 1994, la OMM recomendó un grupo de períodos (de 30 años, como mínimo) pre-determinados como representativos, para la realización de caracterizaciones y generalizaciones del comportamiento del clima en el ámbito mundial. Un período de observación básica normalizada permite situar en un mismo plano comparativo a las estaciones que se utilizan en un estudio hidrológico, lo cual es un requisito indispensable para que las evaluaciones y predicciones que se realicen tengan un fundamento físico y lógico-matemático adecuado.

Para la confección del nuevo Mapa Isoyético se escogió como período de cálculo principal el de 1961-2000, en conformidad con las recomendaciones de la OMM expresadas anteriormente, y porque era el de mayor extensión entre los que contaban con información disponible, y en el que coincidían los efectos de los eventos extremos (máximos) en todas las regiones del país. Esto tiene una enorme importancia ya que dichos eventos son la fuente de las mayores fluctuaciones de las variables hidrológicas en el tiempo y, por ende, son los que definen la elevada variabilidad de las poblaciones en las condiciones del trópico insular. Este período tenía además la mayor densidad de información hidrológica de las montañas.

Adicionalmente, y para comparar las láminas de lluvia en las principales unidades administrativas del territorio nacional en diferentes épocas, fueron seleccionados los períodos 1931-1960, 1931-1990, y 1971-2000.

Calidad de la información

Por error se entiende la diferencia existente entre el valor medido de una cantidad y su valor verdadero, sin embargo, pueden entenderse también como errores todos aquellos que provocan distorsión entre la realidad y la información obtenida. En ge-

neral, los errores en los resultados de una investigación hidrológica pueden tener varias procedencias:

1. Obtenidos directamente en las estaciones de medición.
2. Obtenidos durante el proceso de tratamiento o procesamiento estadístico.
3. Obtenidos en el empleo de la técnica misma de generalización.

Los registros de datos acumulados y actualizados sobre la precipitación pueden contener errores sistemáticos (precisión de los instrumentos de medición, su diseño, el método de instalación, las peculiaridades microclimáticas del lugar, tipo e intensidad de las precipitaciones, estado de la atmósfera durante y después de éstas, régimen de medición, etc) y aleatorios (a diferencia de los primeros no tienen diferentes signos y pueden considerarse sólo desde el punto de vista estadístico, y provienen de una influencia combinada de la parte que se mide en el pluviómetro con el método de medición y las acciones del observador).

Durante los procesos de transferencia de datos en soporte papel a formato digital en la creación de bases de datos pueden introducirse nuevos errores. Incluso pueden generar nuevas fuentes de error los procedimientos que implica el manejo del dato básico mediante diferentes técnicas estadísticas y durante el proceso de homogenización de una muestra considerada estadísticamente no homogénea. Ello trae aparejado otro error, más grave aún. Tras la homogenización serial, se suavizan los elementos de una serie y el Cv disminuye, o se desvirtúa en todo caso, y ello tiene una implicación directa sobre los valores extremos, especialmente en los valores de predicción calculados a partir del nuevo Cv para años muy secos, por ejemplo.

Series hidrológicas homogéneas se consideran aquellas con características que varían de un año a otro o de un determinado período a otro, sólo en correspondencia con la variación natural de los macroprocesos que ejercen su influencia sobre el clima regional. En una serie estadísticamente homogénea todos sus miembros, para un determinado nivel de significación, pertenecen a la misma población. La homogeneidad

de una serie hidrológica puede perderse debido a cambios naturales y no naturales o por cambios físicos en la estación. Sin embargo, una vez asumido un período de cálculo, también se aceptan las condiciones climáticas medias del mismo, lo que equivale a decir que la falta de homogeneidad de las muestras hay que buscarla en otras causas: deforestación, creación de espejos de agua, traslados hacia lugares con condiciones de exposición diferentes a las iniciales, etc.

Sin embargo, no puede asegurarse que una serie estadísticamente homogénea lo sea también desde el punto de vista físico. No son pocos los casos en que tras los análisis matemáticos pertinentes se han tomado como muestras estadísticamente homogéneas, series que no resisten un análisis de homogeneidad hidrológica. Ejemplos:

1. Estaciones climáticas que realizaron observaciones sin cambiar de ubicación, pero antes y después de la aparición de embalses tras la construcción de presas.
2. Estaciones de aforos que realizaron observaciones antes y después de la construcción de obras hidrotécnicas en su cuenca.
3. Estaciones pluviométricas que se han trasladado en varias ocasiones y a varios kilómetros de distancia, interferencias mediante.

En virtud de no repetir esas situaciones, así como tampoco desechar información hidrológica homogénea, se tomó como criterio de experto la decisión de no desechar por falta de homogeneidad estadística ninguna serie, en primera instancia, a no ser que no pasara satisfactoriamente ninguno de los tests de consistencia y de estacionaridad programados para la ocasión, y mucho menos después de haberse realizado todos los análisis de la información primaria, desde la validación de los valores mensuales mediante el software *VALIDATO*, la comparación de todos los movimientos contenidos en las Tarjetas Maestras del Banco de Datos, hasta los análisis de los especialistas territoriales sobre la calidad de las series históricas.

Como se ha reconocido antes, las técnicas o métodos de generalización introducen

errores. O sea, también la metodología asumida (el traspaso de información de estaciones de series largas hacia otras de series cortas) lleva un error implícito que fue necesario tener en cuenta. Para el caso del Mapa Isoyético para el período 1961-2000, se consideró factible realizar la prolongación de las series cortas o con tamaños menores de 40 elementos, de forma directa. Las medias de las series de estaciones cuyos registros no alcanzaban el período de cálculo fueron calculadas mediante la técnica de regresión y correlación (a partir de la lluvia media obtenida en la serie única zonal se pasó la información a las de registros cortos).

Desde el punto de vista estadístico, la prolongación directa de las series pluviométricas se asoció con la teoría elemental de muestreo y a los problemas de estimación de estadística de parámetros.

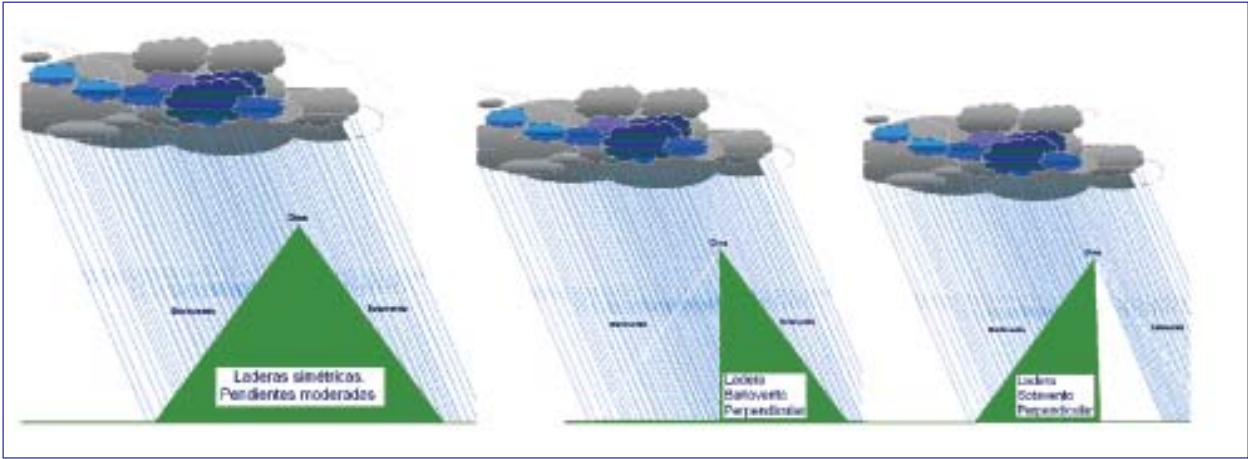
Herramientas de trabajo

En el desarrollo de la investigación fueron utilizadas las facilidades que brindan las aplicaciones *Microsoft Excel*, *Access* y *Visual Basic*, así como *Surfer 6*, *Mapinfo Profesional 6* y *7.5* y *AutoCAD Map 2000*. Estos programas fueron utilizados en diferentes etapas de la investigación, ya en el procesamiento y obtención de los resultados, ya como simples herramientas de ayuda para la digitalización de mapas o para la presentación final de las salidas del Mapa Isoyético.

Una mención especial merecen los esfuerzos realizados por los especialistas del INRH en la concepción y realización de tres programas diferentes: *VALIDATO* y *AQUALIM* para la validación y procesamiento de datos pluviométricos mediante el empleo de bases de datos de *Microsoft Access* estructuradas nacionalmente, y *PONDERARE* para el cálculo de medias espaciales ponderadas, a partir de mapas de bits.

Desarrollo de la metodología de trabajo

Para la asimilación de la metodología del trazado de isolíneas por criterio de experto, fue válido analizar las relaciones de las precipitaciones con la orografía. En general, el campo pluviométrico que modela un macizo orográfico se extiende a todos los paisajes vecinos, con mayor o menor grado de



influencia, en dependencia de otros factores pluviométricos, como la cercanía de la fuente de humedad o la dirección general de las costas respecto a los vientos predominantes. Estos conocimientos deben ser aprovechados en la interpretación de un estudio pluviométrico cualquiera. Es oportuno comentar el siguiente ejemplo de cómo se refleja la sombra pluviométrica sobre un valle en correspondencia con la morfología del relieve. Pueden variar las diferencias entre las láminas de lluvia ocurridas en la cima de una montaña y las que se miden al pie de la misma, ya en la vertiente de barlovento, ya en la de sotavento, en dependencia de la morfología de la montaña y en que frente relativo se halla ésta respecto a la fuente de humedad (Fig. 1).

Está claro, que en el caso de perpendicularidad (caso extremo) de la ladera de bar-

lovento, su base o pie de montaña recibe la misma cantidad que la cima. Por el contrario, cuando la perpendicularidad se presenta en la ladera de sotavento, la diferencia entre las lluvias de la cima y el pie del valle es en extremo importante. A este efecto puede llamarse, de modo muy gráfico, efecto "edificio", ya que cuando la lluvia procede de una tormenta que trae una dirección encontrada con el frente del edificio, la pared de llegada de la lluvia (barlovento) resulta totalmente mojada, y todo lo contrario sucede en la pared del fondo (sotavento) que queda seca, total o parcialmente. En la naturaleza el ejemplo más notable se presenta especialmente en los mogotes pinareños, debido a lo abruptas que son sus laderas. Para no dejar estos razonamientos sólo del lado teórico, se ejemplifican con datos de la red pluviométrica nacional (Fig. 2).

Fig. 1. Efecto de lo abrupto del terreno, la dirección de la tormenta y la lámina de lluvia.

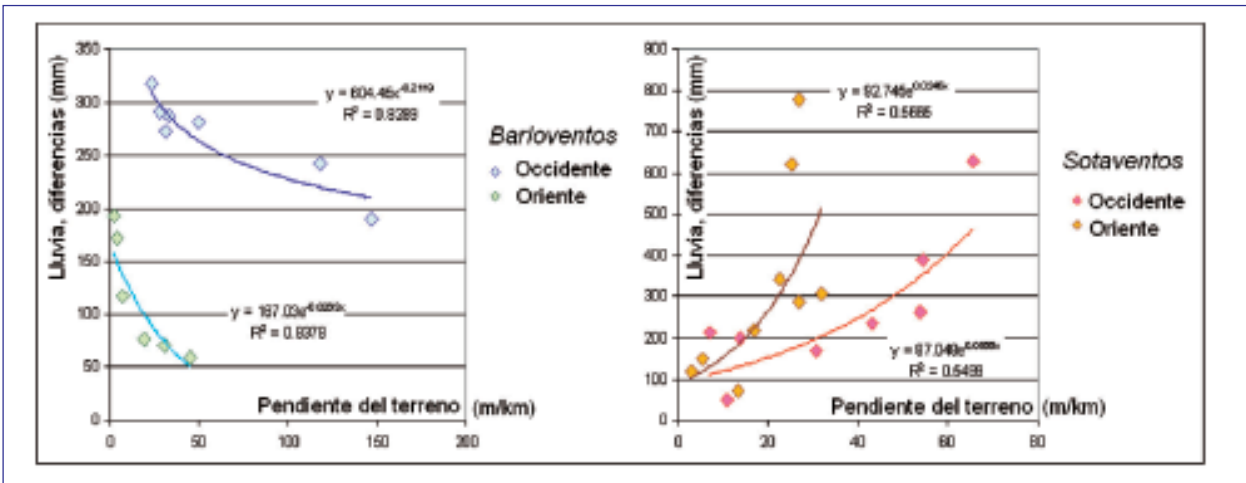


Fig. 2. Relaciones de dependencia entre pendientes del terreno y la lluvia por vertientes. Puede verse como a medida que la ladera es menos inclinada la diferencia entre los acumulados pluviales de la cima y el pie de barlovento es menor; en tanto, si es más inclinada el terreno la diferencia se incrementa (izquierda). Por el contrario, cuando se analiza la vertiente de sotavento ocurre todo lo contrario a lo descrito (derecha).

Otro aspecto muy importante analizado en los inicios fue la conveniencia de la escala del mapa de trabajo. Como en las versiones anteriores del Mapa Isoyético se asumió la de 1 : 250 000, al tomarse en consideración que para las proporciones de Cuba y de sus cuencas fluviales, no escapa prácticamente ningún detalle de los principales elementos que influyen en la distribución de las precipitaciones: vegetación, urbanismo, espejos interiores de agua y, sobre todo, el relieve.

En relación al Banco de Datos del INRH, se contó con 1 279 980 registros mensuales completos, procedentes de 3 424 estaciones pluviométricas. En pleno funcionamiento, hasta el cierre de diciembre del año 2000, existían 1 944 pluviómetros. La base de datos la componen tres tablas principales:

1. **Tarjetas Maestras:** contienen la ubicación original de cada estación, su nombre genérico y geográfico, su altura sobre el nivel del mar, información sobre si han totalizado, y en qué época, las observaciones diarias de lluvia; si han sido trasladadas o no, y el criterio de los especialistas del territorio sobre la calidad de la serie histórica entre los años 1961 y 2000.
2. **Traslados:** se identifican, por provincias, los equipos que se han reubicado respecto a las coordenadas norte y este originales, y se define la fecha del o los traslados y la nueva altura en metros *s.n.m.m.*
3. **Base Mensual:** se incluyen todos los totales de lluvias de meses sin días faltantes de observación, desde el inicio de las observaciones hasta diciembre del año 2000, como mínimo, o hasta el cierre en los casos de que éste sea anterior a dicha fecha.

De forma paralela a la actualización y primera validación de los datos en cada territorio, se plotearon las ubicaciones de todas las estaciones pluviométricas, identificándolas en el mapa a escala 1 : 250 000 en dependencia del nivel de completitud de los datos anuales dentro del período 1961-2000. Con la información recopilada en provincias, nacionalmente se hizo la selección definitiva de pluviómetros clasificándolos en grupos o redes, discretizados de acuerdo a las ubicaciones espaciales relativas, los registros y los objetivos del Mapa Isoyético.

Se escogieron 2 172 estaciones, de éstas 1 974 presentaban series que podían prolongarse directamente hasta 40 años según la cantidad de años “faltantes” y el error relativo real que se comete en la prolongación. Es válido aclarar que las restantes 198 estaciones se utilizaron a modo orientativo, como parte de la Red de Tratamiento Diferenciado (RTD), ya que a pesar de presentar menos de 5 años de observaciones, su ubicación privilegiada hizo mantenerlas hasta el final de los cálculos (Tablas 1 y 2).

Para el traspaso de información el método utilizado fue el de correlación-regresión lineal. Fue empleado en los procesos de extrapolación de las series incompletas y en la interpolación en los casos necesarios. El tratamiento regional de datos se realizó mediante la definición de series únicas de 40 años a partir de series particulares de

Tabla 1.
Cantidad de estaciones pluviométricas utilizadas.

Tipo de red	Selección	Doble Función con red precedente	Totales parciales
RRR	79		79
RRZ1	131	44	175
RRZ2	414	175	589
RTO	1350		1350
RTD	198		198
Totales	2172	219	2391

RRR (Red de Referencia Regional)

RRZ (Red de Referencia Zonal)

RTO (Red de Trabajo Ordinario)

RTD (Red de Tratamiento Diferenciado)

Tabla 2.
Distribución de las estaciones por rangos de altura.

Altitud (m)	Occidente	Centro	Oriente
hasta 50	384	305	339
100	134	175	204
150	60	65	129
200	20	46	77
250	2	12	33
300	2	6	25
350	6	4	22
400	2	4	20
450		2	12
500		2	16
600		3	9
700		5	23
800		4	9
900		1	4
1000			3
1200			3
Totales	610	634	928

estaciones representativas de una zona pluviométrica homogénea, las que fungieron como análogas en el traspaso de información hacia los equipos con series incompletas para el período 1961- 2000.

A continuación, los pasos consecutivos que fueron cumplimentándose hasta satisfacer todas las salidas:

1. Selección de la Red de Referencia Regional (RRR). De entre las 236 estaciones con observaciones de los años 1931-2000, según su estratégica ubicación, completitud del dato y homogeneidad serial, fueron seleccionadas 79 para formar parte de la RRR (Fig. 3). El objetivo de esta red fue analizar las relaciones entre las lluvias del período principal de cálculo (1961-2000) con las de los períodos de cálculo secundario: 1931-1960 y 1931-1990.
2. Selección de la Red de Referencia Zonal 1 (RRZ-1). El país fue dividido en 52 ZPH, seleccionadas a priori utilizando un criterio geográfico: los factores condicionantes de la precipitación. Se buscó entre las estaciones con series más completas las mejor ubicadas dentro de las ZPH (modelo de equidistancia, en lo posible), seleccionándose 175 estaciones para formar la RRZ-1 (Fig. 4), de las cuales 44 pertenecían a la RRR. Del total, 43 fungieron como patrones para más de una zona. La función de estas estaciones fue la de conformar la serie única (SU) de cada ZPH, a partir de la cual se determinó primero la Norma Estándar de la zona y segundo, se llevó la información de la lluvia media anual a las estaciones de la Red de Trabajo Ordinario (RTO) y a las de la RTD. Luego de la delimitación preliminar de las ZPH, se procedió a comprobar la homogeneidad estadística regional, a partir de los promedios anuales. Se siguieron los criterios de la teoría elemental de muestreo y de estimación estadística de parámetros (definir muestras, representadas por las series de diferentes estaciones vecinas, que conformen la distribución muestral de una población cuya media será igual a la media de las medias de las muestras, mediante un proceso iterativo tal que agrupe o desagrupe estaciones, tomando como criterio de asociación la comparación entre los respectivos erro-

res reales relativos y los errores estándares relativos permisibles para el nivel de confianza deseado). Se aplicó el método a las estaciones con series más completas y se obtuvo que, para las muestras cuyo tamaño era de 5 a 10 años, las estaciones comprendidas en cada una de las zonas presentaban homogeneidad espacial en más del 80 % de sus muestras.

3. Selección de la Red de Referencia Zonal 2 (RRZ-2). Para las mismas ZPH, pero buscando abarcar mejor las particularidades de los factores pluviales que no podían describirse mediante el diseño de relativa equidistancia de la RRZ-1, se seleccionaron 414 estaciones más para conformar la RRZ-2 (Fig. 4). Su objetivo fue el de calcular el Cv y las distribuciones mensuales.
4. El completamiento de los valores anuales y mensuales faltantes en las estaciones de referencia se realizó utilizando el programa *AQUALIM*, tras lo cual se generó una base de datos colateral, que más tarde fue utilizada para calcular las distribuciones interanuales de las lluvias para distintas probabilidades, y para el cálculo del Cv y de los límites del Año Hidrológico, según el tipo de red que tuviera en sus objetivos estas salidas. En todos los casos se empleó el *AQUALIM*, en sus diferentes módulos. En la Tabla 3 se resumen las pruebas de homogeneidad realizadas a todas las estaciones RRZ 1 y 2.

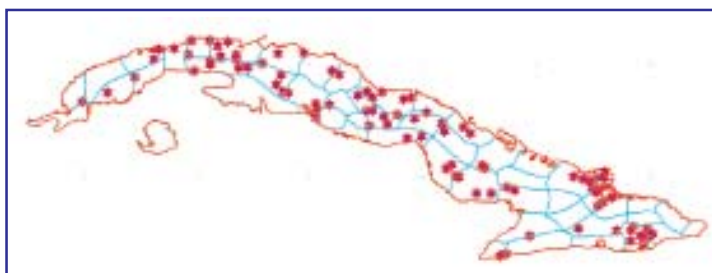


Fig. 3. Zonas pluviométricas homogéneas (ZPH) y Red de Referencia Regional (RRR).

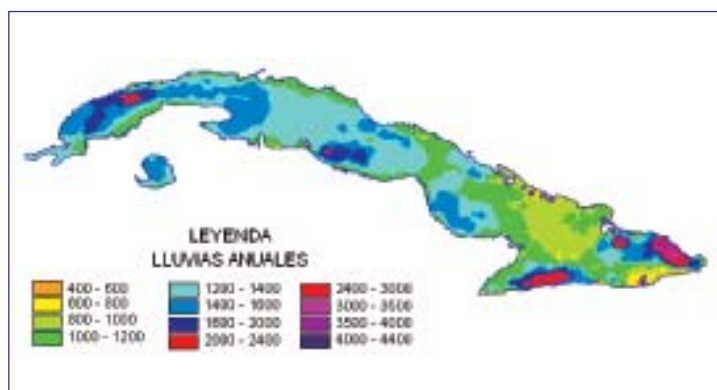


Fig. 4. Zonas pluviométricas homogéneas (ZPH) y Red de Referencia Zonal 1 y 2.

Tabla 3.
Resumen de los resultados positivos de las pruebas de homogeneidad serial realizadas a todas las estaciones RRZ 1 y 2.

Código	Nombre	RRZ-1			RRZ-2		
		Total estaciones	Tests de Estacionaridad	Tests de Consistencia	Total estaciones	Tests de Estacionaridad	Tests de Consistencia
Totales		175	160	170	589	549	575

Fig. 5.
Mapa de la precipitación media anual en Cuba (período 1961-2000).



5. Selección de la Red de Trabajo Ordinario (RTO). Dentro de los límites de cada ZPH, se seleccionaron las estaciones a las que no convenía alargar el dato año a año. Ellas pasaron a formar la RTO, compuesta por 1 350 estaciones. Por correlaciones directas entre las series únicas y las estaciones de la RTO y la RTD, se pasaron las láminas anuales de lluvia de 40 años (1961-2000). Para las pocas estaciones que no dieron una buena correlación directamente con las SU, fueron hechas correlaciones con las estaciones más cercanas.

6. Ploteo de los valores obtenidos para la norma de 40 años sobre papel transparente, a escala 1 : 250 000. Esta impresión se superpuso sobre el mapa físico de igual escala topográfica, para acometer el trazado de las isoyetas. Como resultado final se obtuvo el mapa de la media anual de Cuba para el período 1961-2000 (Fig. 5), así como los valores de las láminas históricas de la precipitación media anual por provincias, regiones y nación (Tabla 4 y 4.1). Se obtuvo además las láminas históricas mensuales por municipios y provincias del país.

Se obtuvieron también isoyetas para las islas y cayos menores de todo el país en base a registros de los últimos diez años en sitios aislados de la geografía cubana, considerando la dinámica espacial de los patrones de distribución de los gradientes pluviométricos en los territorios de la isla de Cuba, para los cuales el archipiélago constituye corredor natural de los factores condicionantes de la precipitación.

Tabla 4.
Láminas históricas anuales.
Comparación 1961-2000 con otros períodos (mm).

Territorio	Períodos de cálculo			Diferencia del Isoyético 1961-2000, respecto a otros períodos			
	1931-72	1931-60	1931-90	1961-00	1931-72	1931-60	Fin31-90
Total Nacional	1375	1468	1383	1335	-40	-133	-48
Pinar del Río	1445	1568	1575	1499	54	-69	-76
La Habana	1484	1280	1373	1399	-85	119	26
Ciudad de La Habana	1411	1222	1266	1329	-82	108	63
Isla de la Juventud	1430	1484	1454	1425	-5	-59	-29
Matanzas	1481	1463	1389	1408	-73	-55	19
R. Occidental	1464	1462	1452	1437	-27	-25	-15
Villa Clara	1326	1383	1303	1295	-31	-88	-8
Cienfuegos	1510	1426	1476	1457	-53	31	-20
Sancti Spíritus	1420	1418	1429	1414	-6	-4	-16
Ciego de Ávila	1264	1255	1273	1189	-75	-65	-84
Camagüey	1326	1487	1413	1283	-43	-204	-130
R. Central	1352	1411	1377	1308	-41	-103	-69
Las Tunas	1126	1208	1121	1038	-88	-170	-82
Holguín	1350	1529	1192	1253	-97	-271	61
Granma	1350	1621	1449	1288	-62	-333	-161
Santiago de Cuba	1378	1721	1587	1353	-25	-368	-235
Guantánamo	1619	1621	1342	1488	-131	-133	146
R. Oriental	1360	1540	1330	1279	-81	-260	-51

7. A partir del procesamiento de las series de la RRZ-2, se obtuvo, utilizando igual método de análisis que para las lluvias anuales del período 1961-2000, el mapa de la variabilidad anual de las precipitaciones (Fig. 6).
8. Se procedió a procesar las series mensuales de las estaciones de la RRZ-2 mediante el módulo *DISTRIBU* de *AQUALIM* con vistas a lograr las distribuciones mensuales para los años típicos de acuosidad: medio húmedo (25 %), medio (50 %) y medio seco (75 %). Del análisis de los resultados, asumiendo el criterio que ningún % mensual de una estación debía diferir en $\pm 2\%$ del de las restantes estaciones de una misma zona endoanual homogénea (ZEH), se delimitó al país en 68 nuevas zonas (Fig. 7).
9. Con las estaciones de la RRR y de las RRZ 1 y 2, se determinaron, mediante el módulo *HIDROLIM* de *AQUALIM*, los límites de las temporadas y del Año Hidrológico. Estos resultados fueron analizados de conjunto con los obtenidos con *DISTRIBU*, en el punto anterior, y se establecieron las regiones identificadas en el mapa de regionalización de la temporada húmeda del Año Hidrológico (Fig. 8), considerando la coincidencia entre los meses finales del período húmedo del año y los diferentes tipos de relaciones que se pueden identificar respecto a la impor-

Tabla 4.1.
Láminas históricas anuales de las 8 cuencas de interés nacional (mm)

Cuenca hidrográfica	1931-1960	1961-2000	Diferencias
Cuyaguaje	1637	1475	-162
Ariguanabo	1469	1514	45
Almendrares-Vento	1272	1446	174
Hanabanilla	2085	1986	-99
Zaza	1484	1427	-57
Cauto	1479	1112	-367
Guantánamo-Guaso	1181	1027	-154
Toa	2468	2518	50

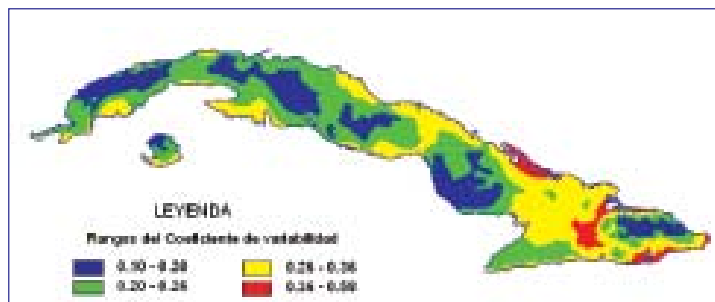


Fig. 6. Mapa de la variabilidad anual en Cuba (período 1961-2000).



Fig. 7. Zonas endoanuales homogéneas (ZEH).

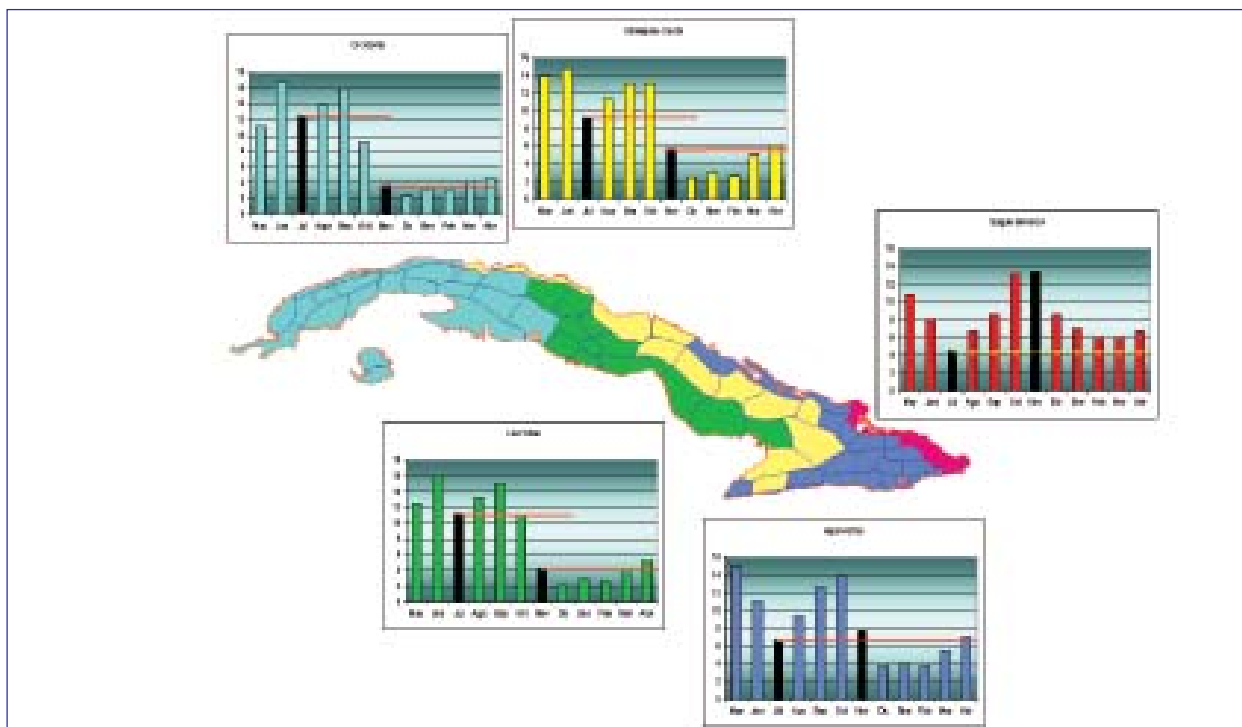


Fig. 8. Mapa de la regionalización de la temporada húmeda del Año Hidrológico.

Tabla 5.
Comparación de las distribuciones interanuales
por regiones del país.

Región	% de mayo-octubre	Diferencias % de julio-noviembre	% de julio y agosto	Límites del período húmedo	% Período húmedo regional
Pinar, La Habana, Cienfuegos	77,3	7,6	25,1	mayo-octubre	77,3
Sagua, La Sierpe, Birama	79,7	7,5	24,8	mayo-octubre	79,7
Cárdenas, El Cristo, Bayamo	75,3	3,7	20,4	mayo-octubre	75,3
Cubitas, Turquino, Imías	68,1	-1,2	16,1	mayo-noviembre	76,0
Banes, Baracoa, Maisí	51,7	-8,8	11,6	mayo-enero	80,9

tancia relativa de los meses de julio y noviembre en los distintos territorios del país (Tabla 5).

10. Con la RRR se construyeron las CID para el período 1931-2000, que permitieron en primer lugar identificar las tendencias generales predominantes a lo largo del país para el período 1961-2000 respecto a los 30 años precedentes (Fig. 9). Sin embargo, cuando las mismas series fueron analizadas para los dos períodos ci-



Fig. 9. Tendencias de las lluvias anuales del período 1961-2000 respecto a las del período 1931-1960.

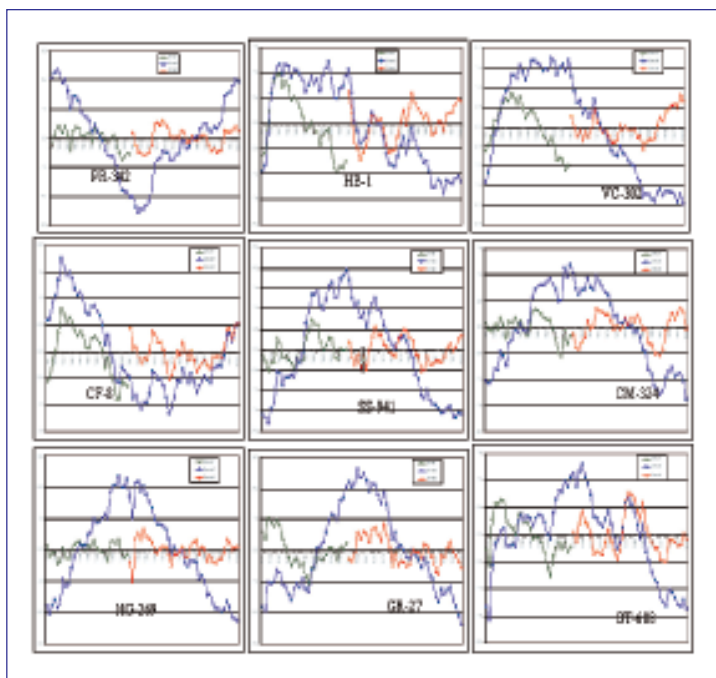


Fig. 10. Ejemplos de CID de series RRR.

Nota: La línea azul representa el período 1931-2000, la línea verde 1931-1960 y la línea roja 1961-2000

tados, por separado, se notaron cambios notables en la extensión y profundidad de los ciclos (Fig. 10). En cuanto a los análisis de homogeneidad hechos al respecto fueron también concluyentes los resultados siguientes:

- En el período 1931-2000 sólo el 56,3 % de las pruebas de estacionaridad realizadas dieron positivo.
- En el período 1961-2000 la estacionaridad fue aceptada en el 83,1 % de los casos.
- Son muy notables las diferencias que por regiones arrojaron las pruebas de homogeneidad, en los períodos analizados: en la región occidental, del 30 pasaron al 70 % las series que cumplieron todas y cada una de las pruebas realizadas en los períodos 1931-2000 y 1961-2000, respectivamente. En la región central, las proporciones fueron del 23 y 47 %, y en la oriental de 10 y 50 %.

Finalmente, se hizo al análisis de ciclicidad para el período principal de cálculo 1961-2000, pero esta vez para todas las series completas, o sea las RRZ 1 y 2. Tan elevado número de curvas (589) permitieron delimitar primero las CID zonales y posteriormente definir las fronteras de 5 regiones de sincronía en la ciclicidad hiperanual. Se resumieron CID medias para cada región (Fig. 11). Sin embargo, el principal análisis se efectuó con la RRZ-2, donde al comparar las relaciones espaciales entre las Normas Estándar e Hiperanuales posibilitó definir el mapa de la ciclicidad (Fig. 12) como última salida del proyecto, lo cual permitió pasar de una norma a la otra.

11. Con el ánimo de presentar las diferencias entre los distintos territorios del país, se calcularon las funciones de correlación regionales a partir de los datos más completos y empleando las SU. Se vieron las diferencias entre las distancias mínimas promedios de buena correlación (0,70) en-

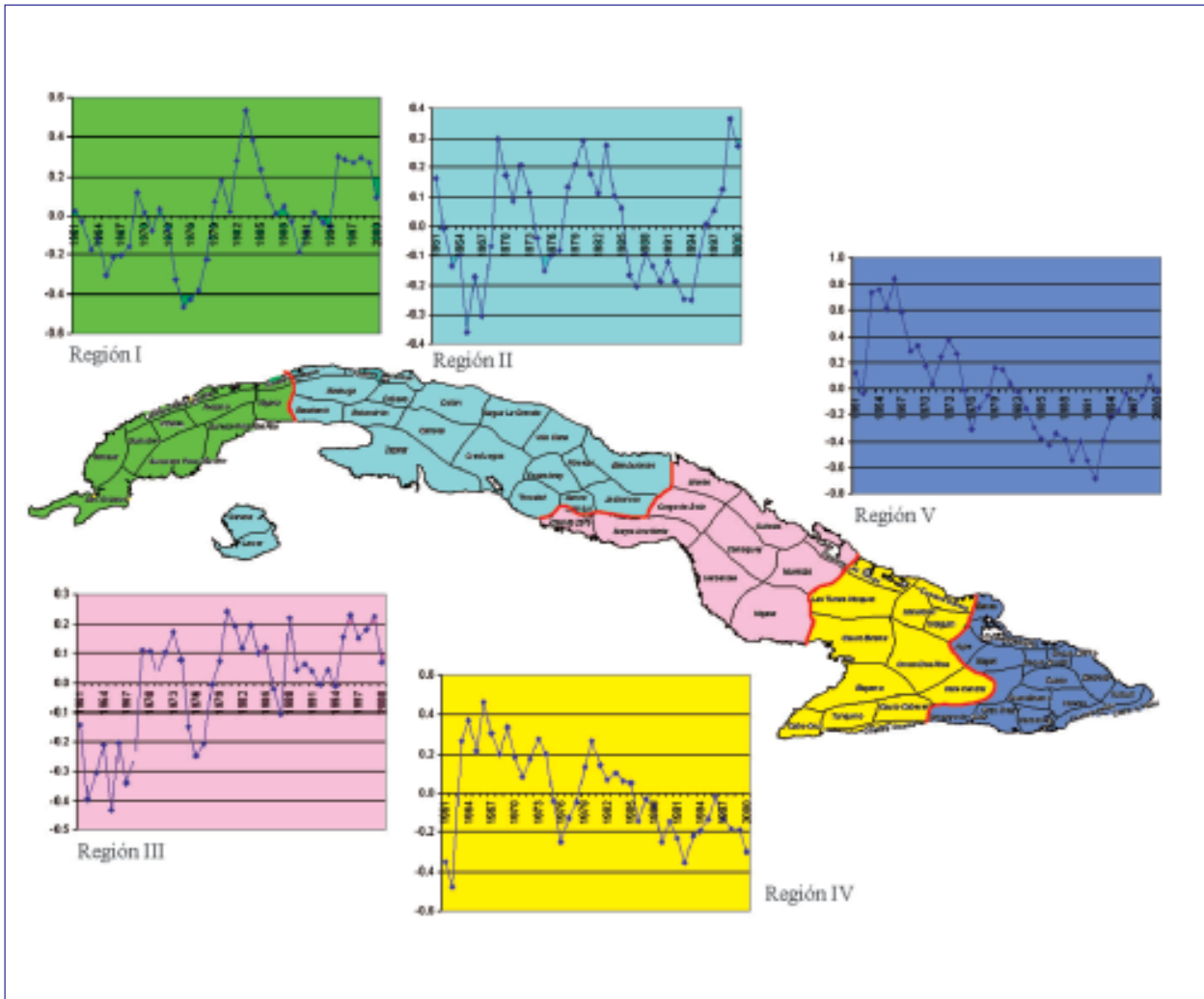


Fig. 11. Curvas Integradas Diferenciadas (CID) promedio regionales.

tre las regiones (representadas en la Fig. 11), así como por temporadas del año (Tabla 6). Llama la atención, lo que corrobora los criterios que se tenía acerca del comportamiento pluvial a lo largo del país, la gran estabilidad de la región occidental respecto a la oriental en las correlaciones dentro del período seco del año, así como que las correlaciones que más rápido se deterioraron son las de la cuarta región (Cubitas-Turquino-Imías), mientras que la de resultados más estables en los diferentes períodos resultó ser Baracoa.

Un último comentario

También fueron de máximo interés los resultados obtenidos con los gradientes pluviométricos. Las máximas diferencias entre las lluvias en las cotas de 100 m (s.n.m.m.) en barlovento y sotavento se

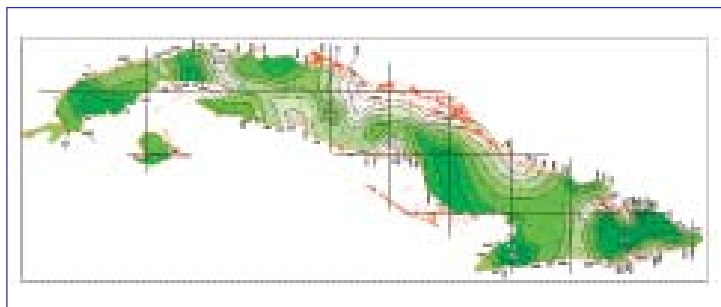


Fig. 12. Mapa de la ciclicidad de Cuba (período 1961-2000).

Tabla 6.
Distancias de correlación mínimas aceptables entre series únicas (SU).

Región (Fig. 11)	Año Hidrológico	Período húmedo	Período seco
Occidente extremo	75	66	210
Medio occidente	60	68	190
Medio centro	80	88	115
Oriente medio	60	60	30
Oriente extremo	75	75	80

observaron en Sierra Cristal (1 206 mm), Viñales (1 162 mm), Turquino (1 148 mm), Maisí (1 056 mm). Las mínimas diferencias, en tanto, se observan en Banes (84 mm), Imías (91 mm), Trinidad (193 mm), Mayarí (302 mm) y Cubitas (351 mm).

Luego de la revisión de las isoyetas por un equipo de especialistas del INRH, éstas fueron digitalizadas, lo que permitió otra etapa en el control de la calidad del mapa. El ajuste final del trabajo fue hecho, nuevamente, en base al criterio de experto mediante el empleo del programa *AutoCAD*. Teniendo activadas las capas de orografía y vegetación, fueron consideradas las relaciones de gradientes pluviométricos en los distintos macizos orográficos, teniendo en cuenta, con mucho mayor detalle que sobre el plano físico a escala 1 : 250 000, las particularidades de cada territorio.

Resultados

A partir de las salidas obtenidas, el estudio proporcionó múltiples resultados relativos al conocimiento de las precipitaciones en Cuba, entre los que se destacan:

1. La media histórica anual nacional disminuyó en relación con el período 1931-1960 en 133 mm, siendo la nueva media de referencia 1 335 mm anuales
2. En las tres regiones del país disminuyen los valores medios: REGIÓN OCCIDENTAL 1 437 mm (25 mm menos), REGIÓN CENTRAL 1 308 mm (103 mm menos), REGIÓN ORIENTAL 1 279 mm (260 mm menos).
3. El mes de mayo resultó el más lluvioso para las provincias: Granma, Santiago de Cuba y Guantánamo.
4. El mes de junio resultó el más lluvioso para las provincias: La Habana, Ciudad de la Habana, Matanzas, Villa Clara, Cienfuegos, Sancti Spíritus, Ciego de Ávila, Camagüey y Las Tunas.
5. El mes de septiembre resultó el más lluvioso para los territorios: Pinar del Río y la Isla de la Juventud.
6. El mes de octubre resultó el más lluvioso para: Holguín.
7. Zonas de mayores lluvias: Baracoa, Sierra Cristal, Sierra Maestra, Sierra del Rosario y Trinidad.
8. Zonas de menores lluvias: Caimanera-San Antonio-Imías, costa norte de Camagüey y Las Tunas, valle medio del Cauto.
9. Las mayores diferencias entre los años húmedos y secos se evidencian en el sur de Guantánamo.
10. Las menores diferencias entre los años húmedos y secos se evidencian en el noroeste de Pinar del Río.
11. En los territorios occidental y central, el 77 % de las precipitaciones cae en el período de mayo a octubre.
12. En el extremo oriental (Guantánamo, Santiago de Cuba, norte de los territorios de Holguín, Las Tunas y Camagüey) el 68 % de las precipitaciones cae en el período de mayo a octubre.
13. De las ocho cuencas hidrográficas de interés nacional, la del Toa cuenta con la media más alta con 2 518 mm anuales, siendo la más baja la de Guantánamo-Guaso con 1 027 mm anuales. En cuanto a las diferencias con las medias anteriores, la cuenca Almendares-Vento resultó la de mayor incremento con 1 446 mm de media actual (174 mm más), y la del Cauto la de mayor disminución con 1 112 mm (367 mm menos). **VH**

* Este estudio fue dirigido por el Ing. Francisco Rodríguez Rodríguez (autor principal de este trabajo), entonces especialista del Servicio Hidrológico Nacional y actualmente de la Delegación de Recursos Hidráulicos de Ciudad de La Habana. Además, contó con la colaboración de otros especialistas, tanto del sistema INRH como de otros organismos, cuyos nombres se relacionan a continuación: Abel Salas García, Aimee Aguirre Hernández, Amarilys Chao Damas, Angela Iznaga Magdariaga, Argelio Fernández Richelme, Ariel Reinoso Bazán, Bartolomé Lazo, Bernardo Lora Borrego, Betsy Arteaga, Braulio Lapinel, Concepción Rodríguez, Diego Emilio Abreu, Eduardo Planos, Elis Llera, Eugenio Martínez, Félix Hernández, Guadalupe Bermúdez, Héctor Solís, Isaac Arronte, Iván González Piedra, José Luis Cal, José Sierra Landa, Julio Cabrerías Quiñones, Manuel Pín González, Matías Pérez Duarte, Mayelín Márquez Monier, Mijaíl Hernández, Oscar Solano, Osmanys Ruíz Angerí, Paulino González, Ramón Pérez, Rosemayre Ricardo Batista, Valentina Estrada Sifontes, Vania Vidal Olivera, Yanisleidys Isalgaray.