Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM
Núm. 45, 2001, pp. 24-38

Alteración del ciclo hidrológico en la parte baja de la cuenca alta del río Lerma por la transferencia de agua a la Ciudad de México

Laura Elena Maderey Rascón*
Arturo Jiménez Román*

Recibido: 25 de febrero de 2000
Aceptado en versión final: 23 de junio de 2000

Resumen. La parte baja de la cuenca alta del río Lerma ha sido seriamente afectada por la utilización irracional que se hizo del recurso agua para su transferencia a la cuenca de México con el fin de complementar el abastecimiento a la Ciudad de México. Dicha afectación ha traído consigo una clara transformación física de la cuenca.

En este trabajo se estudia la alteración causada en la hidroclimatología en la parte baja de la cuenca alta del río Lerma mediante el análisis de información tanto meteorológica como hidrométrica que, o bien forma parte del ciclo hidrológico o lo afecta de manera indirecta. El análisis se hizo a través de la comparación de las tendencias que muestran los parámetros meteorológicos, con períodos de registros comprendidos entre 1920 y 1985, abarcando información anterior a la transformación del área de estudio hasta aproximadamente treinta años después, y con datos hidrométricos examinados en dos lapsos, de 1945 a 1950 y de 1951 a 1980. También se calculó el volumen de agua disponible en la cuenca alta del río Lerma, utilizando la precipitación media anual, la evaporación y el índice de aridez de Köppen registrados en la cuenca, con el objeto de conocer si ha habido una extracción de agua superior a la que la cuenca ofrece, sin que su medio ambiente sea alterado.

Los resultados de la investigación demuestran que, aunque poco pronunciada, existe una alteración de los elementos meteorológicos tratados: las temperaturas medias, máximas y mínimas; las precipitaciones máxima, mínima y media anual, la evaporación potencial y la real, y una evidente modificación en la cantidad de agua de las lagunas que daban origen al río Lerma, así como una extracción de agua que llegó a sobrepasar el volumen de agua disponible de la cuenca alta de este río.

Palabras clave: Ciclo hidrológico, cuenca alta del río Lerma, disponibilidad de agua, hidrometeorología.

Hydrological cycle disturbances at the lower portion of the Lerma River upper basin derived from water transfer to Mexico City

Abstract. The low portions of the Lerma River upper basin have been seriously affected by the irrational use of the water resource for its conveyance to Mexico Basin for supplementing Mexico City's water demand. This affectation has led to a remarkable physical transformation of the basin.

The environmental impact caused to the hydro-climatic features at the lower portions of the Lerma River upper basin is studied by analyzing meteorological and hydrometric data, which are either part of the hydrological cycle or indirectly affect it. The analysis was made by comparing the trends in meteorological elements with records between 1920 and 1985, covering information since prior to approximately 30 years after the transformation, and including hydrometric data examined for two periods: 1945 - 1950 and 1951 - 1980. The available water volume in the Lerma River upper basin was also estimated through mean annual precipitation, evaporation and Köppen's aridity index registered in the basin, to determine whether water extraction has been conducted in excess of the amount available in the basin without altering its natural environment.

The results reveal that, although not too obvious, the meteorological elements studied have been altered, namely mean, maximum and minimum temperatures; maximum, minimum and mean annual precipitations and potential evaporation. A clear change in the amount of water in lagoons that give origin to the Lerma River was also observed, as well as water extraction exceeding the available volume from the Lerma River upper basin.

Key words: Hidrological cycle, Lerma River upper basin, water availability, hydroclimatology.

* Instituto de Geografía, UNAM, Cd. Universitaria, Coyoacán, 04510, México, D. F. E-mail: lauraemr@igiris.igeograf.unam.mx

INTRODUCCIÓN

El ciclo hidrológico, proceso a través del cual se abastecen de agua los seres vivos, constituye una de las partes más importantes de las condiciones naturales de las cuencas hidrológicas.

Es sabido que todos y cada uno de los elementos que conforman una cuenca hidrológica actúan de manera conjunta e interrelacionados, creando un ambiente natural definido. La modificación de alguno o algunos de estos elementos (atmósfera, suelo, vegetación, agua) ocasiona un desequilibrio ambiental que se refleja, con mayor o menor intensidad, en dicho ciclo hidrológico. Por estas razones es importante realizar una evaluación, previa al aprovechamiento de cualquier recurso de una cuenca, sobre la disponibilidad del mismo, entendiendo por esto la cantidad de agua que se puede utilizar, conforme a la capacidad de recuperación del recurso, sin que por ello se desequilibren las condiciones originales de la cuenca.

En el caso de la parte baja de la cuenca alta del río Lerma, ésta ha sido seriamente afectada por la explotación irracional que se hizo del recurso agua sin haber llevado a cabo ninguna investigación anterior en relación con la alteración ambiental que de ésta resultaría.

El presente trabajo tiene como propósito investigar la alteración causada en el ciclo hidrológico de la parte baja de la cuenca alta del río Lerma, como consecuencia de la transferencia de agua a la zona conurbada de la cuenca de México.

El área baja de la cuenca alta del río Lerma se delimitó por la curva de nivel de los 3 000 metros sobre el nivel del mar (msnm), hasta la parte más baja de la cuenca en la estación hidrométrica La "Y". Esta área abarca el valle de Toluca y es la directamente afectada por la transferencia de agua a la cuenca de México. En ella se localizan los lechos de las lagunas que daban origen al río Lerma, la serie de pozos de los que se extrae el agua que es conducida a la Ciudad de México, y la mayor superficie agrícola de la cuenca alta de este río.

El estudio se basa en el análisis de los elementos meteorológicos que influyen en el régimen hidrológico, de la información hidrométrica del área en estudio y de la relación de éstos con los cambios que actualmente presenta el paisaje.

Para el análisis del comportamiento hidrometeorológico del ciclo del agua se consideró la información correspondiente a 20 estaciones meteorológicas, de las cuales se eligieron las tres con el mayor número de años de registro, que son representativas de las distintas zonas del área en estudio. Éstas son: Almoloya del Río, a 2 600 msnm, en lo que fue la laguna del mismo nombre, en la parte más alta de la zona directamente modificada; Lerma, a 2 573 msnm, en la parte central de la zona en estudio, donde se manifiestan las condiciones medias de la misma, y en general, de la cuenca alta del río Lerma, y Toluca, en la ciudad capital del estado, a 2 653 msnm, cuyo desarrollo urbano implica un uso del suelo distinto del que tiene el resto del área en cuestión (Figura 1).

Con el fin de examinar la evolución de las condiciones atmosféricas en la zona en estudio, se determinaron las tendencias de los seis elementos meteorológicos más importantes: *a)* precipitación, *b)* temperatura media, *c)* temperatura máxima promedio, *d)* temperatura mínima promedio, *e)* evaporación potencial para los meses de mínimo y de máximo valor, y los valores anuales de los cinco parámetros, y *f)* evaporación real anual según la fórmula de Turc en las tres estaciones mencionadas, para un período de registro comprendido entre 1940 y 1985 en Almoloya del Río y Lerma, y entre 1920 y 1985 en Toluca.

La información hidrométrica utilizada corresponde a los registros de las estaciones de

aforo Atenco (a 2 571 msnm) y La "Y" (a 2 566.64 msnm), localizadas en el colector general, de donde se tomaron los gastos medios mensuales como datos base para el cálculo de otros promedios que se mencionan posteriormente (Figura 1).

También se calculó el volumen de agua disponible o aprovechable de la cuenca a través de la precipitación media anual de la misma, el índice de aridez de Köppen y la evaporación, con el objeto de compararlo con los volúmenes de agua extraídos anualmente, y determinar en qué momento lo igualaron o sobrepasaron, hecho que desequilibró el ciclo del agua en la zona en estudio y que ha impedido la recuperación de las lagunas.

LA CUENCA ALTA DEL RÍO LERMA

Como se sabe, el río Lerma, unido al lago Chapala y al río Santiago, forma uno de los sistemas fluviales más importantes del país. La cuenca alta del río Lerma está limitada por el parteaguas de las montañas más altas del sistema fluvial Lerma - Chapala - Santiago, al suroriente de la misma. Su parte más baja se delimitó con la estación hidrométrica La "Y", por ser la primera que se localiza en el curso alto del colector principal: el río Lerma (después de la estación hidrométrica Atenco, que mide los derrames de la laguna de Almoloya del Río, donde propiamente nacía el río Lerma) y por ser la que proporciona los datos hidrométricos en función de los objetivos del trabajo.

La cuenca alta del río Lerma comprende el valle de Toluca en el Estado de México, con una extensión de 1 582 km^2, en el que se localiza la ciudad de Toluca, capital de la entidad (Figura 1). En su parte oriental limita con la Cuenca de México, al sur con la cuenca del río Amacuzac, afluente del río Balsas, al occidente con la cuenca del río Cutzamala, también afluente del Balsas, y al norte con la cuenca del río Tula, formador del río Pánuco. Tiene clima templado húmedo con veranos lluviosos y frescos (Cwb, según Köppen), con una temperatura media anual de 12.8° C y una precipitación media anual de 857.2 mm.

El río Lerma, también conocido con los nombres de Almoloya, Chignahuapan, Matlatzingo o Matalzingo, Río Grande, Río Grande de Santiago, el Gran Río y Toluca, nacía en Almoloya del Río. Su origen eran más de cincuenta manantiales que alimentaban a la laguna Almoloya del Río (Romero, 1974). Esta laguna era la más alta de un conjunto de tres que descendían en escalones sucesivos hacia el norte para encauzar sus aguas al río Lerma. De sur a norte se llamaban Almoloya del Río, Lerma y San Bartolo; constituían un sistema lacustre en proceso de senectud, con una longitud máxima de 29 km. Contaban con una isla donde aún se encuentra el pueblo de San Pedro Tultepec (SRH, 1973).

Entre sus principales afluentes se encuentran los torrentes de la vertiente nororiental del Nevado de Toluca, que fluyen hacia el noreste y este del valle, entre los cuales destacan el río Santiaguito, que es en realidad un arroyo que se forma cuando su caudal es suficientemente abundante y entra a la laguna Almoloya como afluente izquierdo, y el río Verdiguel que se origina por los siguientes manantiales: Las Rosas, El Cuervo, La Piedra China y Los Jazmines; atraviesa la ciudad de Toluca y desemboca por la margen izquierda del río Lerma.

Aproximadamente 10 km aguas abajo de la última laguna, la de San Bartolo, el río Lerma recibe su primer afluente de importancia, por su margen derecha, el río Otzolotepec que nace en la sierra de las Cruces a 3 400 msnm (SRH, 1973).

Acción humana en el área baja de la cuenca alta del río Lerma y sus consecuencias

A medida que las necesidades de agua de la creciente conurbación que constituye la Ciudad de México se fueron incrementando, se pensó en las cuencas vecinas para satisfacerlas.

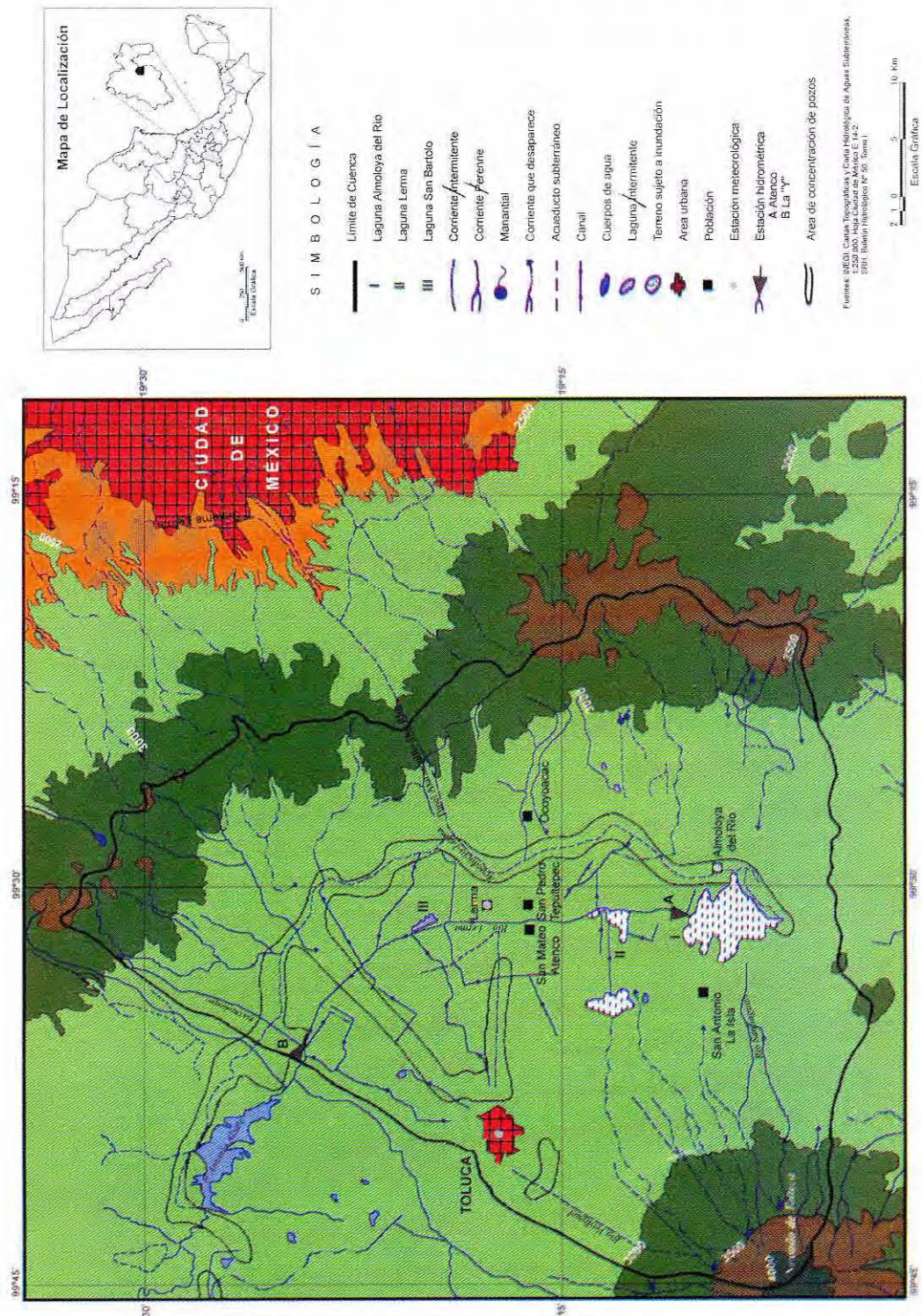

Figura 1. Cuenca alta del río Lerma.

El primer proyecto que se llevó a cabo para complementar la dotación a la Ciudad de México con agua de otras cuencas fue el de la cuenca del río Lerma. En 1942, durante la presidencia del general Manuel Ávila Camacho, se inició la construcción de un extraordinario acueducto desde la población de Almoloya del Río hasta la Ciudad de México, para el cual se requirió la perforación de la montaña. Tiene una longitud de 60.1 km, 24.3 corresponden al acueducto superior del valle de Toluca, 14.3 km al túnel Atarasquillo - Dos Ríos y 21.4 al acueducto interior en el valle de México (Romero, 1974).

El túnel Atarasquillo - Dos Ríos atraviesa la sierra de las Cruces y une al valle de Toluca con la cuenca de México (Figura 1). Es un túnel que cruza el parteaguas continental, desviando las aguas de la vertiente del Pacífico hacia la vertiente del Golfo de México. La obra se terminó en 1951, año a partir del cual inició su funcionamiento y con ello se empezó a afectar el ciclo hidrológico en la cuenca alta del río Lerma.

Los manantiales que brotaban en Almoloya del Río y daban origen al río Lerma desaparecieron, imputándosele este hecho a:

> ... negligentes ingenieros que, buscando niveles más altos en los nacimientos, dinamitaron el lugar y quizá el venero subterráneo, alimentador de todos los manantiales, fue desviado de su curso... (Romero, 1974:158).

Ahora se puede afirmar que las corrientes formadoras del río Lerma se originan en el punto más alto del parteaguas del valle de Toluca, entre ellas están los mencionados ríos Verdiguel y Santiaguito, que nacen en la vertiente nororiental del Nevado de Toluca. En el fondo del valle, debido a la desaparición de los manantiales que alimentaban a las lagunas de donde nacía el río principal, se aceleró el proceso de senectud natural de éstas, convirtiéndose en un conjunto de ciénegas unidas por un canal, considerado como el origen actual del colector general del río Lerma.

La desecación de la parte baja de la cuenca alta del río en estudio no sólo afectó notablemente al paisaje natural al desaparecer las lagunas mencionadas, y en cierto grado al clima, sino también, y de una manera muy importante, a las actividades económicas de la región, especialmente las labores agrícolas, como se ve más adelante.

Por otra parte, cabe agregar que dentro de la propia cuenca alta del río Lerma se han alterado los recursos hidrológicos; como la corriente del río Verdiguel que se aprovecha en su mayor parte para el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Toluca, por lo cual la aportación que llega al río principal es prácticamente nula y está formada por aguas negras e industriales (SRH, 1973).

Evaluación de la alteración del ciclo hidrológico en el área baja de la cuenca alta del río Lerma, causada por la transferencia de agua a la cuenca de México

La consecuencia más perceptible debida a la modificación del ciclo del agua, en su parte propiamente hidrológica, es la desecación de las lagunas mencionadas, cuyos derrames daban lugar al nacimiento del río Lerma, seguida de la disminución o ausencia de escurrimiento y su relación con el paisaje y con las actividades de subsistencia que, aunque no forman parte del ciclo mismo, sí dependen de él.

La información hidrométrica evidencia esa desecación de la parte baja de la cuenca alta del río Lerma, que se manifiesta en el cambio del paisaje; la vegetación y la fauna se modificaron y las lagunas ya no vierten sus aguas de manera escalonada, salvo cuando la precipitación es muy abundante. La mayor parte del año los gastos en el Lerma son nulos.

En la Tabla 1 se presentan los promedios de los gastos o caudales medios mensuales y

anual en m^3/seg de las estaciones hidrométricas o de aforo Atenco y La "Y" para dos períodos de registros separados por la fecha en que se inició el bombeo del agua hacia la Ciudad de México. Para la estación Atenco también se muestra el año 1951, en el que se inició la conducción del agua a la cuenca de México.

En la estación de aforos Atenco se miden los derrames de la laguna más alta, Almoloya del Río, que como ya se mencionó, daba lugar al nacimiento del río Lerma. Como se observa en la tabla I, en el período anterior a la desecación de las lagunas (1945-1950) todos los meses del año la laguna referida vertía en el cauce del río Lerma los volúmenes de agua sobrantes; en la actualidad los caudales han disminuido de tal manera que en los meses de estiaje y de mayor calor: marzo, abril y mayo, debido a la evaporación, y en los meses de lluvia de mayo a julio, debido a que la laguna capta la precipitación, los gastos desaparecen. Durante los meses de agosto a febrero, cuando el agua precipitada llena la laguna, ésta vierte sus escasas demasías en el cauce del río Lerma. Estos sobrantes corresponden a gastos menores de 0.50 m^3/seg y van disminuyendo a medida que avanza la época de estiaje hasta llegar a ser casi de 0 m^3/seg en el mes de febrero. Los caudales correspondientes al año 1951 muestran objetivamente cómo casi inmediatamente después de que el agua empezó a ser bombeada hacia la Ciudad de México, descendieron a cero, iniciándose así la desecación de las lagunas, el cambio del paisaje y de las actividades de la región.

En el caso de la estación hidrométrica La "Y" se nota que en el período de estiaje el caudal disminuye, como era de esperarse, en el período posterior a la desecación de las lagunas (1951-1980), pero en la época de lluvias éste aumenta. Este incremento en el caudal de la época húmeda, que debería ser disminución, obviamente no proviene de un aumento en el nivel de agua de las lagunas, sino de la alteración de algún otro componente o componentes de la cuenca que se refleja en este aumento de caudales. Uno de los componentes cuya alteración se manifiesta en el incremento del agua de escurrimiento, es la vegetación, que al ser removida del suelo permite el escurrimiento libre del agua, dificultando su infiltración.

Tabla 1. Promedio de los caudales medios mensuales en m^3/seg

Estación hidrométrica	Período	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
ATENCO	1945-1950	2.0	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.9	2	2.1	2	1.9	1.9	1.9
	1951-1980	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1
	1951	2.1	1.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	0.0	0.0	0.0	0.3
La "Y"	1945-1950	3.2	2.3	1.4	1.1	1.4	2.0	4.5	7.4	9.1	7.5	4.9	3.6	4.0
	1951-1980	1.4	0.8	0.5	0.7	1.2	2.9	6.2	8.7	10.7	8.7	4.5	2.4	4.1

La deforestación de las partes altas de la cuenca alta del río Lerma, aunque es poco apreciable (comparación entre SRH, 1958 y SPP-INEGI, 1984) revela su trascendencia en la información contenida en la Tabla 1, ya analizada.

Otro elemento que puede influir en este aumento del caudal del río Lerma es la extracción de agua subterránea que es vertida en el cauce del río después de haber sido aprovechada en la parte baja de la zona en estudio. Otro aspecto vinculado con el cambio del ciclo hidrológico se refleja, como ya se mencionó, en la transformación del paisaje y de las actividades de subsistencia del área en cuestión. "El valle de Toluca era conocido no sólo por su gran riqueza agrícola, sino también por las ciénagas que caracterizaban su complejidad ecosistémica".

> Este medio lacustre, complejo, cambiante, pero rico en su biodiversidad, ha ofrecido condiciones únicas a los grupos humanos que se asentaron a lo largo de la ribera de las antiguas ciénagas del Alto Lerma... Entre las actividades de subsistencia resaltan las que están relacionadas con la obtención de alimentos y la producción artesanal... Lo que se observa hoy es una sombra fatalista de aquellos días.
>
> Una de las causas principales de esta transformación se gestó a partir de los cambios tanto de origen exógeno como endógeno en las condiciones lacustres, pues los diversos proyectos para la canalización de agua hacia el Distrito Federal, iniciados en 1942, tuvieron como consecuencia la desecación de la ciénaga del Alto Lerma. Sin agua, el ecosistema acuático, que ofrecía múltiples opciones a la vida de los habitantes ribereños, se transformó en suelo de cultivo salinizado y sujeto a frecuentes inundaciones, decididamente no óptimo. A estos cambios ecosistémicos se atribuye, precisamente, la desaparición de muchos pescadores, cazadores y recolectores... Sin las ciénagas, ordenador principal que estructuraba la vida lagunera de esta región, hubo, en forma casi simultánea, otros cambios en la composición poblacional en la mayor parte de los grupos humanos asentados en esta zona. Sólo un número reducido de personas sigue explotando todavía como antes, los recursos de lo que queda de las antiguas ciénagas (Sugiura, 1998:227 y 228).

En la actividad agrícola del área en estudio se detectó mediante trabajo de campo y comunicaciones personales, una disminución en el número de hectáreas de tierras de labor con riego y un aumento en las de temporal. Esto también se corroboró cuantitativamente con la información obtenida de la comparación de los censos agrícolas de 1950, 1960, 1970 y 1990. En el municipio de Almoloya del Río la superficie agrícola de temporal aumentó de 308 a 1 028 ha; en el de Lerma la superficie de riego disminuyó de 134 a 79 ha, en cambio la de temporal se incrementó de 4 263 a 6 881 ha y en el municipio de San Mateo Atenco, de 58 ha con riego, en 1960 bajó a 2 en 1970, y las tierras de temporal aumentaron de 1 226 a 1 533 ha. Sin embargo, en algunos municipios también la superficie cultivada de temporal descendió entre 1970 y 1990: en Ocoyoacac bajó de 3 026 a 1 959 ha y en San Antonio Isla de 1 081 a 406 ha, hecho que sugiere una reducción general de la superficie total de tierras de labor.

Por otra parte, los cambios producidos en la fase atmosférica del ciclo del agua son menos apreciables y sensibles, y pueden pasar inadvertidos; por ello es importante su observación.

En la Figura 2 se presentan las gráficas obtenidas para Almoloya del Río. En ellas se aprecia una tendencia a aumentar de la precipitación en el mes de mínima y en la anual, mientras que en el de máxima disminuye.

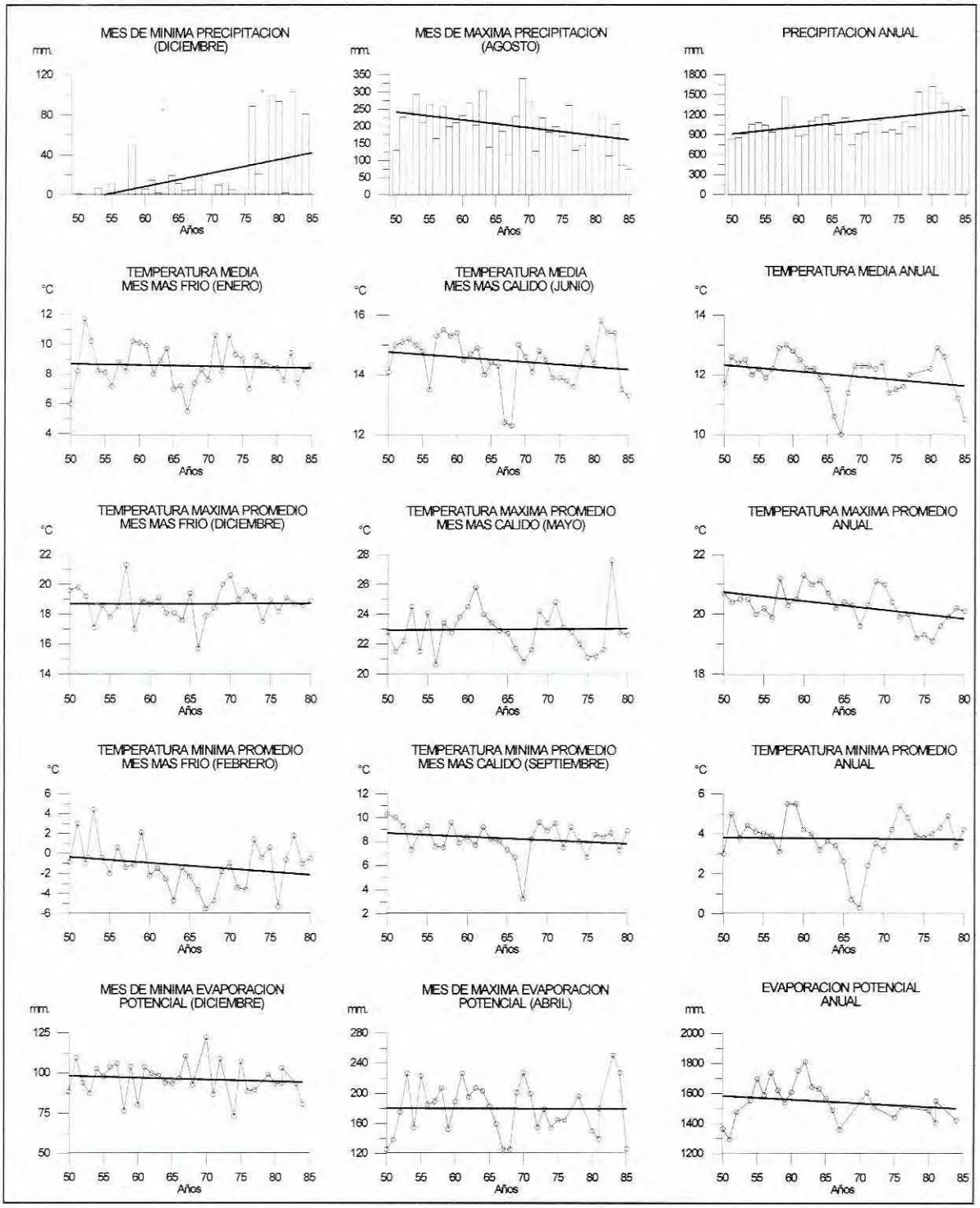

Figura 2. Tendencia de los elementos hidrológicos y climatológicos de la cuenca del río Lerma en la estación meteorológica Almoloya del Río.

En los tres índices de temperatura se observa una tendencia general a disminuir, aunque la inclinación de la misma no es muy clara en el mes más frío para las temperaturas media y máxima promedio y en la anual para la mínima promedio, en las cuales más bien permanece estable. La evaporación potencial tiende a disminuir ligeramente en el mes de mínima y en la anual, y a la estabilidad en el de máxima. La gráfica correspondiente a Almoloya del Río en la Figura 4 muestra la variación de la evaporación real, con una leve pero clara propensión a aumentar a través del tiempo.

La Figura 3 presenta las tendencias medias de los elementos meteorológicos en la cuenca alta del río Lerma, ya que la estación que las registra, Lerma, está situada en la parte media de la cuenca. En general se advierte que las tendencias de los elementos son parecidas a las de Almoloya del Río, aunque más definidas. La precipitación en los tres casos considerados tiende a aumentar. Las temperaturas tienden a disminuir, con excepción de la temperatura máxima promedio del mes más cálido que presenta un ligero incremento. La evaporación potencial tiende claramente a disminuir tanto en los meses extremos como en la anual. La tendencia de la evaporación real, como se muestra en la gráfica respectiva en la Figura 4, registra un incremento muy leve a través del período de estudio.

Estas tendencias, consecuencia de una alteración hidrológica en la zona de estudio, se explican con base en la interrelación que existe entre los componentes ambientales aquí analizados.

Considerando que las estaciones Almoloya del Río y Lerma son las que se localizan en la zona de la cuenca directamente modificada, y dado que en ambas los cinco parámetros meteorológicos estudiados presentan en general las mismas tendencias, si bien con distinto grado de inclinación, se hace el análisis conjunto de las dos estaciones.

La tendencia creciente de la precipitación (Figura 2 y 3) se relaciona con la desecación del terreno que provoca una disminución de la humedad en la atmósfera, modificando las condiciones en las que se lleva a cabo la convección local de las masas de aire que originan la precipitación, aumentando la intensidad de este proceso, y por estar localizada la zona en estudio en una meseta donde la temperatura es baja durante el verano, época de lluvias, la diferencia entre la temperatura de la superficie y la que existe a pocos kilómetros sobre la vertical ahora contrasta más que cuando existían los cuerpos de agua. Esta condición incrementa las lluvias convectivas y por tanto la altura del agua precipitada.

La tendencia negativa de los tres aspectos de la temperatura es mucho menos pronunciada en Almoloya del Río que en Lerma, debido a su posición geográfica; la primera tiene mayor altitud y se encuentra protegida por la zona montañosa y su vegetación. Lerma, en cambio, se encuentra en el centro de la cuenca y registra con mayor sensibilidad los fenómenos atmosféricos que ocurren en la misma. Se puede afirmar que en Almoloya del Río la temperatura permanece estable a lo largo del período estudiado, únicamente se registra una tendencia decreciente en las temperaturas media del mes más cálido, media anual, máxima promedio anual y mínima promedio del mes más frío. En Lerma estas tendencias son más definidas en casi todos los casos, sobre todo en las temperaturas mínimas promedio. Este comportamiento de la temperatura ante el cambio ambiental de la cuenca obedece a que ya no existe la acción reguladora térmica de las lagunas, especialmente en invierno, y la influencia de la vegetación es escasa porque las superficies desecadas no han sido forestadas, son áreas dedicadas a la agricultura.

La evaporación potencial, que en realidad es el poder evaporante de la atmósfera, depende directamente de la temperatura. La disminución de la temperatura implica un aumento de la presión atmosférica y una disminución en su

capacidad para absorber humedad. En el caso de Almoloya del Río, en la parte alta sur de la cuenca, se advierte que, al igual que las temperaturas, la evaporación potencial muestra una muy leve tendencia a disminuir, o bien no varía. Para las condiciones medias de la cuenca, reflejadas en la estación Lerma, destaca una tendencia negativa en la evaporación potencial, coincidente con la de las temperaturas, que se aprecia casi paralela a la de las mínimas promedio.

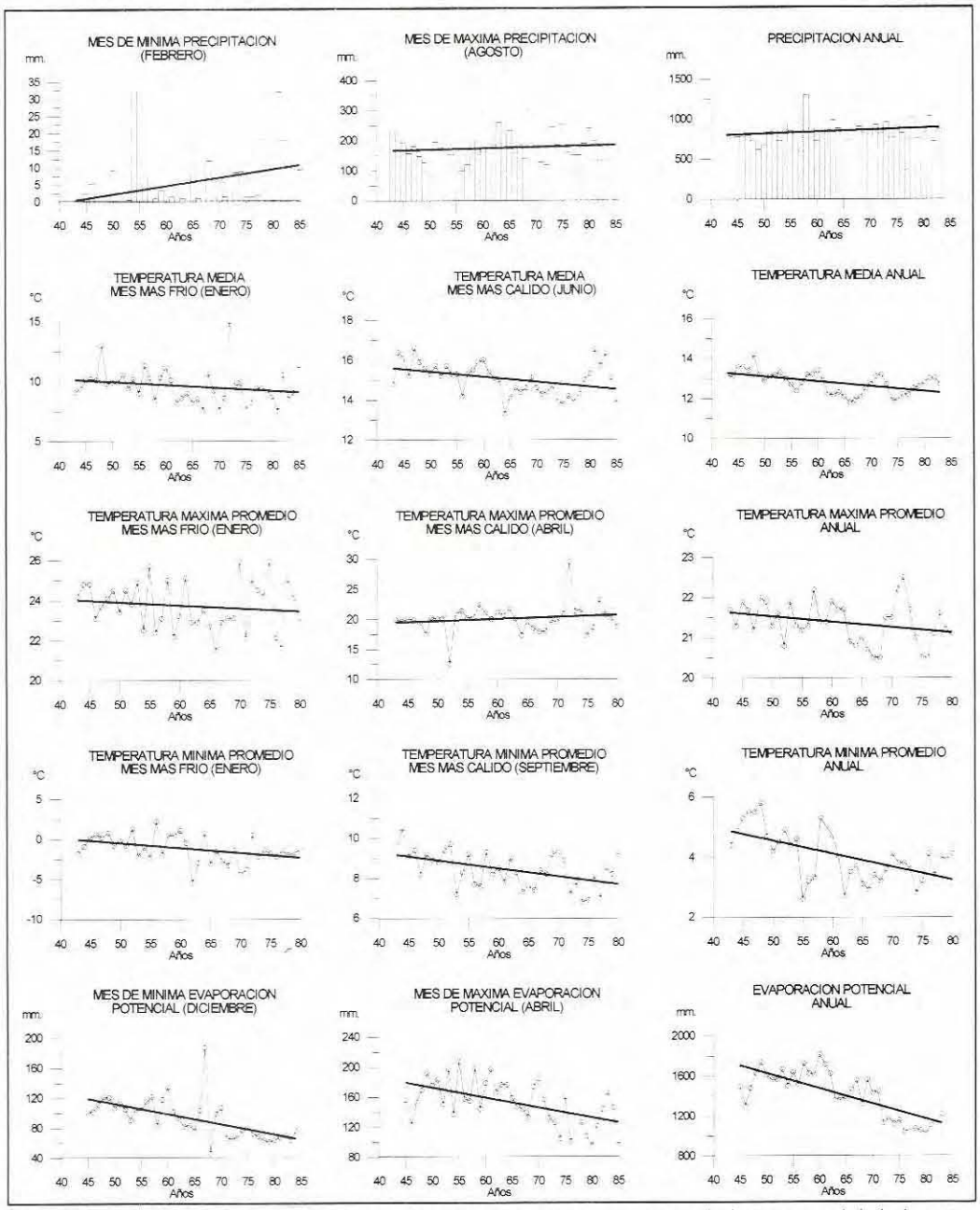

Figura 3. Tendencia de los elementos hidrológicos y climatológicos de la cuenca del río Lerma en la estación meteorológica Lerma.

La tendencia a aumentar de la evaporación real en las estaciones Almoloya del Río y Lerma (Figura 4) se debe al incremento en la precipitación anual, y la tendencia a bajar en la estación de Toluca se debe tanto a la baja temperatura de la zona como a la tendencia negativa de ésta (Figura 3). Sin embargo, dada la insignificante tendencia de la evaporación real en las dos primeras estaciones, se puede afirmar que actualmente casi no varía en la zona más afectada de la cuenca.

En la Figura 4 se observa que los cambios de los elementos considerados en la estación Toluca registran tendencias diferentes a las otras dos estaciones meteorológicas. Cabe aclarar que la información utilizada pertenece a dos sitios diferentes, uno es estación meteorológica situada en las orillas de la ciudad de Toluca y a ella corresponden los registros de temperatura y precipitación, y la otra es el observatorio de Toluca, localizado en el centro de la ciudad, del cual se obtuvo la información de la evaporación potencial, dato que no proporciona la estación mencionada. El propósito de analizar los registros de la estación ubicada en las orillas de la ciudad, complementándolos con los de la evaporación potencial del observatorio y no con los registros de este último, es el de detectar los cambios en los elementos estudiados con la menor influencia posible del ambiente urbano, que ocultaría los efectos causados por la desecación del río Lerma y las lagunas alimentadoras del mismo. No obstante haber tomado esta previsión, por lo general las tendencias de los elementos son diferentes a los de la zona directamente afectada, con excepción de las de las temperaturas medias y mínimas promedio, lo cual permite inferir una reacción combinada de los elementos meteorológicos por dos causas: una, la que motiva a esta investigación, y otra, la influencia urbana de la ciudad de Toluca.

La precipitación tiende levemente a disminuir y la temperatura máxima promedio y la evaporación potencial presentan tendencia a aumentar. El decremento en la precipitación se debe posiblemente a la influencia que ejerce la intensa convección desarrollada por la existencia de la isla de calor en el centro del área urbana de la ciudad de Toluca (Jáuregui, 1979), consecuencia de la extensión de la plancha de cemento, lo cual provoca un aumento de precipitación hacia el centro de la ciudad y una disminución hacia el exterior de la misma. La tendencia negativa de la evaporación real (Figura 5) resulta de la disminución de la precipitación.

DISPONIBILIDAD DE AGUA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO LERMA

Como se mencionó al principio del trabajo, el ciclo del agua es el proceso mediante el cual se realiza el abastecimiento de agua a los seres vivos, de manera que al alterarse éste, también se modifica la disponibilidad de agua en las cuencas hidrográficas, para su aprovechamiento.

El agua aprovechable en cuencas hidrográficas de clima húmedo corresponde a "la cantidad de agua disponible para su utilización, sin que resulte afectada la ecología de la cuenca, en especial el ciclo hidrológico en lo que a su balance se refiere" (Maderey, 1992:89).

Para estimar el volumen de agua aprovechable (Vp) en cuencas húmedas, se utilizan como variables el índice de aridez de la clasificación climática de W. Köppen (r; Köppen, 1948) que por sus características es de fácil aplicación hidroclimática e indica la precipitación mínima requerida para que un lugar, en este caso la cuenca, sea húmedo; la precipitación media anual que recibe la cuenca (P); la evaporación de la precipitación media anual que entra a la cuenca (Ep) y la evaporación de r (Er), integrando la siguiente fórmula:

$$Vp = (P - Ep) - (r - Er)$$

(P - Ep) representa el volumen máximo de agua que ingresa a la cuenca a través de la precipitación, y (r - Er) el volumen mínimo que la cuenca debe recibir y conservar para satisfacer sus necesidades de humedad; consti-

tuye la reserva de agua de la misma. La diferencia entre ambos volúmenes es la cantidad de agua aprovechable de la cuenca (Maderey *et al.*, 1995).

Al aplicar la fórmula anterior a la cuenca alta del río Lerma, con 857.2 mm de precipitación media anual (P) y 12.8° C de temperatura media anual, utilizando la fórmula de Turc para calcular Ep y Er, resultaron 292.3 mm de precipitación media anual entrante a la cuenca, (P-Ep) equivalentes a un volumen máximo de agua que llega a ella de 462 418 600 m^3, es decir, *14 663.2 l/seg.*, mismo que de utilizarse en su totalidad impediría que la cuenca retuviera la cantidad de agua suficiente para mantener su carácter de húmeda.

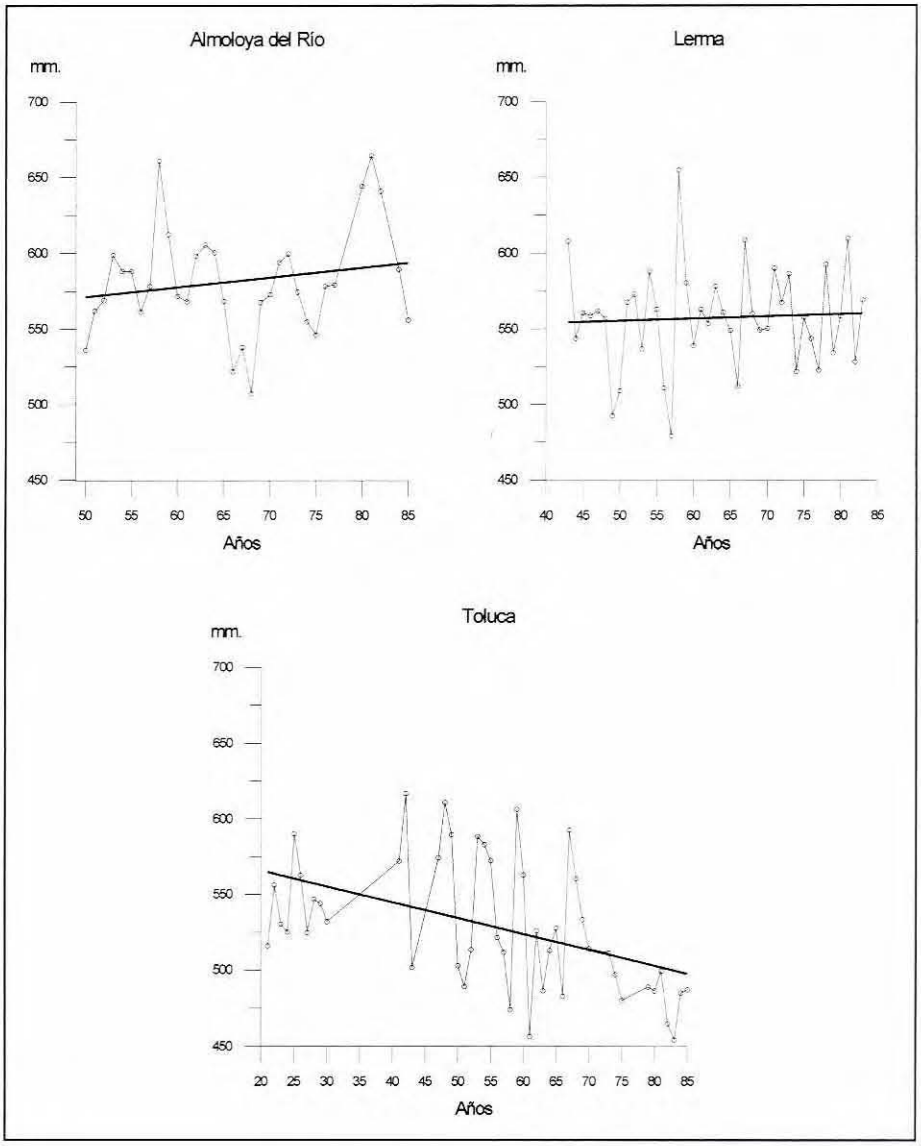

Figura 4. Tendencia de los elementos hidrológicos y climatológicos de la cuenca del rio Lerma

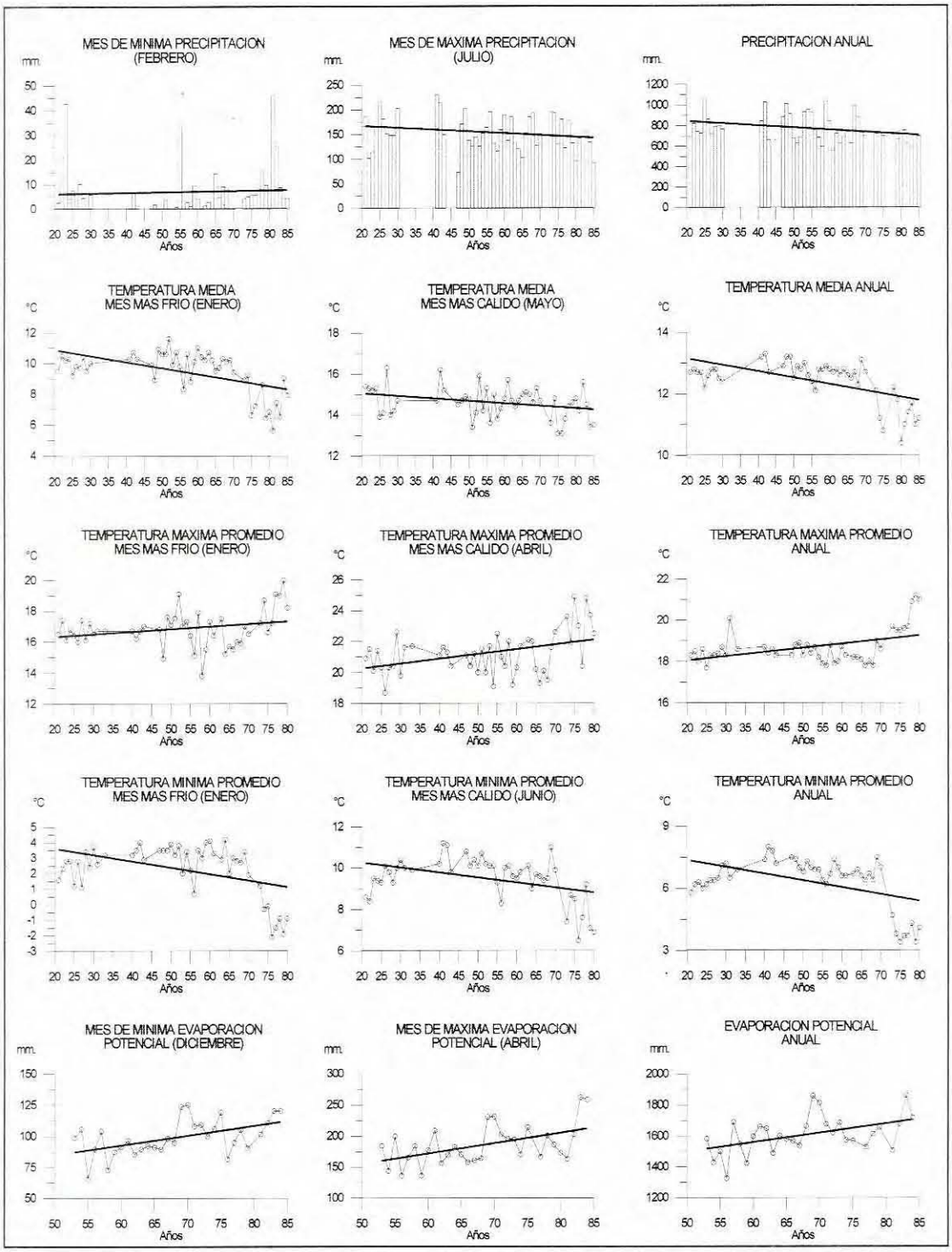

Figura 5. Tendencia de la evaporación real según Turc.

La reserva de agua de la cuenca (r-Er). se estimó en 91 mm, que significan un volumen de 143 962 000 m^3 de agua, 4 565 l/seg. El volumen de agua aprovechable (Vp) se valúa en 201.3 mm, o sea 318 456 600 m^3, 10 098.2 l/seg.

> El agua de la cuenca alta del río Lerma se destinaba principalmente para uso agrícola. Al principiar la década de los años cincuenta, se empezó a abastecer con ella a la ciudad de México a través de grandiosas obras que la transportan de una cuenca a otra. Aparentemente había líquido suficiente para satisfacer ambas cuencas, sin embargo, en la época de estiaje ha sido necesario reducir el volumen que se empezó a transferir, hasta en un 70% aproximadamente. Con objeto de satisfacer las necesidades de la ciudad de México se llegaron a extraer 14 000 l/seg (Guerrero *et al.*, 1982), cifra que casi iguala al volumen máximo de agua que entra a la cuenca y que ha ido decreciendo, de manera que, de 5 804 l/seg en 1986, el caudal exportado descendió a 4 076 l/seg en 1990, según información de la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Departamento del Distrito Federal (Maderey, 1992:92-93).

De acuerdo con información proporcionada por la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Gobierno del Distrito Federal, cuando el sistema hidráulico de 234 pozos ubicados en el Estado de México en la parte baja de la cuenca alta del río Lerma comenzó a funcionar (1951), se enviaban al Distrito Federal aproximadamente 4 m^3/seg de agua; en 1960 se extrajeron cerca de 10 m^3/seg, cantidad equivalente al volumen de agua aprovechable de la cuenca (10.1 m^3/seg), llegando a efectuarse una extracción máxima, en 1974-1975, de 14 m^3/seg, caudal que representa la cantidad máxima aproximada de agua que entra en la cuenca (volumen de agua aprovechable más el agua de la reserva), es decir, se sacó el total de agua de la cuenca provocando un desequilibrio hidrológico que llevó a la incapacidad de las lagunas para alimentar el nacimiento del río Lerma. Como consecuencia, los campesinos de la parte baja de la cuenca alta del río Lerma empezaron a protestar por la falta de agua, lo cual dio lugar a la disminución paulatina de la extracción, de tal manera que en 1976 ésta se redujo a 10 m^3/seg (volumen de agua aprovechable de la cuenca), gasto que ha ido en decremento hasta 3.9 m^3/seg en abril de 2000.

A partir de la información anterior, se observa que el agua extraída de la zona objeto de estudio para complementar el abastecimiento a la Ciudad de México, está siendo restituida a la cuenca alta del río Lerma, sin embargo, esta restitución es parcial, ya que si bien el caudal de extracción ha disminuido, del resto del agua sólo una porción se conserva para la recuperación de las lagunas, pues las actividades agrícolas de la región la requieren para su desarrollo.

CONCLUSIONES

El análisis de los elementos atmosféricos que influyen o forman la fase meteorológica del ciclo del agua en la parte baja de la cuenca alta del río Lerma refleja una tendencia a cambiar, que es consecuencia de la desecación del área lacustre de la región estudiada. Esta tendencia es poco pronunciada, ya que, aunque la desecación se manifiesta en la superficie, principalmente por la falta de agua y por la transformación del paisaje, al desaparecer las lagunas que la caracterizaban y ser sustituidas por superficies agrícolas sujetas a inundaciones en los años en que la precipitación sobrepasa su valor medio, los patrones de humedad son prácticamente iguales en la zona directamente afectada; esto se observa a través de la variabilidad de la precipitación y la temperatura en las estaciones Lerma y Almoloya del Río. De cualquier manera, las alteraciones se están produciendo y las tendencias que éstas tomen dependerán de la evolución del paisaje de la parte baja de

la cuenca alta del río Lerma.

En la estación Toluca, se infiere que las tendencias de los elementos meteorológicos se deben, más que a la alteración de la parte baja de la cuenca alta del río Lerma, a la influencia del crecimiento del espacio urbano sobre el medio ambiente.

Por último, aún cuando se observa una tendencia a aumentar de la precipitación, y el bombeo de agua a la Ciudad de México ya ha disminuido a una cantidad menor que la del volumen de agua disponible o aprovechable, la explotación del agua ha sido tal, que si se pretendiera llevar a cabo la restauración de las condiciones originales de la parte baja de la cuenca alta del río Lerma, ésta se lograría a muy largo plazo, como consecuencia del mal manejo que se ha hecho del recurso.

RECONOCIMIENTOS

Se agradece la colaboración de Cuauhtémoc Torres Ruata y Francisco Cruz Navarro en la recopilación y depuración de la información hidrológica y meteorológica de las estaciones ubicadas en la cuenca en estudio; de Lourdes Godínez Calderón en el procesamiento estadístico de datos de las estaciones meteorológicas y la elaboración de las gráficas de las tres estaciones en estudio, y de María Elena Cea Herrera en la revisión del material gráfico, el cálculo de la evaporación real según Turc y la preparación de la versión final del trabajo.

NOTAS

[1] $E = P / [(0.9) + (P^2/L^2)]1/2 \quad L = 300 + 25t + 0.05t^3$ (Turc, 1954; Maderey *et al.*, 1995).

[2] En una entrevista personal, un campesino del valle de Toluca relató a los autores del trabajo, cómo el día que se inauguró la obra y se empezó a conducir el agua a la cuenca de México a las 10 a.m., tres horas después el agua de la laguna de Almoloya del Río había descendido a un nivel tal, que los peces se veían saltar moribundos.

[3] Las Figuras 2, 3 y 5 muestran la tendencia de cada uno de los parámetros de estudio. Cabe hacer notar que la escala de los datos graficados cambia según la amplitud de su variación, por lo cual parecen tener cierta semejanza.

REFERENCIAS

Guerrero V., G., A. Moreno F. y H. Garduño V. (1982). *El sistema hidráulico en el D. F. Un servicio público en transición*, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Secretaría de Obras y Servicios, Departamento del Distrito Federal, México.

Jáuregui O., E. (1979), "La isla de calor", *Boletín*, núm. 9, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 27-37.

Köppen, W. (1948), *Climatología*, versión directa de P. R. Henrichs Pérez, dirigida por J. A. Vivó, Fondo de Cultura Económica, México.

Maderey R., L. E. (1992), "Impacto ambiental en la cuenca alta del río Lerma causado por la transferencia de agua a la cuenca del valle de México", *Memorias del XIII Congreso Nacional de Geografía*, tomo I, INEGI, CONACYT, UNAM y SMGE, México, pp. 88-94.

Maderey R., L. E., A. Jiménez R., M. E. Cea H. y C. J. Torres R. (1995), "Aplicación de un criterio climatológico para conocer la disponibilidad de agua en cuencas de clima húmedo en la República Mexicana", *Memorias, Segundo Taller de Estudio de País: México ante el Cambio Climático Global*, Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAP, US Country Studies Program, UNAM, Cuernavaca, Mor., México, pp. 159-164.

Romero Q., J. (1974), *Almoloyan. Su río y puentes coloniales. Su acueducto*, Gobierno del Estado de México, Toluca, México.

SPP-INEGI (1984), Carta de uso del suelo y vegetación, escala 1:250 000, hoja E 14-2, México.

SRH (1958), *República Mexicana. Carta de aprovechamiento de aguas y suelos*, escala 1:1 000 000, hoja 10 – México, Secretaría de Recursos Hidráulicos, México.

SRH (1973), *Boletín Hidrológico*, núm. 50, Secretaría de Recursos Hidráulicos, Dirección de Hidrología, México.

Sugiura Y., Y. (1998), *La caza, la pesca y la recolección: etnoarqueología del modo de subsistencia lacustre en las ciénagas del Alto Lerma*, Instituto de Investigaciones Antropológicas, UNAM, México.

Turc, L. (1954), "El balance hídrico de los suelos, relación entre las precipitaciones, la evaporación y el escurrimiento", *3ª Jornada de Hidráulica*, Argel, 12-14 abril, *Anuario Agronómico y Suelos Africanos*, vol. III.