

# **Simulación histórica de la evolución de niveles en una laguna a través de sus registros de lluvia. Caso de la Laguna de Atotonilco, Jal.**

Oscar David Santillán Hernández  
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Mor. MÉXICO.  
[osantill@tlaloc.imta.mx](mailto:osantill@tlaloc.imta.mx)

## **Resumen**

Con el fin de tratar de “reconstruir” la evolución de los niveles históricos en la Laguna de Atotonilco, Jal., se lleva a cabo un análisis del fenómeno lluvia-escorrimento en la cuenca de esta laguna. Este análisis corresponde a definir los componentes principales de la cuenca como son sus características fisiográficas, de tipo y uso de suelo, de vegetación, a fin de que con ellas se pueda representar el fenómeno de lluvia-escorrimento lo más cercano posible a la realidad. Para ello se calibran con datos reales de precipitación, evaporación y de escurrimento. Para lograr este objetivo se seleccionaron a seis estaciones climatológicas ubicadas dentro y fuera de la cuenca. Para cada una de ellas se llevó a cabo un análisis de la información disponible en ellas, completando con diferentes técnicas para aquellos casos que estadísticamente estuviera permitido, a fin de establecer con todas ellas, el mayor de datos posible. En este sentido se logró utilizar el registro de estas estaciones del periodo 1960 al 2004. Para el cálculo de los valores medios de la precipitación ponderada por subcuenca y de la evaporación ponderada también por subcuenca, se utilizaron los valores obtenidos en los polígonos de Thiessen, es decir se consideró el área de influencia de cada estación y se ponderó con la precipitación media anual, del periodo 1960 a 2004, de cada estación

Ahora bien, para llevar a cabo la simulación de los niveles en la Laguna de Atotonilco, se utilizaron los resultados que se tienen de “Disponibilidad” oficial en la cuenca, además de sus ecuaciones principales. Se tiene que para esto el escurrimento medio anual que llega a la Laguna es de 11.7 Mm<sup>3</sup>/año; sin embargo, para fines de analizar la variación de los niveles en la Laguna de Atotonilco, se requieren valores mensuales durante todo el periodo posible. Para ello, y también tomando de los valores del estudio de disponibilidad se tienen las variaciones anuales de este parámetro, los cuales se deben desglosar en valores mensuales.

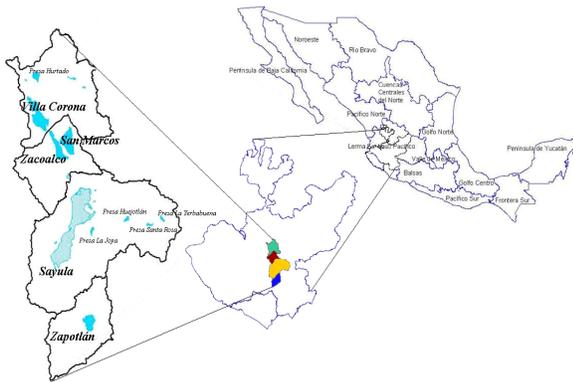
Para fines de obtener estos valores mensuales, se considera que la variabilidad mensual es directamente proporcional a la precipitación. Esta variable de precipitación se tiene registrada y evaluada de manera mensual. Por lo anterior, se considera que la variación del volumen que llega a la laguna de Atotonilco, tiene esa misma distribución. Con base en esta relación, se calculan los volúmenes de escurrimento que llegan a esta laguna. Los resultados obtenidos se presentan en este trabajo.

## **Objetivo**

Determinar el comportamiento hidrológico de los niveles de la Laguna de Atotonilco. Para ello se utiliza la técnica del “Funcionamiento de Vaso”. Esta técnica se aplica lo mismo a una estructura hidráulica como puede ser un vaso de almacenamiento de una presa, o bien de un lago o de una laguna, ya sea para diseño o revisión de este comportamiento.

Este comportamiento hidrológico se refiere a niveles de la superficie libre del agua asociados a los volúmenes de agua que en un momento determinado puedan entrar o salir del vaso o del lago o de la laguna.

Las consideraciones más importantes se refieren a las hidrológicas como son la respuesta de su propia cuenca para la generación de los escurrimientos, derivados de las precipitaciones y las evaporaciones, de acuerdo al fenómeno o proceso de “precipitación-escurrimiento” de la cuenca propia. De esta manera la evolución de los niveles en el vaso o en un lago o laguna dependerán de este proceso, el cual involucra también a las características físicas, fisiográficas de la cuenca como son la cobertura vegetal, el uso del suelo, la pendiente de la cuenca, entre otros; así como la capacidad de almacenamiento del propio cuerpo de agua ya sea vaso de almacenamiento o lago o laguna.



**Figura 1** Cuencas Cerradas de Sayula, en Jalisco, dentro de la Región Hidrológica 12 y su proyección en la República Mexicana

### Antecedentes

La Laguna Atotonilco se encuentra dentro del Municipio de Villa Corona, en el estado de Jalisco. Villa Corona se ubica en el municipio del mismo nombre en la región sur de la altiplanicie Jalisciense. Sus colindancias son las siguientes: al norte con San Martín Hidalgo y Tala; al sur con Atemajac de Brizuela y Zacoalco de Torres; al este con Acatlán de Juárez; y al oeste con Cocula.

La laguna está situada a una altitud de 1350.00 metros, y su profundidad máxima es de sólo 4 metros. El agua de la laguna tiene un alto contenido en sales y sirve de hábitat para muchas aves acuáticas, como por ejemplo el

pato Malvasía canela. Además, la vegetación acuática proporciona un lugar para el desove de numerosas especies de peces.

La laguna de Atotonilco, formó parte de un gran vaso lacustre y parte de una amplia cuenca que incluía lagunas como las de Zacoalco y San Marcos, la Laguna de Atotonilco terminó como un “humedal”, que año con año perdía volumen y calidad en sus aguas, a pesar de su enorme importancia socioeconómica para una extensa región. En la Figura 1 se muestra la ubicación de esta cuenca; mientras que en la Figura 2, se muestra su imagen satelital.

### Precipitación y evaporación promedio mensual en la laguna de Atotonilco

Para el cálculo de los valores medios de la precipitación ponderada por subcuenca y de la evaporación ponderada también por subcuenca, se utilizaron los valores obtenidos en los polígonos de Thiessen, es decir se consideró el área de influencia de cada estación y se ponderó con la precipitación media anual, del periodo 1960 a 2004, de cada estación.

De manera similar a la lluvia media mensual, se estimó la evaporación en la cuenca de la Laguna de Atotonilco. En la Figura 3 se presentan las subcuencas con las estaciones climatológicas utilizadas.

## Metodología

Básicamente, se desprende de las ideas anteriores que para llevar a cabo la simulación del funcionamiento de vaso, se requieren conocer, por un lado datos hidrometeorológicos, los escurrimientos naturales que llegan al cuerpo de agua, también se deben conocer; las precipitaciones y las evaporaciones ocurridas en la cuenca y en el mismo cuerpo de agua; éstos, para el máximo periodo posible, en función de los registros disponibles; así también se requiere conocer las características físicas del vaso, en particular la capacidad que tiene de almacenar a diferentes niveles, Estas característica normalmente se representan con las curvas características denominadas curvas elevaciones-áreas-capacidades.



**Figura 2** Imagen de satélite de la laguna de Atotonilco, Jal. Al Nordeste de la laguna, la población de Villa Corona, Jal.; y al suroeste la población de Atotonilco el Bajo, Jal.

de volumen en unidades de millones de metros cúbicos. Así se obtiene los volúmenes de diferentes parámetros, como son: el de ingreso por lluvia, el de salida por evaporación, los de salida por vertido, los de salida por obra de toma. De manera similar también se registran otros valores como son el cambio de almacenamiento y los niveles asociados a cada uno de los intervalos de tiempo que se analice.

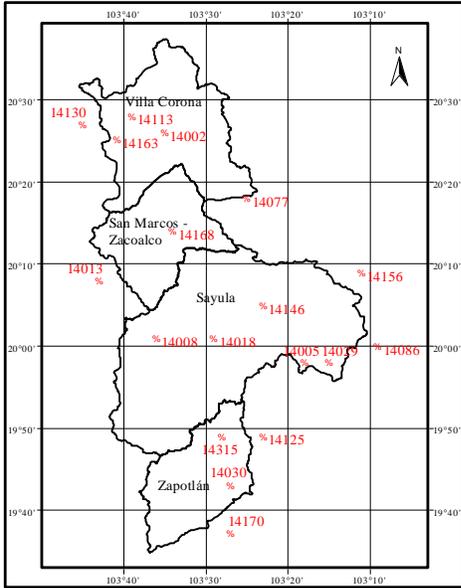
La manera de definir el proceso anterior se llama “Funcionamiento de vaso”. una vez conocidas las variables que inciden en el sistema (lluvia, evaporación, Escurrimiento en la cuenca y otras) volúmenes de extracción en la presa.

## Consideraciones

El muy particular caso del funcionamiento de vaso en la laguna de Atotonilco, consiste en definir las funciones de descarga lo más apegado a la realidad; Así también, las descargas o extracciones (o salidas en general) que se le puedan realizar; así como, determinar con la mayor precisión los ingresos por escurrimiento que inciden en el cuerpo de agua.

Luego de conocer los elementos anteriores, se trata de simular o representar el proceso del fenómeno físico en el tiempo de precipitación-escurrimiento y definir las variaciones de cada elemento para ese mismo tiempo. Esto se conoce como la convolución del cuerpo de agua. Normalmente este parámetro tiempo se considera en un análisis mensual. Esta convolución no es otra cosa que aplicar la ecuación fundamental de conservación de masa tomando primero como sistema al propio vaso; segundo, considerar como ingresos (o impulsos al sistema) a los escurrimientos y la lluvia que inciden en este vaso; también se consideran las salidas del proceso (o respuestas del sistema) a la evaporación del vaso, las descargas, extracciones o volúmenes de demanda que se esté analizando.

Como resultado de este proceso se obtiene para cada uno de los intervalos de tiempo, el reflejo de lo que ocurre en el sistema, dado en valores mensuales e integrados en una misma unidad, normalmente la



**Figura 3.-** Estaciones climatológicas

En este último caso, este proceso es el derivado de los análisis hidrológicos del fenómeno lluvia-escorrimento de la cuenca propia de los cuerpos de agua.

Al tomar en cuenta estas consideraciones, se tiene que en el caso de la Laguna de Atotonilco, Mpio. de Villa Corona, sólo se tiene la comunicación natural con la Laguna de Zacoalco y está a su vez con la laguna de San Marcos; sin existir en estos sitios, ni en los extremos de la propia laguna de Atotonilco, vertedores, ni obras de toma; ni extracciones visibles; sólo se tienen, la existencia de un terraplen en la parte sur de la laguna, que la divide sin dejar de existir la comunica en la propia laguna; situación que se logra al disponer con un vertedor con elevación de la cresta vertedora de 1350.00 msnm; por tanto, para el análisis se ha considerado que no existen descargas, o bien serían las propias del cuerpo de agua por infiltración. Esta consideración permite determinar elevaciones que puedan quedar por encima del nivel actual.

Los resultados obtenidos en el estudio de “Disponibilidad en las cuencas cerradas de Sayula, región hidrológica 12” han sido validados y se han publicado en el Diario Oficial De La Federación el día jueves 10 de enero de 2008. Del Acuerdo en el que se dan a conocer los resultados de la Disponibilidad en las Lagunas de Sayula.

En la aplicación de la expresión para determinar la disponibilidad de agua superficial, una variable fundamental es el volumen medio anual de escurrimento de la cuenca hacia aguas abajo. Esta variable se obtiene restando al volumen de la oferta media, la demanda de agua tanto para la cuenca propia como para las cuencas vecinas, si es el caso. La oferta media de agua se integra por el volumen medio anual de escurrimento natural, el volumen anual de retornos y el volumen medio anual de lluvia que cae directamente en los cuerpos de agua; la demanda de agua en la cuenca propia se integra con el volumen anual de extracción de agua superficial del REPDA, el volumen medio anual de evaporación y la variación media anual de volumen en los cuerpos de agua.

De una manera explicativa a continuación se presenta la ecuación general de disponibilidad; y la ecuación del cálculo del escurrimento además de la representación de la ecuación de volumen medio anual de escurrimento (Figuras 4 y 5).

4.1.3 Los elementos considerados en el balance se deben de ajustar a un periodo común y actual.

4.2 Disponibilidad media anual de agua superficial en una cuenca hidrológica

4.2.1 Se determina en el cauce principal en la salida de la cuenca hidrológica, mediante la siguiente expresión:

$$\begin{array}{rcc}
 \text{DISPONIBILIDAD} & & \text{VOLUMEN MEDIO} & & \text{VOLUMEN ANUAL} \\
 \text{MEDIA ANUAL DE} & & \text{ANUAL DE} & & \text{ACTUAL COMPROMETIDO} \\
 \text{AGUA SUPERFICIAL EN} & = & \text{ESCURRIMIENTO} & - & \text{AGUAS ABAJO} \\
 \text{LA CUENCA} & & \text{DE LA CUENCA HACIA} & & \\
 \text{HIDROLÓGICA} & & \text{AGUAS ABAJO} & & 
 \end{array}$$

**Figura 4** Representación de la ecuación de Disponibilidad.

De manera de ecuación estos términos se representan con la siguiente ecuación:

$$D = Ab - VR_{xy}$$

Donde la simbología es la siguiente:

- D.- Disponibilidad
- Ab.- Escurrimiento hacia aguas abajo
- VR<sub>xy</sub>.- Volumen comprometido hacia aguas abajo

También se presenta de una manera explicativa el volumen medio anual de escurrimiento:

VOLUMEN MEDIO ANUAL DE ESCURRIMIENTO DE LA CUENCA HACIA AGUAS ABAJO	=	VOLUMEN MEDIO ANUAL DE ESCURRIMIENTO DESDE LA CUENCA AGUAS ARRIBA	+	VOLUMEN MEDIO ANUAL DE ESCURRIMIENTO NATURAL	+	VOLUMEN ANUAL DE RETORNOS
		+		+		
		+		-		-
		VOLUMEN ANUAL DE IMPORTACIONES		VOLUMEN ANUAL DE EXPORTACIONES		VOLUMEN ANUAL DE EXTRACCIÓN DE AGUA SUPERFICIAL

**Figura 5.-** Representación de la ecuación de volumen medio anual de escurrimiento

De la misma manera esta ecuación se puede presentar con los siguientes términos:

$$Ab = Cp + Ar + R + Im - (Uc + Ex)$$

Donde la simbología es la siguiente:

- Cp.- Escurrimiento natural o "virgen" por cuenca propia
- Ar.- Escurrimiento aguas arriba
- R.- Retornos
- Im.- Importaciones
- Uc.- Usos consuntivos,
- Ex.- Exportaciones

En el caso de los usos consuntivos se utiliza los definidos REPDA por el 30 de abril de 2002

El método de pérdidas toma en cuenta explícitamente variables como la infiltración e intercepción. La ecuación que describe dicho método es la siguiente.

$$Cp = VII - ETR - Inter - In$$

Dónde:

- VII = Volumen de lluvia, en Mm3/año
- ETR = Evapotranspiración real en la cuenca, en Mm3/año
- Inter = Intercepción, en Mm3/año
- In = Infiltración, en Mm3/año

El volumen de lluvia anual se determina considerando el área y la precipitación media de la cuenca. La evapotranspiración real se determina con diferentes métodos, en los cuales se incluye determinar la intercepción e infiltración.

Tal como se describe en el informe de disponibilidad, en el muy particular caso de la laguna de Atotonilco, el volumen medio anual de escurrimiento natural, se obtiene sumando el volumen de cuenca propia de la Presa Hurtado (Cp1) más el volumen de cuenca propia de la Laguna Atotonilco (Cp2), ver Figura 6.

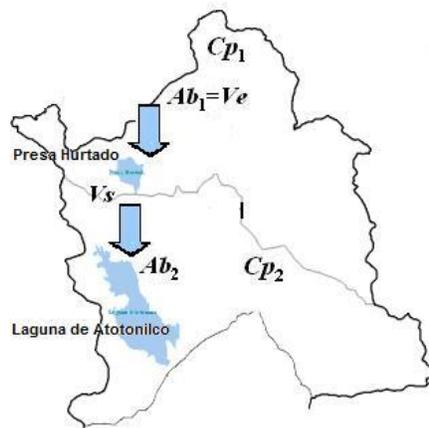


Figura 6 Esquema de la subcuenca Laguna de Atotonilco.

Los resultados obtenidos en el informe de disponibilidad son los siguientes (Tabla 1):

**Tabla 1** Resumen de resultados de la disponibilidad por subcuencas.

Cuenca	Nombre y descripción	Cp	Ar	Uc*	Uc**	R	Im	Ex	Ab	VRxy	Ab - VRxy	D	Clasificación
1a	Villa Corona: Desde el origen del río San Antonio hasta la presa Hurtado	16.92	0.00	0.67	3.59	0.10	0.00	0.00	12.76	10.99	1.77	1.77	Disponibilidad
1b	Villa Corona: Desde la presa Hurtado hasta la desembocadura en la laguna Atotonilco	45.68	12.76	21.35	28.00	2.66	0.00	0.00	11.76	61.16	-49.40	0.00	Déficit

Como una interpretación de estos resultados se entiende que el volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca hacia aguas abajo,  $\overline{Ab}$ , es precisamente el escurrimiento que llega a la laguna de Atotonilco. Este es el principal resultado

De acuerdo a estos resultados, que representan valores medios anuales, se interpretan de la siguiente manera: En la cuenca de la Laguna de Atotonilco, que incluye a la de la presa Hurtado, se obtiene un valor de Ab positivo (11.7 Mm3/año).

### Escurrecimientos mensuales en la laguna de Atotonilco

Como se ha señalado, de los resultados de Disponibilidad, el escurrimiento medio anual que llega a la Laguna es de 11.7 Mm3/año; sin embargo, para fines de analizar la variación de los niveles en la Laguna de Atotonilco, se requieren valores mensuales durante todo el periodo posible. Para ello, y también tomando de los valores del estudio de disponibilidad se tienen las variaciones anuales de este parámetro, los cuales se deben desglosar en valores mensuales.

Para fines de obtener estos valores mensuales, se considera que la variabilidad mensual es directamente proporcional a la precipitación. Esta variable de precipitación se tiene registrada y evaluada de manera mensual. Por lo anterior, se considera que la variación del volumen que llega a la laguna de Atotonilco, tiene esa misma distribución. Con base en esta relación, se calculan los volúmenes de escurrimiento que llegan a esta laguna.

### Resultados del funcionamiento de vaso

Se establecieron dos escenarios: uno con los resultados del “Ab2” y considerando extracción o infiltración en la laguna de Atotonilco. Con los valores de escurrimiento, de la lluvia y la evaporación mensual de un mismo periodo de ocurrencia, que en este caso fue desde 1960 al 2004; así como con el uso de las curvas características de Elevaciones-Áreas-Capacidades, se efectuó el funcionamiento de vaso. Los resultados se obtuvieron a través de un software dedicado a la aplicación de esta metodología. Un ejemplo de la aplicación se muestra en la Figura 7. Una característica especial de estos tránsitos es que se consideraron salidas nulas para observar hasta donde llegaría el nivel de la superficie libre del agua.



Figura 7 Pantalla del programa de funcionamiento de vasos.

Los resultados obtenidos también corresponden a valores mensuales de diferentes variables y del mismo periodo que se analiza. También se hace un resumen y se contabiliza o se totaliza los valores en todo el periodo. Para el caso del escurrimiento mensual en la cuenca, al considerar la variable de ingreso al sistema (precipitación) y salida del sistema (la evaporación) es que se estima o define el escurrimiento. En este caso el resultado final del escurrimiento que permite alimentar al funcionamiento de vaso es el mostrado en la Tabla 2. Cabe señalar que el término “Traza” se refiere al lapso de análisis considerado.

Relacionado con la superficie libre del agua, la variable más significativa es la variación del nivel. Este es un resultado que obtiene el programa. En las Gráficas 1 y 2 se muestran los resultados para definir el nivel máximo que alcanzó

De acuerdo a estos valores, el máximo alcanzado por el vaso fue de 1350.30 y 1350.14 msnm; para condiciones sin infiltración en la laguna y con un porcentaje del 10% de lo que se infiltra en la cuenca contigua de San Isidro Mazatepec, Jal.

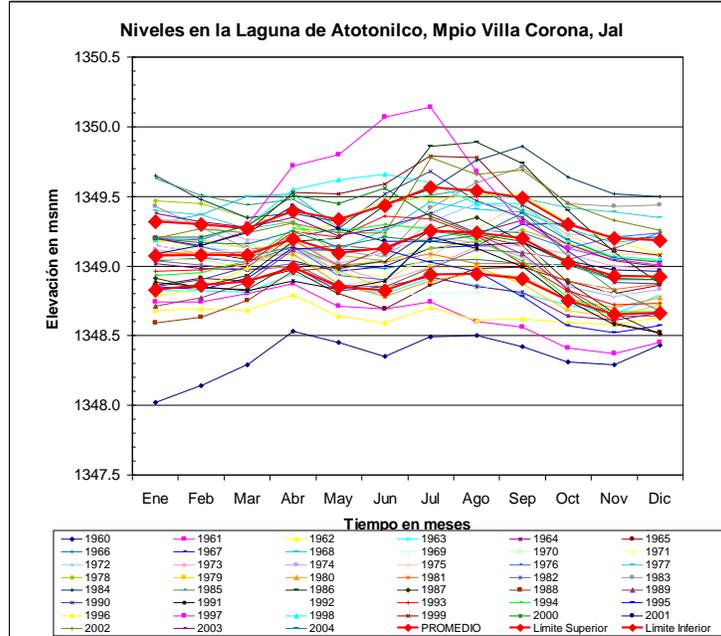
En cualquier caso, los resultados prácticamente son los mismos, como se puede apreciar en las gráficas mencionadas.

### **Conclusiones**

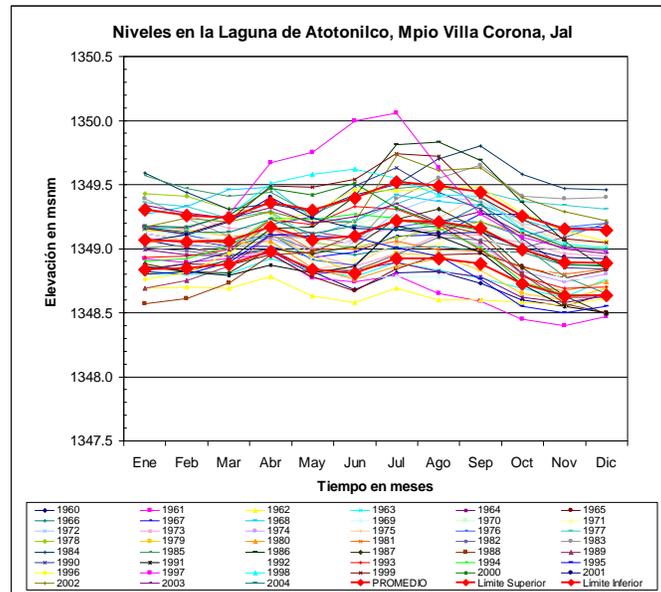
De los resultados obtenidos conjuntamente de los análisis de disponibilidad y balance aplicado a esta cuenca, así como al funcionamiento de vaso aplicado a la laguna, que se muestran también en las gráficas de variación de nivel, se puede afirmar que el nivel que prevalece en la Laguna de Atotonilco, es decir su variación histórica del nivel de la superficie del agua de la laguna, se encuentra que el nivel de 1350.00 msnm. Este valor obtenido correspondería a la definición de “Nivel de Aguas Máximas Ordinarias” para esta Laguna y que correspondería al nivel que se ha presentado de manera natural en la Laguna.

### **Bibliografía**

Aparicio, M. J. 1992. “Fundamentos de Hidrología de Superficie”. México. Limusa, México  
Sotelo, A. G. 1982. “Hidráulica General. Volumen 1. Fundamentos”. Limusa, México.



**Gráfica 1 Variación del nivel de la superficie libre del agua de la laguna de Atotonilco, según resultados del funcionamiento de vasos para esa laguna.**



**Gráfica 2 Variación del nivel de la superficie libre del agua de la laguna de Atotonilco, según resultados del funcionamiento de vasos para esa laguna. Condiciones iniciales en la media de los niveles**

