

DETERMINACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA TOTAL CON INFORMACIÓN SUFICIENTE

La situación de definición de la oferta hídrica superficial con información suficiente se exhibe cuando existe una estación hidrológica que mide los caudales en la entrada, aguas arriba, del dominio territorial donde se presentan las demandas y además esta estación tiene una longitud de registro lo suficientemente representativa para caracterizar probabilísticamente la oferta superficial de agua. Con relación al requerimiento de localización de la estación hidrológica se pueden tolerar pequeñas diferencias de ubicación de la estación siempre que se garantice que la estación utilizada afora al menos el 90% de la afluencia que irriga la zona donde se presentan las demandas de agua. La serie registrada en la estación hidrológica no debe presentar más de un 30% de información faltante y en su registro debe contener, al menos una fase de alta y una de baja humedad durante todo el periodo observado. El valor esperado de la oferta hídrica debe definirse con un error estadístico no mayor al 10%. Este último requerimiento, en conjunto con la presencia de ciclos de alta y baja humedad, determinan la longitud mínima de la serie de caudales anuales necesaria para la determinación de la oferta hídrica en condiciones de información hidrológica suficiente. Los requerimientos anunciados permiten establecer el flujograma de la Figura 2.

La determinación del número de datos faltantes consiste en contar el número de años para los que no se tiene definido el caudal promedio anual. En caso de que el número de datos faltantes supere el 30% de la longitud de la serie hidrológica seleccionada la oferta hídrica evaluada se considera determinada bajo condiciones de información hidrológica escasa. El análisis de representatividad de la serie a ser utilizada no se detiene en la evaluación de los criterios representados en la figura 10, sin falta se debe revisar la aleatoriedad de la serie hidrológica, su homogeneidad y consistencia. La experiencia muestra que, para los datos caudal promedio anual todos estos requerimientos se cumplen con bastante regularidad, sin embargo bajo condiciones de clima cambiante es probable

EVALUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN UN MUNDO COMPLEJO Y CAMBIANTE
PROFESOR EFRAÍN DOMÍNGUEZ
GUÍA No 2 – DETERMINACIÓN DE LA OFERTA CON DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN

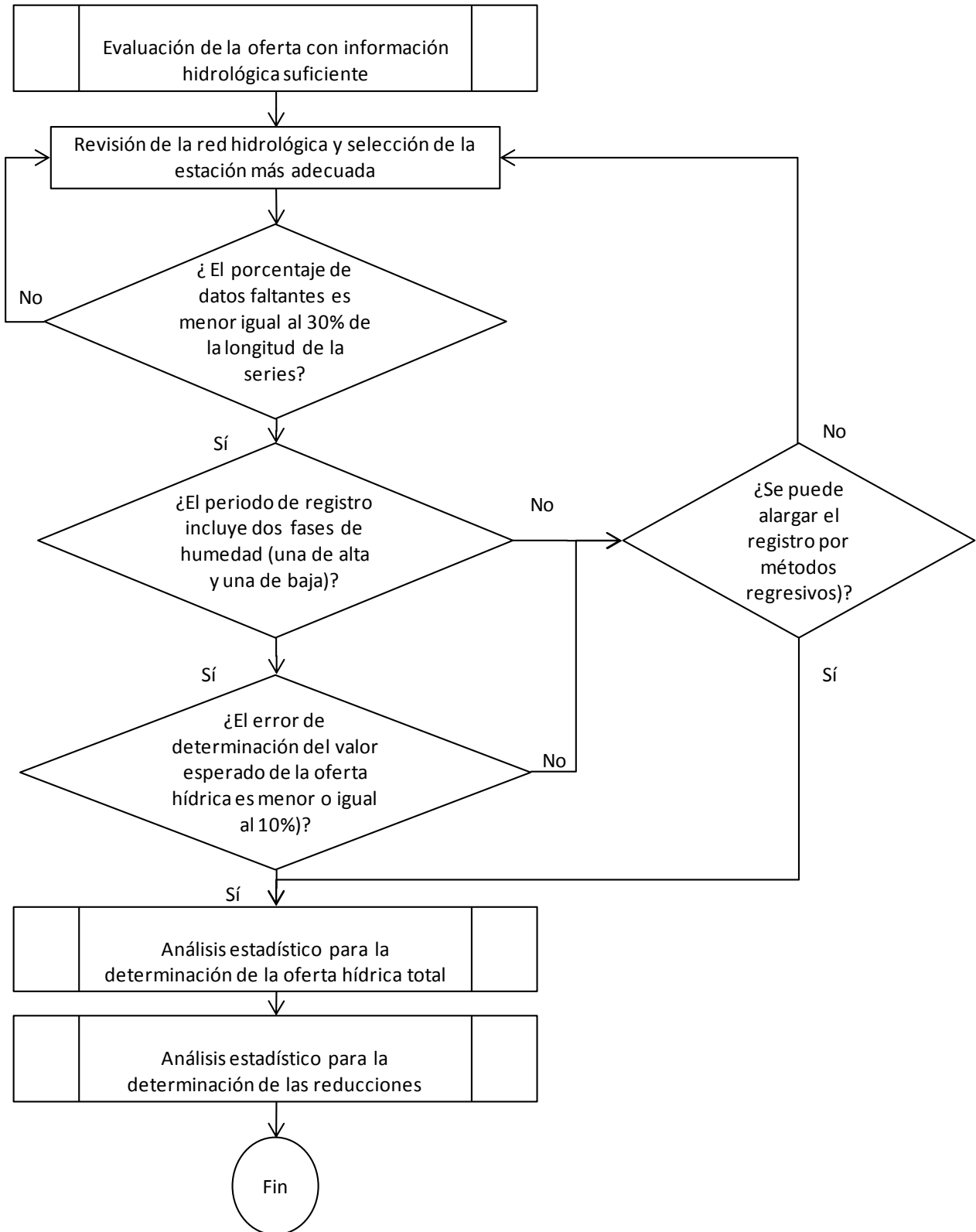
que la aleatoriedad y homogeneidad de las series de caudales anuales se corrompan planteando nuevos retos para la evaluación de la oferta hídrica superficial.

Figura 1. Situación con información hidrológica suficiente



EVALUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN UN MUNDO COMPLEJO Y CAMBIANTE
PROFESOR EFRAÍN DOMÍNGUEZ
GUÍA No 2 – DETERMINACIÓN DE LA OFERTA CON DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN

Figura 2. Diagrama de flujo para la determinación de la oferta hídrica con información suficiente



EVALUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN UN MUNDO COMPLEJO Y CAMBIANTE
PROFESOR EFRAÍN DOMÍNGUEZ
GUÍA No 2 – DETERMINACIÓN DE LA OFERTA CON DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA TOTAL EN CONDICIONES DE INFORMACIÓN SUFICIENTE

VARIABLES HIDROLÓGICAS QUE CARACTERIZAN LA OFERTA HÍDRICA

La variable principal que caracteriza la oferta hídrica superficial es el caudal de agua que se registra en las corrientes que surcan determinado territorio. Estos caudales varían segundo a segundo y por ello para entender la oferta hídrica estos deben ser sometidos a un tratamiento estadístico. En primera instancia los registros de información diaria son ponderados anualmente de modo que en cada estación hidrológica se registra el caudal promedio para cada año transcurrido. Este volumen de agua anual es el que es considerado como la oferta anual total de agua del territorio en estudio. En especial son consideradas sus características estadísticas (valor modal, valor esperado, desviación estándar, asimetría). Por comodidad de cálculo, la oferta hídrica puede ser tratada en términos de caudales, volúmenes, rendimiento ó lámina de agua. El análisis estadístico no depende de la forma en que se represente la oferta, en todos los casos los resultados serán equivalentes. A continuación se presentan las diferentes formas de expresión de la oferta hídrica y sus equivalencias entre sí.

- Caudal de agua – $Q [m^3/s]$

Representa el volumen de agua que escurre en una unidad de tiempo por la sección hidráulica de la estación hidrométrica en la que se miden niveles y caudales. Es la forma principal de representación de la oferta hídrica, se expresan en unidades de volumen sobre unidades de tiempo, el estándar internacional es representar los caudales de agua Q en metros cúbicos por segundo $[m^3/s]$ pero se permite que los caudales muy pequeños sean representados en litros por segundo $[l/s]$. Los caudales diarios de las estaciones hidrológicas son ponderados para producir el caudal promedio mensual de cada mes y el caudal promedio anual de cada año.

EVALUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN UN MUNDO COMPLEJO Y CAMBIANTE
PROFESOR EFRAÍN DOMÍNGUEZ
GUÍA No 2 – DETERMINACIÓN DE LA OFERTA CON DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN

- Rendimiento Hídrico – q [$m^3/(s.km^2)$]

Es la cantidad de agua que escurre en la unidad de tiempo por una unidad de área del territorio estudiado. Para magnitudes altas el rendimiento hídrico se expresa en metros cúbicos por segundo por kilómetro cuadrado [$m^3/s.km^2$]. El rendimiento hídrico se utiliza para el análisis de cambios de la oferta hídrica en el espacio al igual que para comparar la oferta hídrica de ríos de distinto tipo y tamaño y para la construcción de mapas en isolíneas de rendimiento que caracterizan en forma espacialmente explícita la oferta de agua de un territorio.

- Lámina de agua – Y [mm]

Representa la cantidad de agua escurrida por la superficie de una cuenca durante un determinado periodo de tiempo, considerando su distribución uniforme sobre toda la superficie de la cuenca. Por estándar internacional la lámina de agua se suele representar en milímetros [mm], las mismas unidades en que se representan la precipitación y la evaporación, resultando conveniente para la construcción de balances hídricos.

- Volumen de agua V – [m^3]

Es la cantidad de agua escurrida durante un periodo de tiempo t por la sección hidráulica de la estación hidrométrica. Esta expresión de la oferta hídrica es utilizada frecuentemente en la evaluación de recursos hídricos e hidroenergéticos. Se expresa en [km^3] para ríos grandes y como [m^3] para ríos pequeños. Todas estas expresiones de la oferta hídrica están relacionadas entre sí. Para transformar una variable en otra consulte las ecuaciones de la Tabla 1.

EVALUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN UN MUNDO COMPLEJO Y CAMBIANTE
 PROFESOR EFRAÍN DOMÍNGUEZ
 GUÍA No 2 – DETERMINACIÓN DE LA OFERTA CON DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN

Tabla 1. Relación entre variables que expresan la oferta hídrica

Variable	$Q_i \left[\frac{m^3}{s} \right]$	$q_i \left[\frac{l}{s \cdot km^2} \right]$	$Y_i [mm]$	$V_i [m^3]$
\bar{Q}	$\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{n}$	$\frac{\bar{q}A}{10^3}$	$\frac{10^3YA}{t}$	$\frac{\bar{V}}{t}$
\bar{q}	$10^3\bar{Q}/A$	$\sum_{i=1}^n q_i/n$	$\frac{10^6Y}{t}$	$\frac{10^3\bar{V}}{At}$
\bar{Y}	$\bar{Q}t/(10^3A)$	$\frac{\bar{q}t}{10^6}$	$\sum_{i=1}^n Y_i/n$	$\frac{\bar{V}}{10^3A}$
V	$\bar{Q}t$	$\frac{\bar{q}At}{10^3}$	10^3YA	$\sum_{i=1}^n V_i/n$

En la tabla anterior "A" es el área de la cuenca y debe ir expresada en kilómetros cuadrados, t es el intervalo de análisis y debe ir en segundos. Finalmente, n es el número de registros de la variable promediada durante el intervalo de años escogido. Los valores de las series de caudales (Q) se redondean con una precisión de tres cifras significativas. Para caudales mayores a $100 m^3/s$ se utilizan sólo números enteros (235, 1250, 13400 m^3/s). En el intervalo de 10 a 99.9 m^3/s la precisión de los caudales es de tres cifras significativas incluyendo máximo un decimal (10.5, 95.1, m^3/s). Para el intervalo de 0.01 hasta 9.99 m^3/s se redondea hasta las centésimas (9.81, 1.05, 0.15 m^3/s). Para caudales muy pequeños se redondea hasta las milésimas tomando en cuenta solo una o dos cifras significativa (0.025, 0.002 m^3/s). Si la oferta está representada en términos de rendimiento hídrico (q) sus valores se deben redondear, para valores hasta de 10 $l/s \cdot km^2$, con precisión de centésimas (0.05, 0.25, 1.25). Para valores mayores a 10 $l/s \cdot km^2$ el rendimiento hídrico se redondea hasta una decima (10.5, 22.5 $l/s \cdot km^2$). La lámina de agua Y se presenta con

EVALUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN UN MUNDO COMPLEJO Y CAMBIANTE
PROFESOR EFRAÍN DOMÍNGUEZ
GUÍA No 2 – DETERMINACIÓN DE LA OFERTA CON DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN

precisión de tres cifras significativas (85, 255, 1100 *mm*). El volumen de agua V se redondea hasta tres cifras significativas (45.6x106, 256x106, 1120 x106 m^3).

De la Tabla 1 se desprende que para determinar la oferta hídrica total O_T se aplica la fórmula:

$$O_T = V = \bar{Q}t$$

Ecuación 1

De la Ecuación 1 se nota que la oferta hídrica total se representa principalmente como volumen de agua y que para obtener este volumen de agua utilizando otras variables como lámina de agua, ó rendimiento hídrico se pueden aplicar las expresiones de la última línea de la Tabla 1. Sobre esta Oferta Total se realizan las reducciones que estipula el modelo conceptual del índice de escasez.

REPRESENTATIVIDAD DE LAS SERIES DE DATOS HIDROLÓGICAS

Las series hidrológicas registradas en las estaciones hidrométricas representan una realización del conjunto universal de datos que podrían ser registrados en los puntos del sistema de monitoreo hidrológico. Por esto es necesario evaluar hasta qué punto la serie de datos disponible refleja las regularidades de la oferta hídrica en el territorio estudiado. Para evaluar la representatividad de la serie hidrológica es necesario verificar la aleatoriedad de la misma, su homogeneidad, la alternancia de ciclos de alta y baja humedad en los incrementos de la serie, el nivel de error con que la serie permite definir su valor esperado y el coeficiente de variación. Finalmente se revisa que la serie no tenga cambios importantes en su patrón de comportamiento. Los últimos tres tópicos, alternancia de ciclos, error de estadísticos y ausencia de cambios en el régimen de la serie, conforman el llamado análisis de consistencia.

A continuación se presentan las pruebas y análisis necesarios para constatar la representatividad de la serie hidrológica.

EVALUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN UN MUNDO COMPLEJO Y CAMBIANTE
PROFESOR EFRAÍN DOMÍNGUEZ
GUÍA No 2 – DETERMINACIÓN DE LA OFERTA CON DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN

Prueba de aleatoriedad;

En el marco de los programas de la Organización Meteorológica Mundial, cómo el Programa Hidrológico Internacional, la oferta hídrica de las naciones y sus distintas subregiones se realiza bajo el supuesto que la oferta hídrica promedio anual es una variable aleatoria. Existen varias pruebas de aleatoriedad para demostrar que una serie de caudales promedio anual constituye un conjunto estadístico válido. Estas pruebas se diferencian por su nivel de complejidad. En hidrología han encontrado amplia aplicación la prueba de las rachas y la prueba del número de inversiones (Bendat & Piersol, 1986).

La prueba de las rachas (o las series) se basa en el conteo de rachas en alguna característica de la serie de caudales anuales. En calidad de hipótesis nula se plantea que H_0 : La muestra es aleatoria y como hipótesis alternativa que H' : La muestra no es aleatoria. Para aplicar esta prueba es necesario clasificar cada dato de la serie de caudales anuales en una de dos clases. Cada clase puede ser representada con un símbolo (+ y – por ejemplo) de esta forma cada valor de la serie de caudales anuales que cumpla $Q_i \geq \bar{Q}$ se reemplaza por un signo “+” y de lo contrario (si $Q_i < \bar{Q}$) el valor se reemplaza por un signo “-“. La cantidad total de rachas “R” en la secuencias de “+” alternados con “-“ es igual a al número de rachas de signos “+” más el número de rachas de signos “-“ $R = (r_a + r_b)$. Para las secuencias aleatorias R tiene una distribución normal con media:

$$\bar{R} = \frac{n + 1}{2}$$

Ecuación 2

y desviación:

EVALUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN UN MUNDO COMPLEJO Y CAMBIANTE
PROFESOR EFRAÍN DOMÍNGUEZ
GUÍA No 2 – DETERMINACIÓN DE LA OFERTA CON DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN

$$\sigma_R = \frac{\sqrt{n-1}}{2}$$

Ecuación 3

Al definir un nivel de significación α el intervalo de confianza para R es:

$$\bar{R} - t_{1-\alpha}\sigma_R < R \leq \bar{R} + t_{1-\alpha}\sigma_R$$

Ecuación 4

Donde $t_{1-\alpha}$ es un percentil de la distribución estándar normal. Si el valor empírico de R cae dentro de este intervalo, la hipótesis nula, que asevera la aleatoriedad de la serie de caudales, no se rechaza, de lo contrario se acepta la hipótesis alternativa sobre la no aleatoriedad de la serie.

Prueba de homogeneidad;

Las series hidrológicas constituyen muestras del conjunto universal de datos que hipotéticamente podrían ser registrados en una cuenca. Se da por supuesto que los datos de caudal registrados en una estación hidrológica fueron generados mediante metodologías de muestreo estándar y que el régimen de caudales anuales registrados en la estación es homogéneo durante todos los años en los que esta variable ha sido observada. Estas condiciones pueden no cumplirse y por ello antes de realizar el análisis estadístico de la oferta hídrica superficial es necesario demostrar que los datos reportados por las estaciones hidrológicas pertenecen a un mismo conjunto estadístico. Los factores que pueden perturbar las condiciones de homogeneidad de una serie hidrológica pueden estar relacionados con cambios en las tecnologías de medición, del método de construcción de la curva de gastos y/o por cambios en los procesos naturales que gobiernan la escorrentía superficial. Sí la prueba de aleatoriedad de una serie de caudales anuales falla será necesario analizar y entender

EVALUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN UN MUNDO COMPLEJO Y CAMBIANTE
PROFESOR EFRAÍN DOMÍNGUEZ
GUÍA No 2 – DETERMINACIÓN DE LA OFERTA CON DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN

cuáles son las causas de esta falla para removerlas o determinar sub-periodos de la serie que sean homogéneos.

El análisis de homogeneidad estadística tiene las siguientes etapas: 1) Formulación de la hipótesis nula, 2) Formulación de la hipótesis alternativa, 3) Definición del nivel de significación de la prueba y del dominio de rechazo de la hipótesis nula y 4) Validación o rechazo de la hipótesis nula. Existen varias pruebas para establecer la homogeneidad de la serie. Para los efectos de esta Guía Hidrológica se recomiendan las pruebas de Student y de Fisher (también conocidas como prueba t y prueba F). Estas pruebas revisan la hipótesis nula sobre la igualdad de las medias ($\bar{Q}_1 = \bar{Q}_2$) y las varianzas ($\sigma_{Q_1} = \sigma_{Q_2}$). Como hipótesis alternativa se puede proponer la diferencia de las medias ($\bar{Q}_1 \neq \bar{Q}_2$) y las varianzas ($\sigma_{Q_1} \neq \sigma_{Q_2}$). Dado que estas pruebas exigen que la serie de caudales tenga distribución normal y conociendo que en las series de caudales anuales existe asimetría es recomendable también aplicar pruebas de homogeneidad no paramétricas como las de Mann-Whitney o la de Kruskal-Wallis. A este respecto Sheskin (2003) asevera que aunque las pruebas paramétricas tienen restricciones con respecto a la distribución de los datos en las muestras analizadas estas siempre deben utilizarse dado que, las pruebas no paramétricas son menos robustas por la pérdida de información debido a la conversión de variables de intervalo a variables ordinales. Sheskin recomienda la aplicación conjunta de las pruebas paramétricas y no paramétricas, con notable frecuencia se demuestra que los resultados de ambas pruebas son coincidentes (Sheskin, 2003).

Cómo nivel de significación se entiende la mínima magnitud de probabilidades que caracteriza el evento imposible. La realización de este evento imposible implica la invalidez de la hipótesis nula y valida la hipótesis alternativa. En un caso así se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa con el nivel de significación elegido. Sin embargo, por el carácter probabilístico de las pruebas de hipótesis, siempre existe la posibilidad de rechazar una hipótesis nula que en realidad es verdadera, cometiendo así un error de primer tipo. Por otro lado también puede suceder que se acepte una hipótesis falsa cometiendo así un error de segundo tipo. Es imposible evitar los errores de primer y segundo tipos, lo único que se puede hacer es disminuir el riesgo de que suceda un error de primer

EVALUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN UN MUNDO COMPLEJO Y CAMBIANTE
PROFESOR EFRAÍN DOMÍNGUEZ
GUÍA No 2 – DETERMINACIÓN DE LA OFERTA CON DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN

tipo aumentando la posibilidad de que suceda un error de segundo tipo o viceversa. Por lo anterior en hidrología es convencional seleccionar niveles de significación del 10, 5, 2, 1 o 0.1%. Con la disminución del nivel de significación se disminuye la posibilidad de rechazar una hipótesis nula que es verdadera pero aumenta la posibilidad de aceptar hipótesis nulas que son falsas (Haan, 2002). Se recomienda escoger el nivel de significación de las pruebas de homogeneidad de acuerdo con las consecuencias que la eventual validación de una hipótesis falsa puede traer para la definición de la oferta hídrica.

Para verificar la homogeneidad de la serie de caudales anuales se siguen los siguientes pasos:

- i. La serie de caudales anuales, con n observaciones, se divide en dos series de igual longitud ($n_1 = n_2$);
- ii. Se calculan los promedios y la desviación estándar para cada una de las mitades obtenidas en el paso anterior; Sean \bar{Q}_1 y \bar{Q}_2 las medias de la primera y segunda sub-series y σ_{Q_1} y σ_{Q_2} sus respectivas desviaciones estándar;
- iii. Se revisa la homogeneidad en la media proponiendo como hipótesis nula $H_0: \bar{Q}_1 = \bar{Q}_2$ y como hipótesis alternativa $H': \bar{Q}_1 \neq \bar{Q}_2$. Para revisar la validez de la hipótesis nula se aplica el criterio de Student (Prueba T)¹ cuya expresión es:

$$t = \frac{\bar{Q}_1 - \bar{Q}_2}{\sqrt{\frac{n_1\sigma_{Q_1}^2 + n_2\sigma_{Q_2}^2}{n_1 + n_2}}} \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}$$

Ecuación 5

Este criterio sigue la distribución de Student² con grados de libertad $k = n_1 + n_2 - 2$. La hipótesis nula ($H_0: \bar{Q}_1 = \bar{Q}_2$) se rechaza si su valor empírico $t > T\left(\frac{\alpha}{2}, n_1 + n_2 - 2\right)$ ó $T_0 < -T\left(\frac{\alpha}{2}, n_1 + n_2 - 2\right)$, donde $T(\alpha, k)$ es la distribución de Student.

¹ Las pruebas de Student y Fisher están implementadas en Microsoft Excel como las funciones PRUEBA.T y PRUEBA.F

EVALUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN UN MUNDO COMPLEJO Y CAMBIANTE
PROFESOR EFRAÍN DOMÍNGUEZ
GUÍA No 2 – DETERMINACIÓN DE LA OFERTA CON DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN

- iv. Se revisa la homogeneidad en la varianza proponiendo cómo hipótesis nula $H_0: \sigma_{Q_1} = \sigma_{Q_2}$ y cómo hipótesis alternativa $H': \sigma_{Q_1} \neq \sigma_{Q_2}$. Para revisar la validez de la hipótesis nula se aplica el criterio de Fisher (Prueba F)¹ cuya expresión es:

$$F = \frac{\sigma_{Q_1}^2}{\sigma_{Q_2}^2}$$

Ecuación 6

En el numerador se debe utilizar la desviación estándar de mayor magnitud ($\sigma_{Q_1} \geq \sigma_{Q_2}$). Este criterio sigue la distribución de Fisher³ con $k_1 = n_1 - 1$ grados de libertad en el numerador y $k_2 = n_2 - 1$ en el denominador. La hipótesis nula se rechaza si $F > F\left(\frac{\alpha}{2}, n_1 - 1, n_2 - 1\right)$ ó $F < F\left(1 - \frac{\alpha}{2}, n_1 - 1, n_2 - 1\right)$, donde $F(\alpha, k_1, k_2)$ es la distribución de Fisher.

Si las hipótesis de homogeneidad (en media y en varianza) son rechazadas es necesario caracterizar la oferta hídrica por separado para los dos periodos en los que se subdividió la serie original de caudales promedios anuales.

Análisis de consistencia.

Durante este análisis se verifica: a) si la longitud de la serie de caudales anuales es suficiente para considerar que la oferta hídrica se define en condiciones de información hidrológica suficiente; b) si la serie que se utiliza contiene las fases de alta y baja humedad necesarias para que considerar que el termino de almacenamientos tiende a cero y c) si a lo largo del registro no existen cambios significativos en el régimen de los registros.

² También conocida como distribución T

³ También conocida como distribución F.

EVALUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN UN MUNDO COMPLEJO Y CAMBIANTE
PROFESOR EFRAÍN DOMÍNGUEZ
GUÍA No 2 – DETERMINACIÓN DE LA OFERTA CON DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN

Longitud de la serie de caudales:

Para determinar si la longitud de la serie de caudales tiene la longitud de registros suficientes es necesario estimar el error de definición del valor esperado y del Coeficiente de Variación (C_v) de la serie de caudales. Estos errores se calculan cómo (Vladimirov, 1990, págs. 113-116; Sokolovskiy, 1959, págs. 162-166; Druzhinin & Sikan, 2001, págs. 81-83):

- Error del valor esperado $\varepsilon_{\bar{Q}}$

$$\varepsilon_{\bar{Q}}[\%] = 100C_v/\sqrt{n}$$

Ecuación 7

- Error del coeficiente de variación ε_{Cv}

$$\varepsilon_{Cv}[\%] = 100 \sqrt{\frac{(1 + C_v^2)}{2n}}$$

Ecuación 8

Aquí, n es el número de datos de la serie de caudales analizada. Estos errores representan el nivel de discrepancia entre los momentos estadísticos de la serie hidrológica y los del conjunto universal. Los errores máximos permitidos en definición del valor esperado y del coeficiente de variación de los caudales se determinan de acuerdo con la siguiente tabla (Vladimirov & Druzhinin, Selección de problemas y ejercicios de cálculos hidrológicos, 1992):

EVALUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN UN MUNDO COMPLEJO Y CAMBIANTE
 PROFESOR EFRAÍN DOMÍNGUEZ
 GUÍA No 2 – DETERMINACIÓN DE LA OFERTA CON DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN

Tabla 2. Errores máximos permitidos para la definición del valor esperado y el coeficiente de variación

Tipo de oferta hídrica	Media multianual	Mínima multianual	Máxima Multianual
$\varepsilon_{\bar{Q}}$ – máximo permitido	≤ 5: 10%	≤ 10%	≤ 10%
ε_{Cv} – máximo permitido	≤ 15%	≤ 20%	≤ 25%

Es necesario contar con una serie de tamaño n que permita calcular el valor esperado y el coeficiente de variación con un error menor al presentado en la

Tabla 2. Por medio de las siguientes tablas se puede definir esta longitud.

Tabla 3. Error de definición del caudal promedio anual multianual, [%]

n	Coeficiente de Variación Cv									
	0.1	0.15	0.20	0.25	0.3	0.35	0.4	0.5	0.6	
5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0	25.0	30.0	
10	3.3	5.0	6.7	8.3	10.0	11.7	13.3	16.7	20.0	
15	2.7	4.0	5.3	6.7	8.0	9.4	10.7	13.4	16.0	
20	2.3	3.4	4.6	5.7	6.9	8.0	9.2	11.5	13.8	
25	2.0	3.1	4.1	5.1	6.1	7.1	8.2	10.2	12.2	
30	1.9	2.8	3.7	4.6	5.6	6.5	7.4	9.3	11.1	
35	1.7	2.6	3.4	4.3	5.1	6.0	6.9	8.6	10.3	
40	1.6	2.4	3.2	4.0	4.8	5.6	6.4	8.0	9.6	

Tabla 4. Error de definición del coeficiente de variación de los caudales anuales

n	Coeficiente de Variación Cv									
	0.1	0.15	0.20	0.25	0.3	0.35	0.4	0.5	0.6	
5	32	32	33	34	34	35	36	39	41	
10	23	23	23	24	24	25	26	27	29	
15	18	19	19	19	20	20	21	22	24	
20	16	16	16	17	17	18	18	19	21	
25	14	14	15	15	15	16	16	17	19	
30	13	13	13	14	14	14	15	16	17	
35	12	12	12	13	13	13	14	15	16	
40	11	11	12	12	12	12	13	14	15	

EVALUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN UN MUNDO COMPLEJO Y CAMBIANTE
PROFESOR EFRAÍN DOMÍNGUEZ
GUÍA No 2 – DETERMINACIÓN DE LA OFERTA CON DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN

La longitud adecuada de la serie no sólo se define a través de los mencionados errores, también es necesario definir como se da la alternancia de fases de alta y baja humedad.

Alternancia de fases de alta y baja humedad:

Aunque la oferta hídrica anual (representada en volúmenes de agua, caudales, lámina o rendimiento hídrico) representa una muestra aleatoria, las variaciones de la oferta de un año a otro conforman rachas con dominancia de incrementos positivos o negativos. Estas rachas conforman fases de alta y baja humedad, que alternadas forman ciclos en la evolución temporal de los incrementos anuales de la oferta hídrica. Estos ciclos de humedad se explican principalmente por factores climáticos, los cuales a su vez están condicionados por la influencia sobre el planeta de factores astrofísicos. En forma esquematizada estos mecanismos funcionan de la siguiente forma: Las oscilaciones de la actividad solar, los cambios en la órbita terrestre y del eje de rotación de la tierra forman ciclos interanuales de humedad en la oferta hídrica. Sobre estos ciclos se superponen oscilaciones de la escorrentía que están condicionadas por factores regionales y locales, esta yuxtaposición de ciclos de alta y baja frecuencia refleja toda la complejidad de cada cuenca. La secuencia de ciclos seculares, de media y alta frecuencia ayuda a determinar estaciones análogas para análisis hidrológico y permite determinar en qué fase de humedad se encuentran los registros capturados por el sistema de monitoreo hidrológico.

Con el fin de establecer los ciclos de humedad de las estaciones hidrológicas es necesario construir las curvas de diferencias integrales (ξ_i), las cuales representan un balance de masa en el tiempo. Este balance muestra la dinámica de rachas de incrementos positivos o negativos cuya secuencialidad conforma los ciclos de humedad que caracterizan el régimen hidrológico de cada cuenca. Estas curvas muestran la persistencia de los incrementos de caudales en las series registradas en las estaciones hidrométricas, fenómeno que de otro modo también se puede estudiar mediante el exponente de Hurst (Koutsoyiannis, 2003; Hurst, 1950). La curva de diferencias

EVALUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN UN MUNDO COMPLEJO Y CAMBIANTE
PROFESOR EFRAÍN DOMÍNGUEZ
GUÍA No 2 – DETERMINACIÓN DE LA OFERTA CON DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN

integrales de una se puede construir con diferente resolución (diaria, decadal, mensual, anual), sin embargo el análisis de ciclos y fases no depende de la resolución temporal escogida. Para construir la curva de diferencias integrales se siguen los siguientes pasos:

- Se estiman el promedio y el coeficiente de variación C_v de la serie de caudales;

$$\bar{Q} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{n}$$

Ecuación 9

$$C_v = \frac{\sigma_Q}{\bar{Q}}$$

Ecuación 10

- Se calcula el coeficiente modular

$$k_i = \frac{Q_i}{\bar{Q}}$$

Ecuación 11

- Se evalúan las ordenadas de la curva de diferencia integral ξ_i como

$$\xi_i = \sum_{i=1}^n \frac{(k_i - 1)}{C_v}$$

Ecuación 12

EVALUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN UN MUNDO COMPLEJO Y CAMBIANTE
PROFESOR EFRAÍN DOMÍNGUEZ
GUÍA No 2 – DETERMINACIÓN DE LA OFERTA CON DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN

Sí la diferencia $\sum_{i=1}^{n_1}(k_i - 1) - \sum_{i=1}^{n_2}(k_i - 1)$ es menor que cero el periodo de tiempo $T_2 - T_1$ comprende una fase de baja humedad, si por el contrario es mayor que cero será una fase de alta humedad. Para que la serie hidrológica sea representativa se requiere que la curva de diferencias integrales contenga igual número de fases de alta y baja humedad. Numéricamente, la representatividad en este sentido se puede establecer calculando el coeficiente modular promedio de n registros:

$$\bar{k} = 1 + \frac{[\sum_{i=1}^{t_2}(k_i - 1)_f - \sum_{i=1}^{t_1}(k_i - 1)_c]}{n}$$

Ecuación 13

Cuán más cerca esté \bar{k} de 1 cuanto más representativa será la longitud n de la serie de caudales anuales, dado que el promedio de la muestra estará muy cercano al promedio del proceso general.

Análisis de la curva de masas

Otra forma de analizar la presencia de cambios en el régimen hidrológico de la serie de caudales anuales se basa en la construcción de curvas de masa simple y de dobles masas. En el caso de la curva de masa simple esta se construye graficando la suma acumulativa de los caudales registrados en función del tiempo. Para el caso de la curva de dobles masas la suma acumulativa de caudales se grafica en función de la suma acumulativa de otra magnitud que sirva como patrón de consistencia del régimen analizado. Cómo esta magnitud se puede utilizar las sumas acumuladas de los caudales registrados en afluentes o ríos vecinos ó las sumas acumuladas de las precipitaciones anuales registradas en las estaciones meteorológicas de la cuenca analizada. También es posible utilizar precipitaciones y caudales registrados en cuencas vecinas si existen indicios de que su régimen sea parecido al régimen de la cuenca bajo estudio. En esencia, una vez construidas las mencionadas curvas sus puntos deben descansar sobre una línea recta sin cambio de pendiente. Si en algún tramo de estas gráficas hay cambio de pendiente evidente, se determina el punto donde este cambio de pendiente inicia y se revisan las posibles causas del cambio en régimen hidrológico.

EVALUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN UN MUNDO COMPLEJO Y CAMBIANTE
 PROFESOR EFRAÍN DOMÍNGUEZ
 GUÍA No 2 – DETERMINACIÓN DE LA OFERTA CON DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN

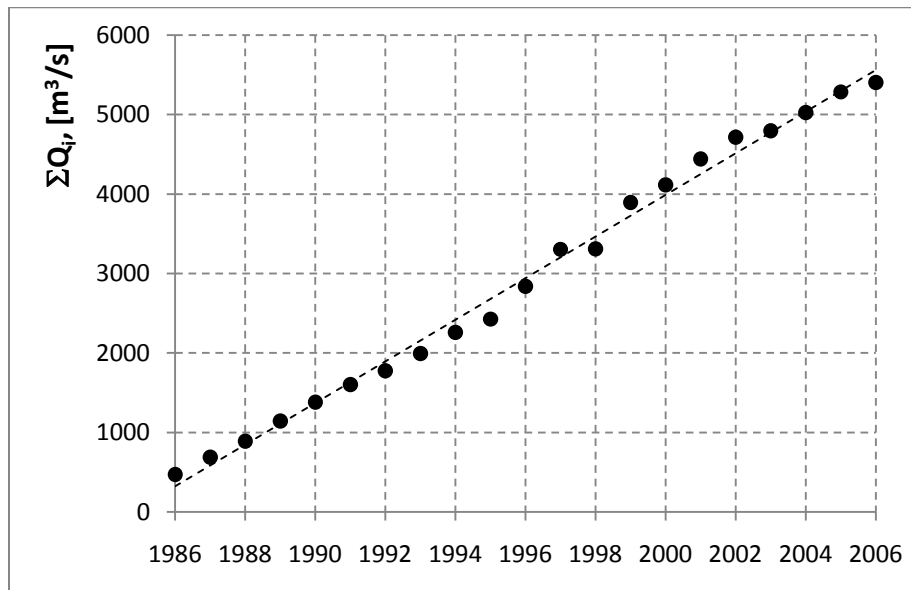


Figura 3. Serie de caudales sin cambio de régimen hidrológico

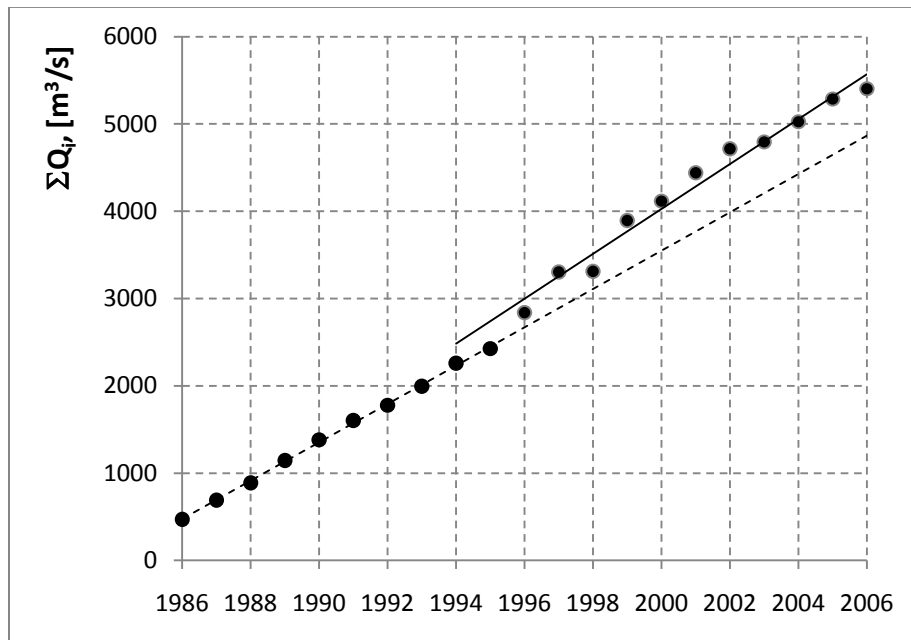


Figura 4. Serie de caudales con cambio de régimen hidrológico

Las ordenadas de la curva de masas simple se calculan cómo:

$$\sum_{i=1}^n Q_i = f(T)$$

Ecuación 14

EVALUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN UN MUNDO COMPLEJO Y CAMBIANTE
PROFESOR EFRAÍN DOMÍNGUEZ
GUÍA No 2 – DETERMINACIÓN DE LA OFERTA CON DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN

Donde T son los años y $(\sum_{i=1}^n Q_i)$ es la sumatoria acumulada de caudales.

Las ordenadas de la curva de dobles masas se calculan cómo:

$$\sum_{i=1}^n Q_i = f \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)$$

Ecuación 15

Donde $\sum_{i=1}^n X_i$ representa la sumatoria acumulada de la característica hidrometeorológica X , esta puede ser precipitación o caudales medidas en otras estaciones de la cuenca.

Para el caso de tener una serie con cambio de régimen hidrológico cómo la presentada en la Figura 4 se puede tratar de obtener una serie restituida (sin cambio de régimen hidrológico) utilizando el método de la tendencia lineal (también se pueden utilizar técnicas no lineales de ser necesario (Leonov & Leonov, 1981)).

Apunte 1. Representatividad de la serie de caudales anuales

Para catalogar una serie de caudales anuales como representativa es necesario haber verificado que:

- 1) La serie es aleatoria;*
- 2) La serie es homogénea y no presenta cambios evidentes de régimen;*
- 3) La serie tiene igual número de fases de alta y baja humedad en la evolución de sus incrementos con respecto a la media del periodo analizado;*
- 4) La serie permite establecer \bar{Q} , C_v con el error máximo permitido de la*
- 5) Tabla 2*