

**XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018**

**¿POR QUÉ, EN UN BALANCE HÍDRICO, RESULTA MÁS ADECUADO UN
ENFOQUE CIBERNÉTICO QUE UN ENFOQUE CONVENCIONAL?**

Victor M. Ponce¹, Janaina Da Silva² y Jorge Prieto Villarroya³

¹San Diego State University, Estados Unidos, poncevm@gmail.com

²San Diego State University, Estados Unidos, janainaehd@gmail.com

³Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina, jorgeprietovillarroya@yahoo.com.ar

RESUMEN:

Una comparación entre el enfoque convencional del balance hídrico y el de humedecimiento de la cuenca de L'vovich, denominado aquí enfoque cibernético, revela diferencias conceptuales fundamentales. El enfoque convencional es más adecuado para la hidrología de eventos, particularmente para aplicaciones relativas a la hidrología de inundaciones e hidrología urbana. Por otro lado, el enfoque cibernético resulta más adecuado para la hidrología de rendimiento, es decir, para determinar la disponibilidad de recursos hídricos sobre una base temporal anual. La metodología presentada se aplica a datos de la cuenca del río Sarada, aguas arriba de Anakapalli, Andhra Pradesh, India. Los datos son analizados utilizando una calculadora en línea.

ABSTRACT:

A comparison between the conventional approach to the hydrologic balance and L'vovich's catchment wetting approach, referred herein as the cybernetic approach, reveals fundamental conceptual differences. The conventional approach is seen to be mostly suited to event hydrology, particularly for applications of flood hydrology and related urban hydrology. On the other hand, the cybernetic approach is suited to yield hydrology, i.e., for determinations of the availability of water resources on an annual basis..

PALABRAS CLAVES: Hidrología superficial, balance hídrico, balance hídrico cibernético.

INTRODUCCIÓN

Una comparación entre el enfoque convencional del balance hídrico y el de humedecimiento de la cuenca de L'vovich, denominado aquí enfoque cibernético, revela diferencias conceptuales fundamentales. El enfoque convencional es más adecuado para la hidrología de eventos, particularmente para aplicaciones relativas a la hidrología de inundaciones e hidrología urbana. Por otro lado, el enfoque cibernético resulta más adecuado para la hidrología de rendimiento, es decir, para determinar la disponibilidad de recursos hídricos sobre una base temporal anual.

BALANCE HÍDRICO CONVENCIONAL

El balance hídrico convencional, comúnmente conocido como el balance hídrico de una cuenca, está tratado en todos los libros de texto de hidrología; ver, por ejemplo, [Ponce \(2014\)](#).

Un balance hídrico es una estimación de las diversas fases de transporte del ciclo hidrológico en una cuenca. El siguiente es un balance hídrico completo, que incluye tanto aguas superficiales como subterráneas:

$$\Delta S = P - (E + T + G + Q) \quad [1]$$

en el que ΔS = cambio en almacenamiento, P = precipitación, E = evaporación, T = evapotranspiración, G = salida de agua subterránea, y Q = escurrimiento superficial. La Ecuación 1 establece que en un lapso de tiempo dado, el cambio en el volumen de almacenamiento en una cuenca es la diferencia entre la entrada (precipitación) y la suma de todas las salidas (evaporación, evapotranspiración, salida de agua subterránea y escurrimiento superficial).

En la práctica hidrológica, los términos de la Ec. 1 se expresan en unidades de profundidad de agua, es decir, un volumen de agua distribuido uniformemente sobre el área de captación. En condiciones de equilibrio, $\Delta S = 0$ y la Ec. 1 se reduce a (Fig. 1):

$$P = E + T + G + Q \quad [2]$$

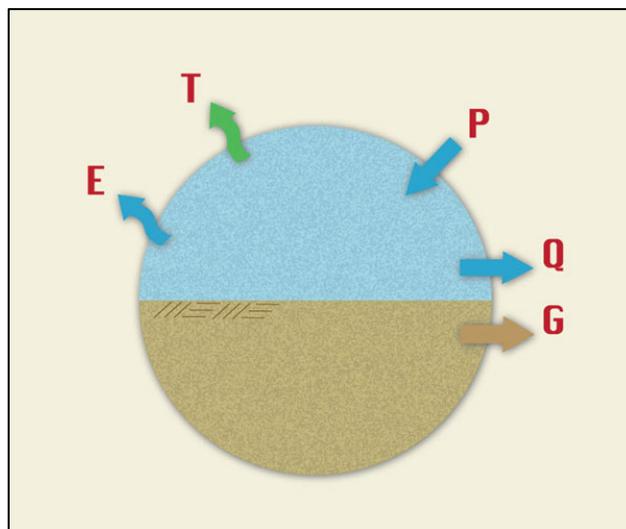


Figura 1.- Un balance hidrológico completo.

Un balance hídrico parcial, que considera solo las aguas superficiales, es el siguiente:

$$\Delta S = P - (E + T + I + Q) \quad [3]$$

en el que I = infiltración. En un lapso de tiempo dado, bajo condiciones de equilibrio ($\Delta S = 0$), la Ec. 3 se reduce a (Fig. 2):

$$P = E + T + I + Q \quad [4]$$

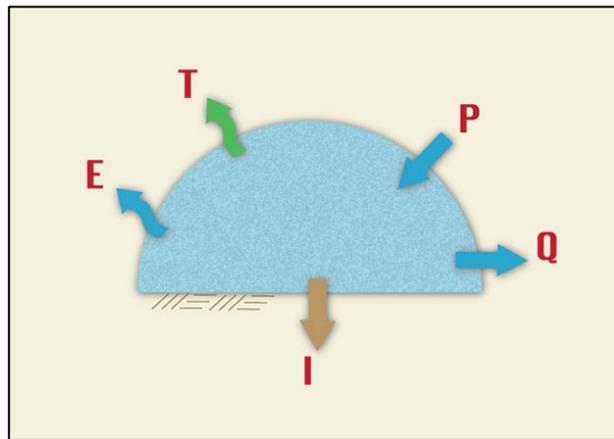


Figura 2.- Un balance hídrico parcial, que considera sólo las aguas superficiales.

La Ecuación 4 es imperfecta, porque supone que los montos de infiltración se pierden permanentemente en el balance de aguas superficiales, lo cual **no es del todo cierto**. En un lapso de tiempo dado, digamos un año, las cantidades infiltradas pueden regresar al volumen de control (y eventualmente ser liberadas) como la evaporación de lagos y estanques, la evapotranspiración de la vegetación o como el componente de flujo base del escurrimiento superficial.

A pesar de sus aparentes limitaciones en la hidrología de rendimiento, la Ec. 4 funciona bien en la hidrología de eventos (refiérase a Ponce y Palaniappan, 2014: Facetas de Hidrología). En la Ec. 4, las pérdidas hidrológicas L se definen como la suma de evaporación, evapotranspiración e infiltración: $L = E + T + I$. Esto da como resultado:

$$P = L + Q \quad [5]$$

lo que lleva a la ecuación fundamental de la hidrología de inundaciones:

$$Q = P - L \quad [6]$$

BALANCE HÍDRICO CIBERNÉTICO

Sobre una base anual global, toda la precipitación, ya sea (1) regresa a la atmósfera como vaporización V (a través de la evaporación y evapotranspiración), o (2) se escapa de la Tierra como

escorrentía R (es decir, flujo de la corriente). El balance de agua convencional separa la precipitación en: (1) pérdidas y (2) escorrentía (Ec. 5). Las pérdidas son evaporación, evapotranspiración e infiltración. Sin embargo, la porción de infiltración de las pérdidas puede eventualmente reaparecer como evaporación, evapotranspiración o incluso el componente de flujo de base de la escorrentía; **contabilizándose por lo tanto, dos veces en el balance.**

L'vovich (1979) resolvió este problema introduciendo el concepto de humedecimiento de cuenca. Separó la precipitación anual en dos componentes (Fig. 3) :

$$P = S + W \quad [7]$$

en el que S = escurrimiento superficial, es decir, la fracción de escurrimiento que se origina en la superficie terrestre, y W = humedecimiento de la cuenca, o simplemente, humedecimiento, la fracción de precipitación que no contribuye a la escorrentía superficial.

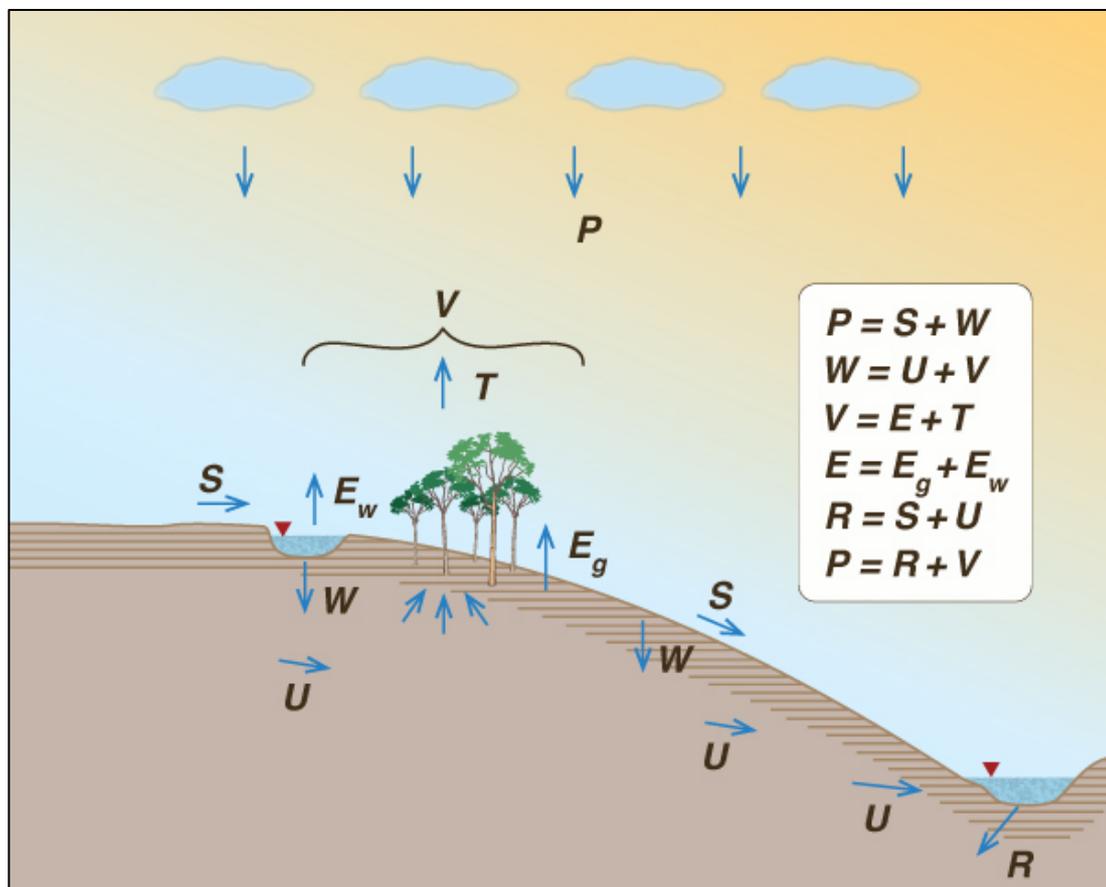


Figura 3.- El balance hídrico de L'vovich.

A su vez, el humedecimiento se divide en dos componentes:

$$W = U + V \quad [8]$$

en donde U = caudal base, es decir, la fracción de humedecimiento que exfiltra como el flujo de corrientes y ríos en ausencia de lluvia, y V = vaporización, es decir, la fracción de humedecimiento

que regresa a la atmósfera como vapor de agua. Obsérvese que el balance hidrológico de L'vovich no toma en cuenta la infiltración profunda, es decir, la porción de humedecimiento que no aparece en las aguas superficiales, estimada, a nivel mundial, en menos del 2% de la precipitación (World Water Balance , 1978).

La vaporización, que comprende toda la humedad devuelta a la atmósfera, tiene dos componentes:

$$V = E + T \quad [9]$$

en la que E = evaporación no productiva, en lo sucesivo denominada "evaporación", y T = evaporación productiva, es decir, la que resulta de la transpiración de la planta, denominada en lo sucesivo "evapotranspiración".

A su vez, la evaporación tiene dos componentes:

$$E = E_g + E_w \quad [10]$$

en la que E_g = evaporación sobre el terreno, suelo desnudo y pequeños almacenamientos superficiales (charcos), y E_w = evaporación de cuerpos de agua bien definidos como lagos, embalses, arroyos y ríos.

La evapotranspiración T es la evaporación de las superficies con vegetación, como las hojas y otras partes de las plantas, en función de la necesidad fisiológica de las plantas de bombear la humedad del suelo para mantener la turgencia y aprovechar los nutrientes.

La escorrentía (es decir, la escorrentía total) es la suma de la escorrentía superficial y el caudal (o flujo de) base:

$$R = S + U \quad [11]$$

Combinando las Ecs. 7, 8 y 11:

$$P = R + V \quad [12]$$

Las Ecs. 7 a 12 constituyen un conjunto de ecuaciones de balance hídrico. Combinando las Ecs. 11 y 12 se obtiene:

$$P = S + U + V \quad [13]$$

La Ecuación 13 separa la precipitación anual en sus tres componentes principales: (1) escorrentía superficial, (2) flujo base y (3) vaporización. Significativamente, la Ec. 13 supone que el cambio en el almacenamiento de humedad del suelo de un año a otro es insignificante, una suposición que es útil como primera aproximación.

Bajo el balance hídrico de L'vovich, se pueden definir dos coeficientes de balance de agua: (1) coeficiente de escorrentía y (2) coeficiente de flujo de base. El coeficiente de escorrentía es:

$$K_r = \frac{R}{P} = \frac{R}{R+V} \quad [14]$$

El coeficiente de flujo de base es:

$$K_r = \frac{U}{W} = \frac{U}{U+V} \quad [15]$$

Las Figuras 4 y 5 muestran los coeficientes de escorrentía y flujo de base calculados por [Ponce y Shetty \(1995\)](#), en base a los datos presentados por L'vovich (1979). Se observa que, en todos los casos, los coeficientes de escorrentía y flujo de base aumentan con la precipitación anual.

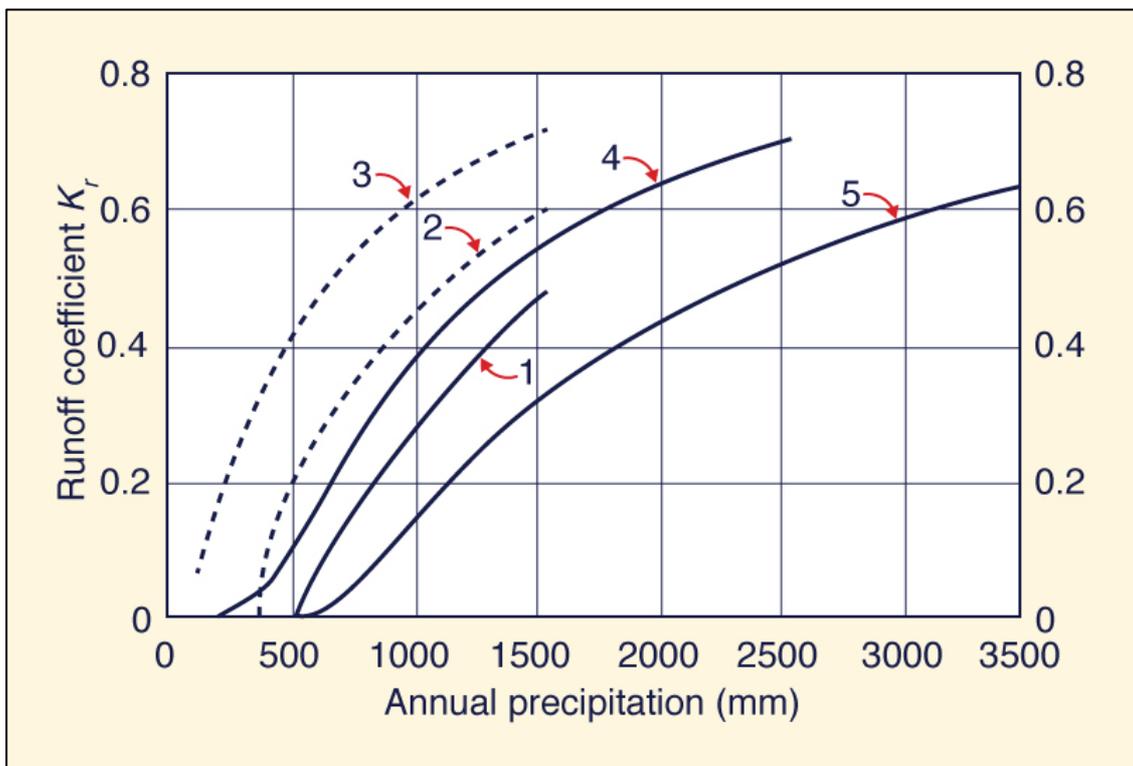


Figura 4.- - Coeficientes de escorrentía

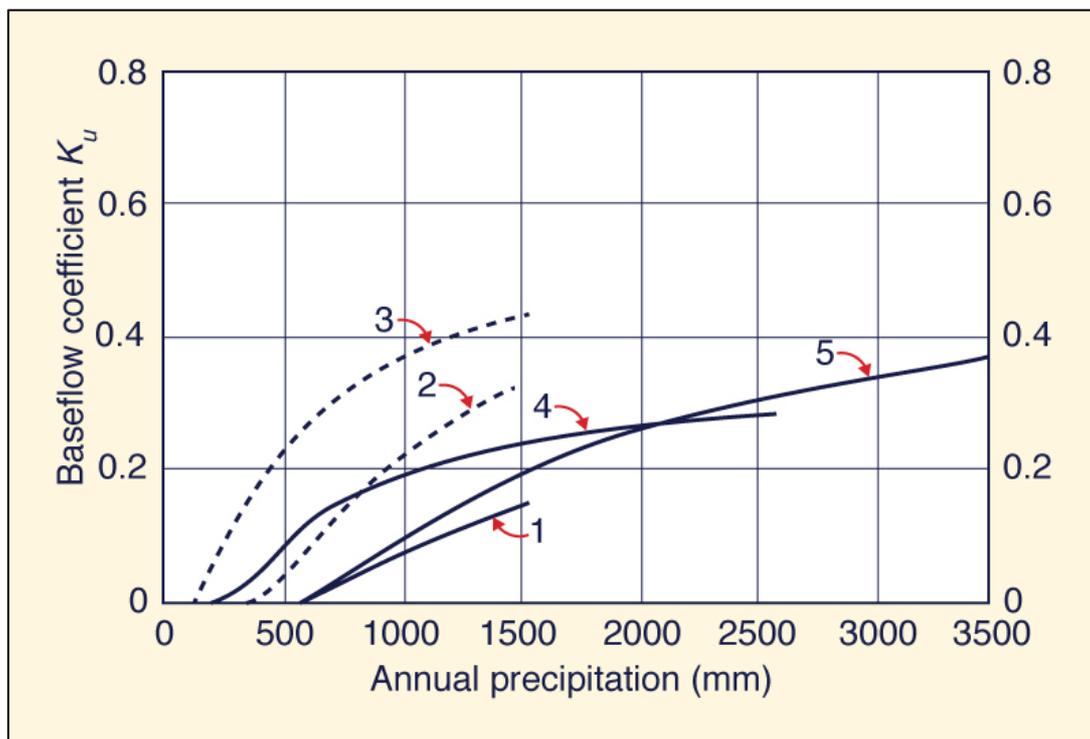


Figura 5.- Coeficientes de flujo base

Los gráficos consideran los siguientes datos:

1. África: bosques y matorrales esclerófilos perennes.
2. África: bosques de coníferas de montaña.
3. América del Norte (Canadá); bosques subárticos (taiga).
4. América del Sur: bosques húmedos de hoja perenne en las montañas.
5. Asia (India): bosques semidecíduos en las montañas (Ghats occidentales).

ANÁLISIS

Se observa que el balance hídrico convencional, Ecs. 1 a 6, es **deductivo** y demostrablemente basado en una premisa de causa-efecto. El enfoque fundamental es substractivo, caracterizado por el enunciado "la escorrentía es igual a la precipitación **menos** las pérdidas" (Ec. 6). Este tipo de balance funciona razonablemente bien para aplicaciones en hidrología de eventos (como el método racional de hidrología urbana) pero, debido al doble conteo, su precisión disminuye para la hidrología de rendimiento a más largo plazo.

Por otro lado, el balance hídrico cibernético, Ecs. 7 a 13, es **inductivo**, pues no se basa en la relación causa-efecto sino en la totalidad del sistema. El enfoque fundamental es aditivo, caracterizado por la afirmación "la precipitación es igual a la escorrentía **más** la vaporización" (Ec. 12). Este enfoque es adecuado para aplicaciones en hidrología de rendimiento, es decir, para determinaciones de coeficientes **anuales** de flujo de base y escorrentía.

APLICACION DEL MÉTODO

El balance hidrológico cibernético es aplicado a los datos de la cuenca del río Sarada, aguas arriba de Anakapalli, en Andhra Pradesh, India (Fig. 6). La cuenca está situada entre los Ghats

orientales y la costa oriental de la India, y presenta un clima subhúmedo (Ponce *et al.*, 2000), con un área de drenaje de 1.980 km².



Figura 6.- Ubicación geográfica de Anakapalli, en Andhra Pradesh, India.

Se analizan once (11) años de datos de precipitación-escorrentía. Los datos de precipitación consisten en hietogramas de lluvia diaria y los datos de escorrentía consisten en el hidrograma medido en la boca, o salida, de la cuenca. Los hietogramas anuales se usan para calcular la precipitación anual P (mm). Cada hidrograma anual se integra para obtener la escorrentía R (mm). La escorrentía superficial S (mm) se obtiene por separación del hidrograma utilizando principios establecidos (Ponce, 2014). La matriz de P - R - S se usa para calcular el [balance hídrico en línea 2](#). La Figura 7 muestra los resultados tabulares del programa en línea.

Año	P	R	S	U	W	V	K _u	K _r
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	943	544.2	505.2	39	437.8	398.8	0.089	0.577
2	1060	456	413	43	647	604	0.066	0.43
3	1312	671.1	564.1	107	747.9	640.9	0.143	0.512
4	824	275.1	243.1	32	580.9	548.9	0.055	0.334
5	953	365.2	346.2	19	606.8	587.8	0.031	0.383
6	1347	510.8	443.8	67	903.2	836.2	0.074	0.379
7	1047	360.1	319.1	41	727.9	686.9	0.056	0.344
8	1379	586.1	530.1	56	848.9	792.9	0.066	0.425
9	856	349.6	324.6	25	531.4	506.4	0.047	0.408
10	1090	470.8	440.8	30	649.2	619.2	0.046	0.432
11	1521	249.2	111.2	138	1409.8	1271.8	0.098	0.164
Promedio	1121.091	439.836	385.564	54.273	735.527	681.255	0.07	0.399
• Nota: Todas las unidades son en mm, excepto las Columnas 8 y 9, que son adimensionales.								

Figura 7.- Balance hidrológico cibernético para los datos de la cuenca del río Sarada.

RESUMEN

Una comparación entre el enfoque convencional del balance hídrico y el de humedecimiento de la cuenca de L'vovich, denominado aquí enfoque cibernético, revela diferencias conceptuales fundamentales. El enfoque convencional es más adecuado para la hidrología de eventos, particularmente para aplicaciones de la hidrología de inundaciones y la hidrología urbana. Por otro lado, el enfoque cibernético es adecuado para el balance hídrico de cuencas, es decir, para determinar la disponibilidad de recursos hídricos sobre una base temporal anual.

La metodología presentada se aplica a datos de la cuenca del río Sarada, aguas arriba de Anakapalli, Andhra Pradesh, India. Los datos son analizados utilizando una calculadora en línea ([balance hídrico en línea 2](#)).

REFERENCIAS

L'vovich, M. I. (1979). *World water resources and their future*. Translation from Russian by Raymond L. Nace, American Geophysical Union.

Ponce, V. M., y A. V. Shetty. (1995). *A conceptual model of catchment balance: 2. Application to runoff and baseflow modeling*. Journal of Hydrology, 173, 41-50.

Ponce, V. M., R. P. Pandey, y S. Ercan. (2000). *Characterization of drought across climatic spectrum*. Journal of Hydrologic Engineering, ASCE, Vol. 5, No. 2, April, 222-224.

Ponce, V. M. (2014). *Engineering hydrology: Principles and practices*. Texto en línea; segunda edición.

World water balance and water resources of the Earth. (1978). USSR Committee for the International Hydrologic Decade, UNESCO, Paris.