

EL BALANCE HIDROLOGICO DEL LAGO TITICACA
UNA CONTRIBUCION AL APROVECHAMIENTO DE SUS AGUAS

Por: Albrecht Kessler y Félix Monhein
Instituto de Meteorología y Climatología
Hannover, República Federal Alemana.

AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA



Reproducido por la Comisión de Aguas Subterráneas
Dirección de Irrigación
Ministerio de Fomento y O. P.
Lima, 1967

2

EL BALANCE HIDROLOGICO DEL LAGO TITICACA
UNA CONTRIBUCION AL APROVECHAMIENTO DE SUS AGUAS

Por: Albrecht Kessler y Félix Monhein
Instituto de Meteorología y Climatología
Hannover, República Federal Alemana.

Uno de los autores de esta ponencia publicó en el año 1956 un libro sobre la climatología y la hidrología de la cuenca del Titicaca, en el que partiendo de los entonces ya discutidos proyectos para el aprovechamiento de las aguas del mencionado lago en la obtención de energía eléctrica y para la irrigación en la costa pacífica, trató de demostrar que estos proyectos estaban parcialmente basados en presupuestos situados totalmente fuera de la realidad, ya que en ellos se contaban con una descarga media del lago Titicaca de hasta 140 m³/seg. y por lo tanto con una posible toma de agua de 80-100 m³/seg. Frente a estos datos el autor trató de demostrar que la descarga del lago asciende a unos 20 m³/seg.

Entretanto los proyectos para el aprovechamiento de las aguas del Lago Titicaca han seguido tomando forma. En especial el Perú y Bolivia han firmado en 1955 y 1957 varios acuerdos sobre la investigación común de las posibilidades hidrológicas y económicas correspondientes, habiéndose creado para este fin una Comisión Mixta boliviano-peruana. El artículo I del Convenio de 1957 determina expresamente que los proyectos correspondientes no deberán afectar substancialmente el volumen de agua, producto de las excedencias del lago que anualmente escurren por el río Desaguadero en el lugar denominado Concordia. Pese a esto el entonces Presidente de la Junta de Control de Energía Atómica del Perú, General Sarmiento, presentó en 1960 un nuevo anteproyecto basado otra vez en una toma de agua de 50 m³/seg.

Este proyecto fué examinado el mismo año por ingenieros de la Empresa "International General Electric Co". que llegaron a la conclusión de que el "Proyecto Lago Titicaca" es viable desde un punto de vista de ingeniería que pudieran encontrarse en el diseño, aprovisionamiento de equipo y final construcción del proyecto.

Con el fin de poder llegar a un mejor conocimiento de las bases hidrológicas de este proyecto, el Perú y Bolivia han instalado desde 1956 numerosas nuevas estaciones meteorológicas en la cuenca del Titicaca, habiendo además ambos países llevado a cabo desde 1957, numerosas mediciones de las descargas en los afluentes más importantes del Lago Titicaca y en el Desaguadero. Los autores de la presente ponencia tuvieron ocasión de examinar y valorar en 1962 el material resultado de estas observaciones, material que hace posible hoy un mejor enjuiciamiento del clima y de la hidrología del Lago Titicaca que el expuesto en el libro de 1956. Los conocimientos así obtenidos son de gran importancia no sólo para los proyectos de aprovechamiento energético del Lago Titicaca sino que también son de gran interés para la geografía general y la hidrología, pues los autores no conocen hasta hoy ninguna investigación que apoyándose en mediciones es lo su-

ficientemente exactas muestre el cuadro de valores de evaporación de un gran lago tropical situado a tan gran altura.

En el libro de 1956 sobre la climatología y la hidrología del Lago Titicaca se dispuso para el cálculo del balance hidrológico del lago de los siguientes valores:

- a) Las mediciones llevadas a cabo por la Empresa Mauricio Hochschild y C^o sobre el caudal del Desagüadero en su salida del Lago Titicaca.
- b) Los niveles del lago observados continuamente desde 1912. La puesta en relación de estos dos grupos de observaciones permitió determinar la descarga media del Lago Titicaca para un período de tiempo de varios años en unos 20 m³/seg.
- c) Las mediciones de precipitaciones, llevadas a cabo en 6 estaciones de la cuenca del Titicaca y en 11 estaciones de sus alrededores inmediatos. Con ayuda de estas mediciones se tomaron por dadas como precipitación media anual sobre el lago 625 mm. y como precipitación media anual en la zona de captación 670 mm.
- d) Las mediciones de la evaporación efectuadas en algunas estaciones meteorológicas y que por ejemplo, para Puno arrojaron el valor promedio para 10 años de 1900 mm. En la realización de estas mediciones ha habido sin embargo, errores metodológicos y con toda seguridad dan un valor demasiado elevado.

Sobre todo la evaporación del lago es seguramente mucho menor.

El autor la calculó en 1956 de un modo algo arbitrario en 1500 mm.

Con ayuda de estas mediciones y dando por supuestas tanto la evaporación como las precipitaciones fue entonces posible realizar una estimación del balance hidrológico del lago. Según esta estimación las entradas de agua en el lago corresponden en un 60.5% al flujo procedente de la zona de captación y en un 39.5% a las precipitaciones sobre el lago. Por el contrario, en las salidas de agua, corresponden el 95% a la evaporación y solamente el 5% a la descarga por el Desagüadero. Pero hay que insistir en que esta evaluación se basa en gran medida en los valores sólo aproximadamente conocidos de las precipitaciones sobre el lago y en los valores algo arbitrariamente determinados sobre la evaporación en la superficie del lago.

En la presente ponencia se intenta reexaminar y corregir el cálculo de 1956, para lo cual tenemos a nuestra disposición especialmente las observaciones de las precipitaciones hoy mucho más extendidas y las mediciones de las descargas en el Desagüadero y en los afluentes del lago. Estas últimas permiten también en el levantamiento del balan

ce hidrológico seguir un camino fundamentalmente diferente del seguido en 1956, ya que mientras allí se determinó el aflujo de agua al lago, entonces desconocido, como la diferencia entre precipitaciones, evaporación, descarga y variaciones en los niveles del lago, según la fórmula.

$$\text{Aflujo} = \text{evaporación} + \text{descarga} - \text{precipitaciones} + \text{variaciones en los niveles del lago.}$$

hoy se puede, por el contrario, determinar la evaporación partiendo de la diferencia entre aflujo, precipitaciones, descarga y variaciones en los niveles del lago, según la fórmula :

$$\text{Evaporación} = \text{aflujo} + \text{precipitaciones} - \text{descarga} - \text{variaciones en los niveles del lago.}$$

A continuación, expondremos en primer lugar los distintos componentes de esta ecuación.

A. La descarga a través del Desagüadero

Desde 1956 se vienen efectuando en el Desagüadero a la salida del Lago Titicaca mediciones regulares de las descargas. Los resultados de estas mediciones arrojan para los años 1957-61 una descarga media de 8 m³/seg., con un máximo en abril de 14 m. cúbicos por segundo y un mínimo en noviembre de 5 m³/seg. En la comparación de estos valores con los dados por el autor en 1956, descarga media para un período de tiempo de varios años 20 m³/seg., hay que tener en cuenta que durante los años de 1957-61 el nivel de las aguas del Lago Titicaca fue bastante bajo de modo que la descarga media para un período de varios años debe ser algo superior.

B. Las precipitaciones sobre el Lago

Hasta 1956 existían en la parte peruana de la cuenca del Titicaca solamente dos estaciones meteorológicas y en la parte boliviana cuatro estaciones. En 1957 fueron instaladas en la parte peruana otras 16 estaciones para la medición de las precipitaciones, de las cuales 4 están situadas en las proximidades del lago y dos en islas situadas en el lago mismo. Además, en territorio boliviano funcionan otras 5 estaciones en las cercanías del lago, que desgraciadamente sólo trabajan irregularmente, a las que hay que añadir 9 estaciones instaladas en las partes exteriores de la cuenca del Titicaca.

Con ayuda de las mediciones de estas estaciones ha sido posible trazar un nuevo mapa de las precipitaciones en la cuenca del Titicaca que en algunas partes se diferencia fundamentalmente del mapa que fué publicado en el libro de 1956, estando situada la diferencia más importante en la zona inmediata al lago, ya que aquí se extiende desde el

Este hasta el lago mismo una zona de precipitaciones extraordinariamente elevadas, de modo que las precipitaciones sobre el lago son mucho mayores que las que entonces se habían supuesto. El máximo de precipitaciones se registra con 1100.1150 mm. en las islas Taquili y Soto, situadas aproximadamente en el centro del lago Grande, disminuyendo desde aquí, todavía sobre el lago, hacia el norte hasta unos 850 mm. y hacia el sur y el oeste hasta unos 700 mm. El valor medio de las precipitaciones sobre el lago asciende según este mapa a unos 910 mm. mientras que en 1956 se contó solamente con un valor medio de las precipitaciones de 625 mm.

Estas precipitaciones tan elevadas tienen diferentes causas. La cuenca del Titicaca está situada en el período estival de lluvias todavía dentro de la zona de la corriente de altura nordoriental del trópico sur. Los vientos que traen la lluvia proceden aquí del N.E. Al lado este de la zona con el máximo de precipitaciones sobre el Lago Grande, hay un territorio en el que la Cordillera Oriental reduce su altura en un modo extremadamente grande. Mientras que la Cordillera Real y la Cordillera de Apolobamba sobrepasan en todas partes los 5000 metros y en vastas regiones incluso ascienden sobre los 6000, con pico de más de 6500 metros de altura, en esta amplia zona intermedia la divisoria hidrográfica está situada a unos 4500 metros de altitud e incluso en algunas partes por debajo de esta altura, por lo que los vientos húmedos procedentes de la cuenca del Amazonas pueden penetrar sin dificultad en la cuenca del Titicaca y sobre todo, no pierden humedad relativa tan fuertemente en su descenso hacia el lago.

Este efecto condicionado por la orografía se acentúa todavía más por las especiales condiciones meteorológicas que imperan sobre el Lago Titicaca. Debido a la fuerte evaporación en la inmensa superficie del lago, el aire es aquí mucho más húmedo que en los territorios vecinos por lo que se registran también aquí de un modo correspondiente más precipitaciones.

El nuevo mapa de precipitaciones está basado en las mediciones de los años 1957-61, pero este corto período de tiempo fue, según parece, mucho más húmedo que el período 1942-46 sobre el que se basó el mapa anterior. En Chuquibambilla la diferencia de los valores 1942-46 asciende a un 15% y en Puno el 20%. También frente a los valores medios para un período de 30 años, los valores de 1957-61 deben ser aproximadamente un 7% demasiado elevados, de modo que para los cálculos a largo plazo hay que contar con una precipitación de aproximadamente 850 mm. sobre el lago.

Aunque se pueden alegar razones plausibles para explicar las precipitaciones tan extremadamente elevadas, sigue existiendo tal vez ciertas dudas sobre las observaciones. Además surge aquí también la cuestión de que medida las estaciones situadas a las orillas del lago y en las islas son representativas para la superficie del lago. Afortunadamente, existe ahora una posibilidad de reexaminar también esta cuestión gracias a los cálculos del balance hidrológico. Sobre esta posibilidad volveremos al final de esta ponencia.

Para la determinación de la cantidad de precipitaciones caídas mensualmente sobre el lago se trazaron 60 mapas de precipitaciones. Partiendo de estos mapas se calculó la precipitación mensual correspondiente con ayuda de 78 puntos de red repartidos regularmente sobre el lago, de modo que hubo que determinar 4680 valores de precipitación. La apreciación de los resultados ha mostrado que sería de desear que sobre todo en la parte boliviana, en la orilla oriental del lago, se ampliara algo más todavía la red de medición de las precipitaciones.

C. Los afluentes

En los principales afluentes del Lago Titicaca vienen realizándose, regularmente mediciones de las descargas, por lo menos desde 1957. Así pudo disponerse para los cálculos del balance hidrológico, de valores mensuales para el Ramis (descarga media anual de unos $74 \text{ m}^3/\text{seg.}$); para el Coata (de unos $25 \text{ m}^3/\text{seg.}$); para el Ilave (de unos 25 metros cúbicos por segundo); para el Huancané (de unos $14 \text{ m}^3/\text{seg.}$) y para el Suchez (de unos $11 \text{ m}^3/\text{seg.}$). Para el período total de 1957-61 faltaron solamente algunos valores mensuales para el Suchez, pero estos valores pudieron reconstruirse con relativa facilidad partiendo de los demás datos.

Aquí se plantea la cuestión de hasta qué punto se recoge con la cantidad de descarga de estos afluentes principales, la descarga total que el lago recibe, o planteado de otro modo, en cuanto debemos evaluar cualquier otro posible aumento. En un viaje de investigación en 1962 los autores se ocuparon detenidamente de este problema. Se registraron todos los pequeños ríos y arroyos y se tasaron sus descargas, que en su mayor parte son muy pequeñas. Además, hay que tener en cuenta que todos los puntos de medición de las descargas de los grandes ríos están situados directamente en su desembocadura en el lago, de modo que hay que añadir a las cifras conocidas una cierta cantidad correspondiente al restante territorio. Además hay que considerar que existe una corriente de agua subterránea que llegan al lago procedente de los territorios de sus inmediaciones. Después de cuidadosas tasaciones de todos estos componentes se calculó un aumento de 5% sobre la cifra de descarga de los cinco grandes afluentes del lago.

El balance hidrológico del Lago Titicaca.

En los cálculos del balance hidrológico medio para los años 1957-61 se partió fundamentalmente de los valores parciales de los 60 meses, es decir, se calcularon en primer lugar 60 balances mensuales y solamente más tarde se formó el balance medio. Este procedimiento demostró ser especialmente adecuado, para eliminar errores en el material del que se partía y para examinar la validez de los valores totales.

Todos los valores del balance hidrológico están calculados en mm. de nivel de las aguas del Titicaca, basándose en los 8100 Km^2 . de superficie del lago.

Los resultados de los cálculos del balance están recogidos en las tablas 1 y 2 y en la figura 2.

TABLA 1

El Balance Hidrológico del Lago Titicaca 1957 - 1961 (mm)

Valores Anuales

Entradas: Precipitación (P)
Caudales de los afluentes (A)

Salidas : Evaporación (E)
Caudales que salen por el Río Desagüadero (D)

Oscilaciones de los niveles del lago (N)

	A	P	A + P	D	A + P - D	N	E
1957	323	767	1090	32	1058	- 394	1452
1958	647	827	1474	32	1442	- 64	1506
1959	665	966	1631	20	1611	+ 64	1547
1960	884	1173	2057	33	2024	+ 584	1440
Ø 1957.61	664	931	1595	31	1564	+ 84	1480

Hay que hacer hincapié especialmente en las cifras siguientes:

Con 931 mm. (= 58%) constituyen las precipitaciones sobre el lago, en contra de lo que hasta ahora se había supuesto, la parte más importante de las entradas, representando el aflujo, con solamente 664 mm. el 42%. En las salidas han podido ser confirmadas en principio las suposiciones de 1956. La relación en los años tratados incluso se desplaza algo a favor de la evaporación: descarga el 2% de las salidas (en vez del 5% en 1956), evaporación el 98% (en lugar del 95% en 1956).

Si se compara el valor de las descargas con las otras cantidades del balance se observa claramente que éstas representan un papel totalmente subordinado en el balance total.

Como el más importante de los resultados hay que considerar la determinación de la evaporación anual en 1948 mm. Como más arriba ya hemos indicado, hasta ahora la evaporación en la superficie del lago podía solamente ser estimada. La evaluación de 1956, coincide perfectamente con el cálculo actual.

Afortunadamente, existe ahora la posibilidad de reexaminar el valor por otro sistema; durante la sequía invernal en los meses de julio 1957, junio 1958, junio y julio 1961, no cayó prácticamente ninguna precipitación. Además, en estos meses, el aflujo al lago y las descargas por el Desagüadero fueron muy bajos, de modo que todas las posibilidades de error fueron ampliamente eliminadas, estando por lo tanto en este tiempo el balance hidrológico determinado casi exclusivamente por la evaporación. Bajo estas circunstancias la evaporación puede ser determinada muy exactamente por las variaciones en el fluviómetro. De estas observaciones resultó como valor medio para los cuatro meses una evaporación de 135 mm. y como valor medio para los 10 meses de junio y julio de los cinco años, desde 1957 a 1961, 137 mm.

El valor de 135 mm. puede de este modo ser considerado como un valor standard bien fundado para la evaporación en los meses de junio y julio. Este valor es algo mayor que el valor medio mensual general de $1480 : 12 = 123$ mm. lo que corresponde completamente a las expectativas teóricas, ya que la evaporación durante la sequía invernal, pese a las bajas temperaturas, debe ser mayor que durante el tiempo de lluvias a consecuencia del mayor déficit de saturación. Esta consideración muestra que el valor medio anual de 1480 mm. tampoco debe presentar ningún gran error.

La evaporación era en los cálculos del balance hidrológico que preceden, la única incógnita y su confirmación muestra que también los otros valores de la ecuación son con gran probabilidad exacto, por lo menos a "grosso modo" como lo que se confirman, también, las elevadas precipitaciones sobre el lago. Solamente, si el caudal de los afluentes fuera considerablemente mayor que el que muestran las mediciones, habría que contar con una cantidad de precipitaciones algo menores.

Hasta ahora hemos observado solamente los valores medios anuales de los diferentes componentes del balance. Como complemento se hace ahora un análisis para el transcurso de todo el año, basándose en los valores medios mensuales (compárese la fig. 2 con la tabla 2).

Los valores extremos de las precipitaciones están separados por seis meses (el máximo en enero con 181 mm. y el mínimo en julio con 2 mm.), presentando la máxima diferencia en un año de todos los miembros del balance (179 mm). A las precipitaciones les sigue el aflujo con una oscilación de 143 mm. Los valores máximos y mínimos del aflujo aparecen dos meses más tarde que el máximo y mínimo de las precipitaciones. La evaporación presenta unas diferencias todavía menores (92 mm).

TABLA 2

El Balance Hidrológico del Lago Titicaca 1957 - 1961 (mm)

Valores mensuales

	A	P	A + P	D	A + P - D	N	E
E	116	181	297	2	295	199	96
F	151	157	308	3	305	+ 251	54
M	153	116	269	4	265	+ 128	137
A	75	81	156	4	152	+ 6	146
M	36	43	79	4	75	+ 56	131
J	20	9	29	3	26	- 118	144
J	14	2	16	3	13	- 117	130
A	11	15	26	2	24	- 116	140
S	10	57	67	2	65	- 53	118
O	11	52	63	2	61	- 68	129
N	16	86	102	1	101	- 39	140
D	51	132	183	1	182	+ 67	115
Suman :	664	931	1595	31	1564	+ 84	1480
	= 171 m ³ /seg.		= 8 m ³ /seg.				

En general el proceso de evaporación es contrario al proceso de las precipitaciones, de modo que en el tiempo seco más frío aparecen los mayores valores de evaporación. La influencia del déficit de saturación sobre la evaporación se acentúa aquí claramente. Los meses de precipitaciones con una gran humedad relativa, con un alto grado de nubosidad y con una cantidad pequeña de irradiación aportan cantidades de evaporación más pequeñas. Pero también la temperatura en el tiempo caliente del año trae consigo otra modificación de la curva de evaporación. En los meses de transición marzo, abril y noviembre, en los que la temperatura todavía es relativamente alta, pero en los que las precipitaciones comienzan a disminuir o solamente ascienden lentamente, la evaporación toma valores relativamente altos, en comparación con los de la temporada principal de lluvias.

La descarga del Desagüadero oscila solamente en 3 mm. Con un valor medio mensual de $31 : 12 = 2,6$ mm. Este dato no representa en los cálculos del balance hidrológico del lago prácticamente ningún papel. Por lo demás esta cifra está todavía dentro de los límites de error con los que pueden ser determinados los otros miembros del balance.

Los datos aquí presentados pudieron solamente ser obtenidos gracias a la generosa disposición del material de observación facilitado por los servicios correspondientes peruano y boliviano. A ellos quiero expresar en este lugar de nuevo mi especial agradecimiento. Al mismo tiempo quisiera sugerir la ampliación de la red de observación meteorológica, así como la mayor extensión en el tiempo de las mediciones de las descargas. Aquí parece especialmente importante la determinación de las descargas durante las inundaciones, determinación que hasta ahora posiblemente no ha alcanzado todavía la necesaria exactitud. De este modo será posible obtener datos realmente seguros para la planeada utilización del agua de la cuenca del Titicaca tanto para el riego en la cuenca misma, como para el aprovechamiento energético y para el riego en la costa.

NOTAS

1. F. MONHEIM, "Beiträge zur Klimatologie und Hydrologie des Titicaca-beckens". Heidelberg Geographische Arbeiten, Heft 1, Heidelberg, 1956.
2. A. Forti. Un interesante caso hidrológico y un grandioso aprovechamiento sudamericano de fuerza motriz hidráulica. G. Kraft - Buenos Aires, 1953, pág. 19.

R. HARNECKER, R. SALAZAR y D. SANTA MARIA. "Los principios técnicos y económicos del aprovechamiento internacional de las aguas del Lago Titicaca". Panorama Económico - Santiago de Chile, 1954, pág. 703.
3. Véase J. Escobari Cusicanqui. El aprovechamiento de las aguas del Titicaca. La Paz. Editorial Fénix, 1962.
4. J. Sarmiento. "Anteproyecto sobre utilización de las aguas del Lago Titicaca para una mayor producción de energía y con fines de irrigación". Junta de Control de Energía Atómica, Lima, Mayo 1960, pág. 17.
5. Informe sobre el proyecto Lago Titicaca preparado por Internacional General Eléctric C°. Diciembre 1960. Traducido por la Junta de Control de Energía Atómica pág. 27.
6. A. Kessler. Über Klima und Wasserhaushalt des Altiplano (Bolivien Perú). Während des Hochstandes der letzten Vereisung. Erdkunde, Band 17 - Bonn 1963.