

LECTURA OBLIGATORIA:

“Manual de Evaluación de la Huella
Hídrica”.

Futuro Latinoamericano



DEPARTAMENTO DE
**INGENIERÍA
INDUSTRIAL**
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE



**INDUSTRIA
VIRTUAL**

MANUAL DE EVALUACIÓN

Manual para la evaluación
de la Huella Hídrica



Contenido

Antecedentes	5
1. Evaluación a nivel de Gobierno Municipal	7
1.1 Objetivo del manual	7
1.2 Pasos para la evaluación de la Huella Hídrica	7
1.2.1 Establecer alcances y objetivos	7
1.2.2 Cuantificación de la Huella Hídrica	10
1.2.3 Análisis de la Sostenibilidad de la Huella Hídrica	19
1.2.4 Respuesta a la Huella Hídrica	19
2. Evaluación a nivel de ciudad	20
2.1 Objetivo del manual	20
2.2 Pasos para la evaluación de la Huella Hídrica	20
2.2.1 Establecer alcances y objetivos	20
2.2.2 Cuantificación de la Huella Hídrica	23
2.2.3 Análisis de la Sostenibilidad de la Huella Hídrica	37
2.2.4 Respuesta a la Huella Hídrica	41
ANEXOS	42

Índice de Figuras

Figura 1: Ejemplo HH indirecta	6
Figura 2: Pasos para la cuantificación de la HH	7
Figura 3: Ejemplo jerarquía de Gobierno Municipal	9
Figura 4: Balance hídrico para HH	12
Figura 5: Pasos para la cuantificación de la HH	20
Figura 6: Sostenibilidad HH azul	39
Figura 7: Sostenibilidad HH gris	40

Índice de Tablas

Tabla 1: Enfoque de Cuantificación de HH por tipo de unidad	8
Tabla 2: Huellas cuantificadas dependiendo del tipo de unidad	8
Tabla 3: Información y fuentes para cada una de las HH	10
Tabla 4: Enfoque y tipo de HH cuantificada por sector	23
Tabla 5: Ejemplo Cuantificación HH Azul – 1ra Opción	30
Tabla 6: Ejemplo de uso per cápita de agua	30
Tabla 7: Ejemplo de estimación de uso de agua por zona, distrito, macrodistrito	31
Tabla 8: Ejemplo de distribución de afluente facturado por distrito, zona o macrodistrito	31
Tabla 9: Ejemplo de distribución de agua potable	3232
Tabla 10: Ejemplo Cuantificación HH Azul – 1ra Opción	3232
Tabla 11: Ejemplo HH indirecta	3333
Tabla 12: Ejemplo HH Azul – Sector comercial	34
Tabla 13: Ejemplo porcentaje de distribución – Sector comercial	35
Tabla 14: Rango de evaluación de impactos sobre los requerimientos ambientales de la cuenca	38
Tabla 15: Ejemplo datos Sostenibilidad HH Azul	38
Tabla 16: Resultados de la Sostenibilidad de la HH Azul	39
Tabla 17: Ejemplo Sostenibilidad de la HH Gris	4040

Glosario

Afluente: Volumen de agua que se usa para las actividades evaluadas.

Cafl: Concentración del parámetro escogido para la cuantificación de la HH Gris en el afluente.

Cefl: Concentración del parámetro escogido para la cuantificación de la HH Gris en el efluente.

Max: Concentración máxima en el cuerpo receptor, del parámetro escogido para la cuantificación de la HH Gris, establecido por la ley.

Cnat: Concentración natural, sin alteraciones antropogénicas, que se utiliza para la cuantificación de la HH Gris.

Efluente: Volumen de agua contaminada y descargada al alcantarillado público o ríos, después de ser usada en actividades evaluadas.

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

HH: Huella Hídrica.

HH Azul: Volumen de agua consumida por incorporación o evaporación en un proceso evaluado.

HH Gris: Volumen de agua necesaria para llevar la contaminación producida por un efluente a estándares de calidad ambiental establecidas por la norma.

HH Verde: Volumen de agua de lluvia que se incorpora en la capa de vegetación.

Uso y consumo de agua: En la evaluación de HH, el uso de agua se refiere al volumen de agua facturado y el consumo a la HH Azul.

WFN: Water Footprint Network, organización encargada de difundir la Huella Hídrica, y brindar soporte técnico para la evaluación de la misma.

CAF: Banco de Desarrollo de América Latina.

CDKN: Climate Development Knowledge Network.

FFLA: Fundación Futuro Latinoamericano.

SASA: Servicios Ambientales S.A.

MML: Municipalidad Metropolitana de Lima.

GAMLP: Gobierno Autónomo Municipal de La Paz.

MML: Municipalidad Metropolitana de Lima.

MDMQ: Municipio del Distrito Metropolitano de Quito.

Antecedentes

Huella Hídrica

De forma muy simplificada, la Huella Hídrica (HH) es un indicador del consumo y contaminación de agua dulce, que contempla las dimensiones directa e indirecta. Su concepto fue introducido por primera vez en año 2002 por el Dr. Arjen Hoekstra y desde entonces es difundido por la organización Water Footprint Network (WFN).

Conceptualmente, la HH es un indicador multidimensional compuesto por variables que, para su mejor entendimiento, se definen de la siguiente manera:

- ✓ HH Azul, se refiere al consumo de los recursos hídricos azules (agua dulce), superficial o subterránea, en toda la cadena de producción de un producto. Consumo se refiere a la pérdida de agua en cuerpos de agua disponibles en la superficie o en acuíferos subterráneos en el área de la cuenca. La pérdida ocurre cuando el agua se evapora, no regresa a la misma cuenca, es dispuesta al mar o se incorpora a un producto.
- ✓ HH Gris, se refiere a la contaminación y está definida como el volumen de agua dulce que se requiere para asimilar una carga de contaminantes dados las concentraciones naturales y estándares ambientales de calidad de agua.
- ✓ HH Verde, se refiere al consumo de recursos de agua verdes (agua de lluvia que no se convierte en escorrentía sino que se incorpora en productos agrícolas).

Finalmente la HH Indirecta, que engloba dentro de su evaluación a los tres tipos de Huellas mencionadas con anterioridad:

- ✓ HH Indirecta, se refiere al volumen de agua incorporada o contaminada en toda la cadena de producción de un producto (ver Caja 1).
Por ejemplo, en la producción de cerveza. Durante el crecimiento del cultivo de cebada se consume y se contamina agua, que sería la HH Indirecta de la producción de cerveza. En la producción de cerveza se consume y se contamina agua, que sería la HH Indirecta del producto terminado.

Figura 1. Ejemplo HH Indirecta

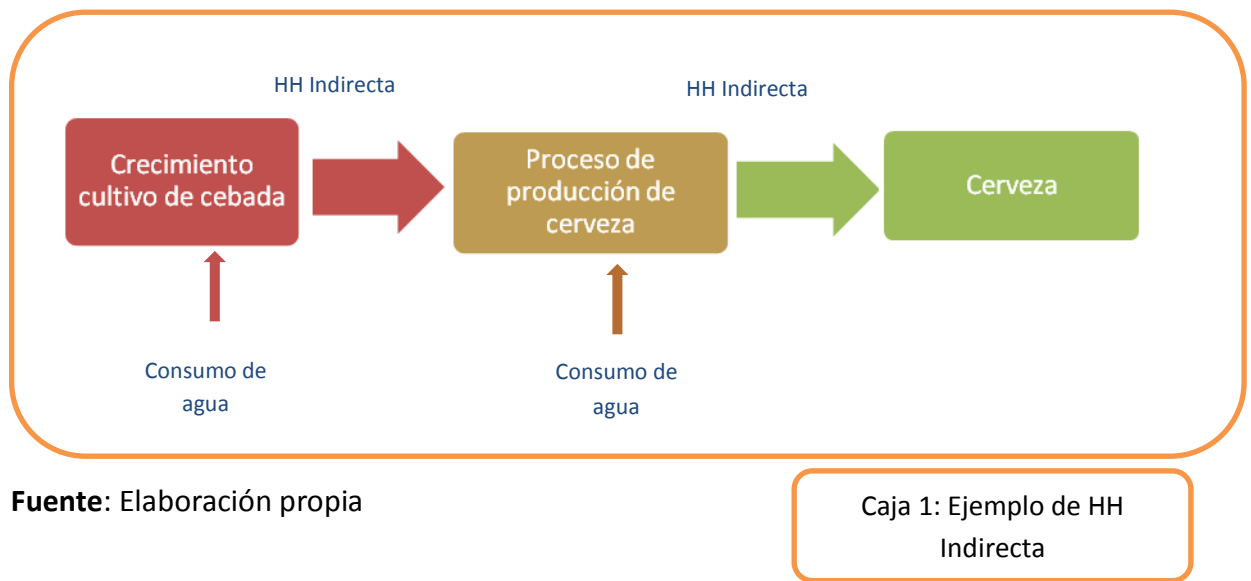
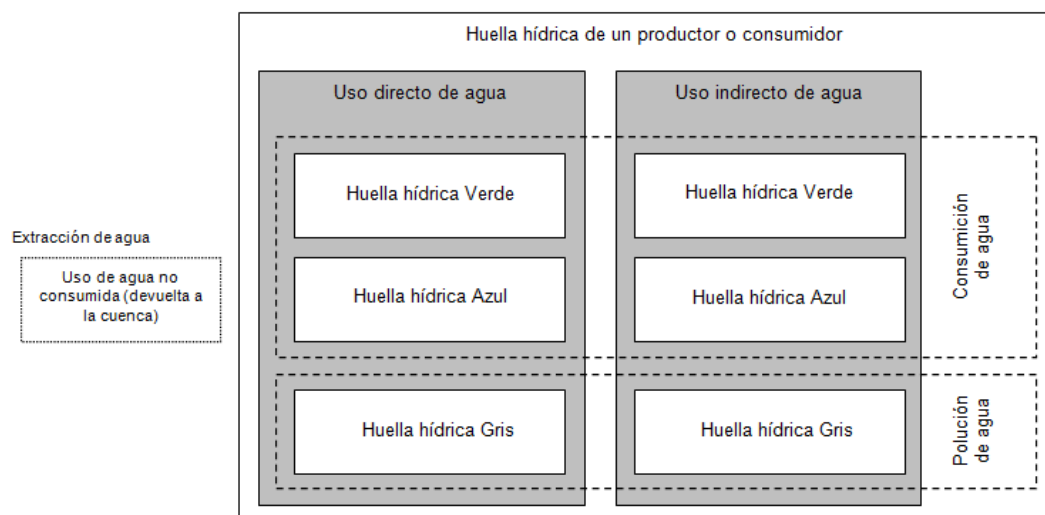


Figura 2. Representación esquemática de los componentes de la Huella Hídrica



El Manual de Evaluación de Huella Hídrica, permite realizar una cuantificación al nivel que se crea pertinente dependiendo de los objetivos de la medición.

Se puede medir la HH de:

- Un procesos
- Un producto
- Un consumidor
- Grupo de consumidores
- Una cuenca

- De un área geográfica delimitada, etc.

En este caso particular se dan las instrucciones para determinar la HH de un grupo de consumidores, representado en una entidad pública que es el Gobierno Municipal. Se utilizan complementariamente otros enfoques (p.ej. consumo de productos o procesos), como se aprecia en la sección siguiente.

1. Evaluación a nivel de Gobierno Municipal

1.1 Objetivo del manual

El siguiente manual tiene como objetivo facilitar la evaluación de Huella Hídrica (HH) en el marco de gobiernos municipales, presentando de manera sistemática los pasos a seguir. Está destinado a gestores en gobiernos municipales pero también puede ser de uso para estudiantes, investigadores y gestores del ámbito privado.

1.2 Pasos para la evaluación de la Huella Hídrica

A continuación se describen los cuatro pasos incluidos en el Manual para la evaluación de la HH de la WFN con los detalles incluidos en el Proyecto Huella de Ciudades:

Figura 2. Pasos para la cuantificación de la HH



Fuente: Hoekstra, et al (2011).

1.2.1 Establecer alcances y objetivos

El primer paso para la evaluación de HH es la identificación de límites y alcances que son parte del Plan de Cuantificación.

- ¿Cuál es el objeto de estudio?
- ¿Para qué se está realizando la evaluación de HH?
- ¿Qué Huellas se van a medir? (azul, gris, verde, indirecta)
- ¿Cuál es la información que se puede obtener?
- ¿Qué sub sectores se puede identificar?

1.2.1.1 Identificación de Unidades Municipales

Se debe identificar las Unidades Municipales que serán sujeto de evaluación, las actividades que realizan (administrativo y/o operativo) y el nivel al que pertenecen (central, unidades desconcentradas, empresas terciarizadas, etc.)

Por las características de las actividades de un Gobierno Municipal se cuantificarán las HH de consumidores y de procesos. Las unidades administrativas serán evaluadas desde el enfoque de consumidores únicamente. Las unidades operativas deben ser evaluadas desde el enfoque de consumidores (funcionarios) y de procesos identificados. Las unidades que cuentan con servicios, deben evaluarse desde el enfoque de consumidores tanto para funcionarios como personas que se benefician del servicio (Tabla 1).

Tabla 1: Enfoque de Cuantificación de HH por tipo de unidad

Tipo de Unidad	Consumidores	Procesos
Administrativas	X	
Operativas	X	X
Servicios	X	

Fuente: Elaboración propia

Así mismo se debe tomar en cuenta que las HH que se deben medir son las HH Azul y Gris en todos los casos. La HH Verde se cuantifica a nivel de ciudad, sin embargo existe la posibilidad de cuantificarla a nivel de gobierno municipal. La HH indirecta se debe medir en las actividades administrativas. En la Tabla 2 se puede observar las HH tomadas en cuenta para cada tipo de unidad. El asterisco (*) denota la posibilidad de incluir o no en la evaluación, como la HH Verde

Tabla 2: Huellas cuantificadas dependiendo del tipo de unidad

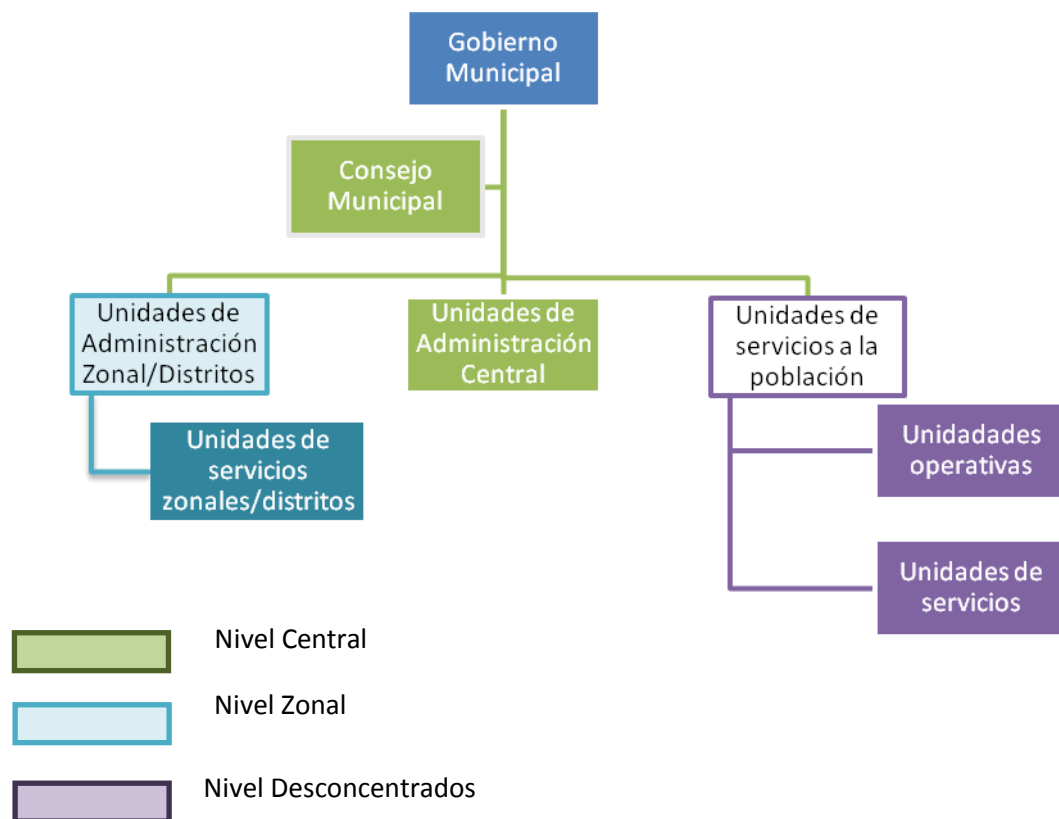
Tipo de Unidad	HH Azul	HH Gris	HH Verde	HH Indirecta
Administrativas	X	X		X
Operativas	X	X	*	
Servicios	X	X	*	

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, para tener la evaluación ordenada, se debe organizar las unidades por niveles.

Ej. 1. En el siguiente diagrama se pueden observar un organigrama de un Gobierno Municipal organizados por tipos de actividades.

Figura 3. Ejemplo jerarquía de Gobierno Municipal



Fuente: Elaboración propia

En el organigrama se puede distinguir claramente que existen tres niveles de organización. En nivel central (color verde), son unidades con actividades administrativas. Entre los edificios y/o unidades que probablemente se incluyan, está el Palacio Municipal, el despacho del Alcalde, Administración General, etc. Por otro lado, se puede identificar unidades con actividades específicamente en las zonas o distritos en los que está dividida la ciudad evaluada. Estas unidades por lo general presentan actividades administrativas y de servicios.

Finalmente, las unidades de servicios a la población son unidades que tienen actividades administrativas, operativas y/o de servicios. Estas unidades son consideradas como otro nivel del Gobierno Municipal por las características de sus actividades, por ejemplo la Terminal de buses, el Cementerio y los mingitorios públicos.

Por lo tanto, los límites y alcances son determinados por i) las unidades que se incluyen en la evaluación y ii) el tipo de Huellas hídricas que se cuantificarán, las cuales deben ser claramente explicitadas

1.2.2 Cuantificación de la Huella Hídrica

Para la cuantificación de la Huella Hídrica, se debe seguir una serie de pasos. Se inicia con la recolección de datos e identificación de fuentes. Asimismo, es importante tomar en cuenta las metodologías que se debe utilizar para la cuantificación de las Huellas.

1.2.2.1 Recolección de datos

La recolección de datos de las unidades identificadas dentro de los límites es, posiblemente, la etapa que demanda más tiempo. Se debe identificar las fuentes de datos para obtener la información más confiable posible. Asimismo, se debe identificar fuentes bibliográficas que apoyen los datos obtenidos y permitan estimar datos faltantes.

Dentro de los datos base que se deben incluir para la evaluación de la HH a nivel de Gobierno Municipal se encuentran:

Tabla 3: Información y fuentes para cada una de las HH

Huella Hídrica	Información	Fuente	Forma de estimación
Azul	Facturación mensual de agua (m ³)	Facturas emitidas mensualmente por la empresa de agua potable y saneamiento.	Consumo per cápita por funcionario estimado con datos de otras unidades.
	Identificación y uso de fuentes por parte de los funcionarios	Encuestas ¹ a los funcionarios y visitas.	Valores promedio de evaluaciones anteriores tomando en cuenta que las fuentes que siempre se utilizarán en una oficina son el inodoro y el lavamanos. Si tiene actividades operativas se puede buscar información para incluir o excluir las duchas.
	Uso de agua en procesos operativos, así como el porcentaje de evaporación e incorporación.	Datos propios de la unidad y visitas y datos bibliográficos (WFN).	Características estándares de actividades operativas tomadas en cuenta. Características técnicas de equipos utilizados.

¹ El formato de encuesta utilizada para la recopilación de información se encuentra detallado en el INTRANET del Proyecto Huella de Ciudades (plataforma en línea en la que se comparte información referida a las evaluaciones de las huellas en las ciudades (www.huelladeciudades.com)).

Gris	Concentración de afluente por parámetros.	Datos monitoreados por las empresas de agua potable. Resultado de laboratorios, datos bibliográficos.	Datos bibliográficos de calidad de agua potable. Concentración de agua potable de ciudades con características similares.
	Concentración de efluente por parámetros.	Resultado de laboratorios y datos bibliográficos.	Datos bibliográficos de calidad de efluentes administrativos u operativos.
	Concentración máxima establecida por ley por parámetros.	Normativa local en materia hídrica.	Parámetros de otros países que tengan similitud con la normativa del país.
	Concentración natural de afluente por parámetros.	Informes de monitoreo en la cabecera de la cuenca evaluada.	Concentración de parámetros establecidos por bibliografía local.
Verde	Superficie de cobertura de áreas verdes	Datos del Gobierno Municipal	Datos locales de superficie de áreas verdes de años pasados. Información sobre el crecimiento o decrecimiento de áreas verdes.
	Tipo de cobertura de áreas verdes	Datos del Gobierno Municipal	Dependiendo de las características de la superficie se puede asumir un porcentaje de cobertura de pasto y arbustos. P.e. En áreas verdes que separan avenidas, el 90% será cobertura verde de pasto y el restante de arbustos y flores.
	Datos de CROPWAT	CROPWAT (FAO)	El programa presenta una base de datos que se puede utilizar para usar los parámetros más cercanos a la realidad para obtener los resultados. Se pueden utilizar datos de evaluaciones anteriores.
Indirecta	Consumo de materiales por parte de las unidades del Gobierno Municipal	Datos del Gobierno Municipal (Administración, Almacenes)	
	Equivalentes de Huella Hídrica para materiales consumidos.	Base de datos de Water Footprint Network	

Fuente: Elaboración propia

Existen datos que se no se podrán obtener por diferentes razones. En ese caso se deben estimar y documentar para poder calcular la HH.

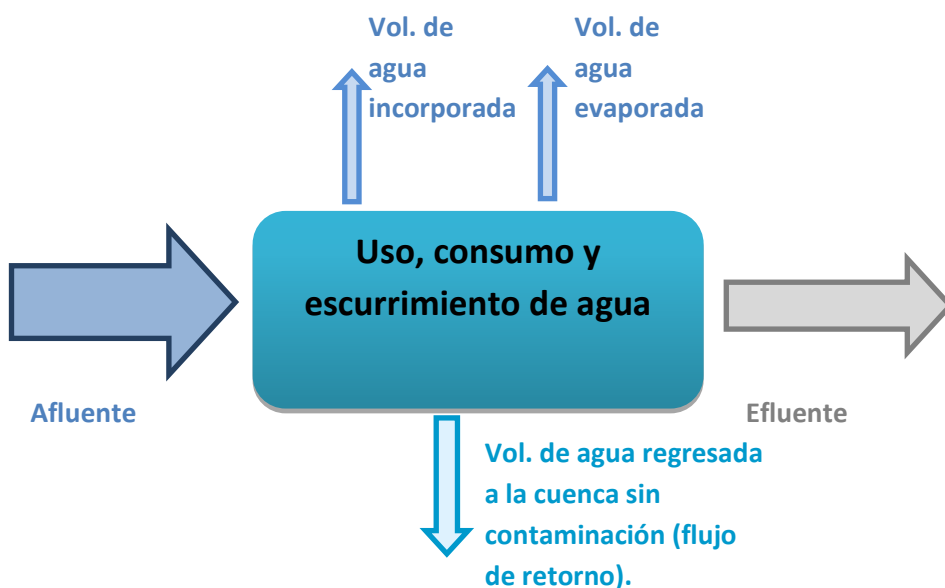
1.2.2.2 Balance Hídrico

El paso más importante para el cálculo de la HH es la determinación del balance hídrico por unidad, que posteriormente se agregará para obtener el balance hídrico total de todo el sistema analizado, en este caso, del Gobierno Municipal.

Se debe tener identificados los datos (volumen y concentración) de afluente y efluente, correspondientes a la unidad evaluada, además de identificar los procesos en que se consume² agua así como aquellos en que se escurre, regresando a la cuenca sin ser contaminada.

En la figura 5, se puede observar el balance hídrico que se debe realizar para identificar el uso y consumo de agua.

Figura 4. Balance Hídrico para HH



Fuente: Elaboración propia

- ✓ El **afluente** de una unidad es el volumen facturado de agua. En el caso de que se el medidor de agua sea compartido, se debe distribuir este entre las unidades que lo comparten. Si las unidades que se comparten tiene

² Como se explicó en la sección de Antecedentes, consumo se refiere al volumen de agua incorporada, evaporada o que no regresa a la misma cuenca. Uso de agua se refiere al volumen de agua total que se utiliza, que se factura para una actividad.

únicamente actividades administrativas, el porcentaje correspondiente a cada una, puede ser obtenida con la siguiente ecuación:

$$\frac{N^{\circ} \text{ de funcionarios unidad A}}{N^{\circ} \text{ funcionarios unidad A} + N^{\circ} \text{ funcionarios unidad B}} = \text{Porcentaje correspondiente a la unidad A}$$

En el caso de las actividades operativas, el volumen de agua facturado (afluente), debe ser además distribuido en las diferentes actividades. Este volumen puede ser distribuido tomando en cuenta el efluente generado por las diferentes actividades. La distribución podría realizarse en base a los efluentes generados de la siguiente manera:

$$\frac{\text{Efluente Operación 1}}{\text{Efluente Adm} + \text{Efluente Ope 1} + \dots + \text{Efluente Ope N}} = \% \text{ correspondiente a Ope 1}$$

- ✓ El **efluente**, a diferencia del afluente, debe ser calculado en base a encuestas y especificaciones técnicas, ya que no se tiene un registro de efluente generado. En el caso de las actividades administrativas estos datos pueden ser estimados a partir de encuestas³ realizadas a los funcionarios sobre el uso de fuentes (inodoros, lavamanos, duchas). Por lo tanto, el volumen del efluente puede ser estimado con las siguientes fórmulas:

$$Vol_{efl}(1) = Vol_{Lavamanos}(2) + Vol_{Inodoros}(3) + Vol_{Duchas}(4)$$

Dónde:

Vol_{efl} = Volumen del efluente generado

$Vol_{lavamanos}$ = Volumen generado por el uso de los lavamanos

$Vol_{inodoros}$ = Volumen generado por el uso de inodoros

Vol_{duchas} = Volumen generado por el uso de duchas

Vol Lavamanos (2)

$$= FLMpd * TLMpv * FLM * N^{\circ} \text{ de func ajustado} * Dmes$$

Dónde:

FLMpd = Frecuencia promedio de uso de uso de lavamanos por funcionario día (veces * funcionario/día)

³ Que deben al menos trabajar con un nivel de confianza de 90% para determinar el tamaño muestra.

TLMpv = Tiempo promedio de uso de lavamanos por funcionario vez
(min* funcionario/vez)

FLM = Flujo de agua (caudal) promedio del grifo (m³/min)

Nº de func ajustado = Se refiere a la cantidad de funcionarios que efectivamente utilizan las fuentes durante el día. Este es calculado de la siguiente manera:

Nº de func ajustado

$$= \text{Nº de func unidad} * \% \text{ de func que usan fuentes}$$

El volumen del efluente

$$\text{Vol Inodoros (3)} = \text{FINOpd} * \text{VolD} * \text{Nº de func ajustado} * \text{Dmes}$$

Dónde:

FINOpd =Frecuencia promedio de uso de inodoros por funcionario día
(veces funcionario/día)

VolD = Volumen promedio de descarga del tanque del inodoro
(m³/descarga)

Dmes = Días hábiles (trabajados) durante el mes.

$$\text{Vol Duchas (4)} = \text{FLDCpd} * \text{TDCpv} * \text{FDC} * \text{Nº de func ajustado} * \text{Dmes}$$

Dónde:

FLDCpd = Frecuencia promedio de uso de duchas por funcionario día.

TDCpv = Tiempo promedio de uso de duchas por funcionario
(min*funcionario/vez)

FDC ; _Flujo promedio de agua (caudal) de la ducha utilizada.

No. func ajustado: es el mismo que el ajustado para inodoros? O debería ser una variable distinta, llamada quizás No. func ajustado duchas?

El **efluente operativo** y de **servicios** debe ser calculado con los detalles de uso de agua que brindan las unidades evaluadas, tomando en cuenta las características de las operaciones y de servicios que brindan.

1.2.2.3 Mecanismos de cuantificación empleados

La Huella Hídrica de una unidad es la suma de la HH de cada una de las actividades que existen dentro de esta unidad. (Ecuación 5)

$$HH \text{ Unidad (5)} = HH \text{ Administrativa (6)} + HH \text{ Operativa (7)} + HH \text{ Servicios (8)}$$

La HH de una actividad es el resultado de la sumatoria de las HH evaluadas. Considerando las 4 HH, la ecuación sería la siguiente:

$$HH \text{ Actividad (9)} = HH \text{ Azul} + HH \text{ Gris} + HH \text{ Verde} + HH \text{ Indirecta}$$

Huella Hídrica Azul

La HH Azul está definida por la siguiente ecuación:

$$HH \text{ Azul (10.a)} = Incorp. + Evap.$$

Dónde:

- ✓ Incorp.: Volumen de agua incorporada
- ✓ Evap.: Volumen de agua evaporada

Es decir, se contempla el volumen de agua que se incorpora y que se evapora.

Si se conocen los volúmenes de incorporación y evaporación, esta ecuación puede utilizarse para cuantificar la HH Azul. Sin embargo, en el caso de la mayoría de las unidades no se tienen los datos exactos del volumen de agua incorporada o evaporada, por lo que se utiliza la siguiente ecuación:

$$HH \text{ Azul (10.b)} = Afluente - Efluente$$

Dónde:

- ✓ El afluente es el volumen de agua usada en la actividad evaluada
El efluente es el volumen de agua calculada. En el caso de las unidades administrativas, es el resultado de la ecuación 1.

Huella Hídrica Gris

La ecuación de la HH Gris que se considera para todos los casos es:

$$HH \text{ Gris (11)} = \frac{(Vol_{efl} * C_{efl}) - (V_{afl} * C_{afl})}{C_{max} - C_{nat}}$$

Dónde:

- ✓ Vol_{efl}: Volumen del efluente
- ✓ Vol_{afl}: Volumen del afluente
- ✓ C_{efl}: Concentración en el efluente en base a el parámetro medido
- ✓ C_{afl}: Concentración en el afluente en base a el parámetro medido

- ✓ C_{\max} : Concentración máxima del parámetro medido en el cuerpo receptor según la normativa ambiental
- ✓ C_{nat} : Concentración natural libre de impactos antropogénicos del parámetro medido

La HH Gris puede medirse con diferentes parámetros. La HH Gris total será la máxima de las HH Grises cuantificadas. Por ejemplo, si se cuantifica la HH Gris con DBO5, DQO, Sólidos Suspendidos (SS) o cualquier otro parámetro de la ley, y los resultados son los siguientes:

$$HH\ Gris_{DBO5} = X$$

$$HH\ Gris_{DQO} = 2X$$

$$HH\ Gris_{SS} = \frac{X}{2}$$

La HH Gris total sería la HH Gris cuantificada bajo el parámetro de DQO por ser la mayor de las tres.

- El volumen de agua del afluente como del efluente, son los volúmenes utilizados para la cuantificación de la HH Azul en la ecuación 10.b.
- La concentración del afluente se refiere a la calidad de agua potable que es distribuida en la ciudad tomando en cuenta el parámetro empleado.
- La concentración en el efluente se refiere a la calidad de agua del efluente con respecto al parámetro empleado.
- La concentración del efluente, se refiere a la calidad de agua en el efluente de la actividad respecto a los parámetros empleado.
- La concentración máxima, es la concentración por parámetros establecida en la normativa local como estándar ambiental en el cuerpo receptor.
- La concentración natural es la concentración del parámetro empleado, que tendría un cuerpo de agua sin los impactos ambientales antropológicos.

Huella Hídrica Verde

Para la cuantificación de la HH Verde, se necesitan los siguientes datos:

- Superficie de cobertura de áreas verdes
- Tipo de cobertura (pastos, arbustos, etc.)

La HH Verde es cuantificada con los programas **CROPWAT**⁴ y **CLIMWAT**⁵ de la FAO. CROPWAT requiere datos extras que si no se los tiene se los puede obtener de su base de datos.

CLIMWAT es una base de datos desarrollada por la FAO, que contiene datos de precipitación, temperatura media, etc., que son datos necesarios para que CROPWAT procese los datos de áreas verdes.

CROPWAT para cuantificación de HH Verde

El programa CROPWAT que se utiliza para la cuantificación de HH Verde, es un programa informático desarrollado por la FAO para determinar el volumen de agua evapotranspirada por los cultivos en distintos lugares del mundo, y utilizado por los investigadores de la WFN para la cuantificación de la HH Verde.

Inicialmente, este programa pide datos de entrada sobre el clima, incluyendo variables como temperatura mínima, máxima, humedad, precipitación, etc. Si no se tiene los datos de estaciones locales, los valores pueden obtenerse del programa CLIMWAT, también de la FAO.

Posteriormente pide datos sobre el tipo de cultivo, días de etapa de crecimiento, fecha de siembra, fecha de cosecha, profundidad de raíz, etc. Al igual que para el clima, CROPWAT tiene una base de datos que se pueden utilizar para la cuantificación. Sin embargo se recomienda introducir datos propios de las especies utilizadas en la cobertura de áreas verdes.

Finalmente se debe incluir los datos del suelo, humedad disponible, tasa máxima de precipitación, etc. Estos parámetros se los pueden obtener de la base de datos del CROPWAT si es que no se los tiene registrados y/o estudiados.

Los resultados obtenidos pueden exportarse a una tabla Excel para el posterior cálculo de la HH Verde. El procesamiento de estos resultados para obtener la HH verde se explica a continuación.

Ecuaciones de la HH Verde

La HH Verde total del municipio es la suma de las HH Verdes cuantificadas de las diferentes superficies tomadas en cuenta.

$$\text{HH Verde (12)} = \text{HH Verde}_{\text{pasto}} + \text{HH Verde}_{\text{arbustos}} + \dots + \text{HH Verde}_N$$

⁴Disponible en www.cropwat.com

⁵Disponible en www.climwat.com

Para la cuantificación de la HH verde de cualquiera de las superficies tomadas en cuenta, se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$HH\ Verde\ (13) = CWU_{Verde}(14) * Superficie\ Áreas\ Verdes$$

$$HH\ Azul\ (15) = CWU_{Azul}(16) * Superficie\ Áreas\ Verdes$$

Dónde:

- ✓ La CWUverde es el uso de agua de lluvia de la cobertura cuantificada.
- ✓ La CWUazul es el uso de agua extra (riego) de la cobertura cuantificada.
- ✓ La superficie de áreas verdes (ha), de la cobertura cuantificada.

El valor de **CWUverde** y **CWUazul** se calculó con la siguiente fórmula:

$$CWU_{Verde}(14) = 10 \times \sum_{d=1}^{lgp} ET_{verde}\ (16)$$

$$CWU_{Azul}(15) = 10 \times \sum_{d=1}^{lgp} ET_{Azul}\ (17)$$

Dónde:

- ✓ CWUVerde, es el componente verde en el uso de agua de las plantas, es decir, el aprovechamiento de agua de la lluvia por parte de las plantas.
- ✓ CWUAzul, es el componente azul en el uso de agua de las plantas, es decir, el aprovechamiento de agua azul, en muchos casos potable, por parte de las plantas.
- ✓ ETverde, es la evapotranspiración del agua verde, agua de lluvia, y está definida por la siguiente relación:

$$ET_{Verde}(16) = \min(ET_c, P_{eff})$$

Dónde:

- ETc, evapotranspiración verde acumulada en base a Peff
- Peff, se refiere a la precipitación pluvial efectiva.
- ✓ ETazul, es la evapotranspiración del agua azul, agua dulce de la cuenca, y está definida por la resta entre la evapotranspiración menos la precipitación efectiva, si esta es menor a cero, entonces la evapotranspiración azul es cero. La siguiente relación de máximo resume lo explicado con anterioridad.

$$ET_{Azul}(17) = \max(0, ET_c - P_{eff})$$

Dónde:

- ETazul, evapotranspiración azul acumulada en base a Peff

Huella Hídrica Indirecta

Para la cuantificación de la HH se necesita la cantidad de materiales sus equivalencias hídricas correspondientes.

$$HH_{Indirecta}(18) = \sum_p (C_p * HH_{Prod})$$

Dónde:

- Cp: Cantidad de productos consumidos (unidad/tiempo)
- HHprod: Huella Hídrica equivalente del producto (volumen)

Los productos consumidos, materiales de escritorio y productos agrícolas, son recolectados de la unida que centralizadora o se la debe requerir a cada unidad.

La selección de los materiales que son cuantificados depende de la existencia de las equivalencias hídricas.

Las equivalencias de los productos puede ser encontrados en la base de datos de la Water Footprint Network.

1.2.3 Análisis de la Sostenibilidad de la Huella Hídrica

La evaluación de la Sostenibilidad de la Huella Hídrica se la realiza a nivel de ciudad, y su descripción detallada puede encontrarse en el Manual de Evaluación de la HH de ciudad.

1.2.4 Respuesta a la Huella Hídrica

La formulación de respuesta, es un producto que se obtiene al finalizar la etapa de cuantificación de Huella Hídrica a nivel de ciudad, que requiere del concurso de tomadores de decisiones, técnicos, y otros para la definición de estrategias orientadas a reducir la HH del gobierno municipal evaluado.

Esta incluye proyectos a largo, mediano y corto plazo con distintos niveles de inversión, que pueden conformar un portafolio de proyectos para el gobierno municipal.

2. Evaluación a nivel de ciudad

2.1 Objetivo del manual

El siguiente manual tiene como objetivo facilitar la evaluación de Huella Hídrica (HH) en el marco de ciudades, presentando de manera sistemática los pasos a seguir. Está destinado a gestores en gobiernos municipales pero también puede ser de uso para estudiantes, investigadores y gestores del ámbito privado.

2.2 Pasos para la evaluación de la Huella Hídrica

A continuación se describen los cuatro pasos incluidos en el Manual para la evaluación de la HH de la WFN con los detalles incluidos en el Proyecto Huella de Ciudades:

Figura 5: Pasos para la cuantificación de la HH



Fuente: Hoekstra et al., 2011.

2.2.1 Establecer alcances y objetivos

El primer paso para la evaluación de HH es la identificación de límites y alcances que son parte del Plan de Cuantificación.

- ¿Cuál es el objeto de estudio?
- ¿Para qué se está realizando la evaluación de HH?
- ¿Qué Huellas se van a medir? (azul, gris, verde, indirecta)
- ¿Cuál es la información que se puede obtener?
- ¿Qué sectores conforman la ciudad?
- ¿Qué relevancia tiene cada uno de los sectores?

2.2.1.1 Identificación de Sectores y Subsectores

Los sectores que conforman la ciudad pueden identificarse por medio de las categorías de cobro por concepto de servicio de agua potable y alcantarillado, definidas por la empresa de agua potable en cada ciudad. Por ejemplo, una empresa de agua potable y saneamiento en una ciudad evaluada usualmente tendrá definidos cuatro sectores básicos:

- Residencial
- Industrial

- Comercial
- Público

Esta división ayuda a identificar los sectores relevantes en la ciudad y a trabajar con información ordenada.

Durante el proyecto se identificó que los sectores residencial, industrial, comercial y público son comunes en las categorías de cobro.

Sector Residencial

El sector residencial, se refiere al sector doméstico de la ciudad. Dentro de los límites de la ciudad evaluada, se puede identificar la subdivisión de éste en distritos, macro-distritos, zonas, parroquias, barrios, etc. Esta división puede servir para realizar la evaluación de Huellas a un nivel más específico y, si los datos están disponibles, mejorar la resolución de la información.

Este sector es evaluado desde el enfoque de grupo de consumidores, y se evalúa la HH Azul, Gris e Indirecta. La HH Indirecta es evaluada en base al consumo de productos agrícolas de la canasta familiar.

Sector Industrial

El sector industrial se caracteriza por tener varios subsectores. Los subsectores, son identificados a partir de las características de industrias que fueron ingresadas a la evaluación.

Ej.2. En una ciudad pequeña se pueden tener 2 industrias de papel, 4 curtiembres, 2 mataderos y 5 industrias farmacéuticas. Los subsectores identificados agrupan las características de estas industrias en los siguiente sub sectores:

- Subsector Papelera
- Subsector Curtiembre
- Subsector Matadero
- Subsector Farmacéutico

Los datos para la evaluación del sector industrial, son datos de cada una de las industrias evaluadas; es decir que, siguiendo con el ejemplo, para determinar la HH del Sub sector Papelera, se deben tomar en cuenta los datos de volumen de agua facturada, volumen del efluente, concentración de parámetros en el efluente, porcentaje agua evaporada, etc., de las dos industrias papeleras evaluadas.

El enfoque de evaluación para este sector es de procesos y se cuantifica la HH Azul y la HH Gris. Explicar por qué se cuantifican éstas y por qué no se cuantifican otras, tanto en este como en los otros sectores.

Los resultados de la evaluación del sector deben ser reportados por subsector.

Sector Comercial

El sector comercial es el sector característico de cualquier ciudad con actividades socioeconómicas que se basan en la compra y venta de productos y servicios. Este sector, está subdividido en sub sectores con el fin de definir las actividades que se realizan de manera más específica. Por ejemplo, se pueden encontrar sub sectores relacionadas con la educación, construcción, informática, actividades inmobiliarias, etc.

El enfoque de evaluación del sector comercial es el de consumidor, por lo tanto se requiere la cantidad de personas que trabajan en cada sub sector. Los subsectores y la cantidad de personas ocupadas, son por lo general determinados y cuantificados por el instituto de estadística de cada ciudad.

Sector Público

En el sector público se incluyen los resultados del estudio realizado en la primera fase del proyecto (nivel gobierno municipal). A estos se complementa con la evaluación de la HH Verde (en caso de que no haya sido cuantificada a nivel de gobierno municipal) y se complementa el estudio con unidades que no fueron incluidas en la primera parte de la evaluación (por ejemplo empresas municipales o tercerizadas que brindan servicios a la ciudadanía y pueden entenderse como si no correspondieran al nivel de gobierno municipal).

No se consideran las actividades públicas de otros sectores públicos, como el gobierno central, etc. Sin embargo, sería deseable incluir a otros actores del sector público en la evaluación, en función de la disponibilidad de datos, para robustecer la representatividad de la muestra y de los resultados.

A continuación, en la siguiente tabla, se presenta un resumen del enfoque de evaluación y las HH evaluadas. Si se agregan sectores se debe establecer dentro de los límites los tipos de HH que se evaluarán.

Tabla 4: Enfoque y tipo de HH cuantificada por sector

Sector	Enfoque de cuantificación		Huellas Hídricas cuantificadas			
	Grupo de Consumidores	Procesos	HH Azul	HH Gris	HH Verde	HH Indirecta
Residencial	X		X	X		X
Industrial		X	X	X		
Comercial	X		X	X		
Público	X	X	X	X	X	X

Fuente: Elaboración propia

2.2.2 Cuantificación de la Huella Hídrica

Para la cuantificación de la Huella Hídrica a nivel de ciudad, se deben planificar y realizar dos etapas: la recolección de datos y la aplicación de mecanismos de cuantificación de la HH. El Plan de Cuantificación que se entrega al inicio del proyecto, con los detalles mecanismos y límites de la cuantificación que se aplicaran, este la recolección de datos mencionada. Asimismo, es importante tomar en cuenta la metodología que se debe utilizar para la cuantificación de las Huellas en cada uno de los sectores. Por ejemplo, cuantificar la HH desde el enfoque de consumidor varia de la metodología que se utiliza para la cuantificación desde el enfoque de producción.

2.2.2.1 Recolección de datos

La recolección de datos de las unidades identificadas dentro de los límites es la etapa que mayor tiempo demanda, por lo cual se recomienda planificar esta etapa con márgenes de tiempo amplios. Se debe identificar las fuentes de datos de las que se pueda obtener la información más confiable posible, para cada sector y cada tipo de Huella. Asimismo, se debe identificar fuentes bibliográficas que apoyen los datos obtenidos y permitan estimar datos faltantes.

Dentro de los datos base que se deben incluir para la evaluación de la HH a nivel de ciudad se encuentran en el anexo 1 del presente documento. En esta tabla se encuentran detallados la información necesaria para cada tipo de Huella Hídrica evaluada.

2.2.2.2 Aplicación de metodología de cuantificación de Huella Hídrica

La Huella Hídrica de una ciudad es la suma de la HH de cada uno de los sectores que la componen y que han identificados y seleccionados dentro de los límites de la evaluación. (Ecuación 1)

$$HH \text{ Ciudad } (1) = HH \text{ Sector } 1 + HH \text{ Sector } 2 + \dots + HH \text{ Sector } n$$

A su vez, la HH de un sector es el resultado de la sumatoria de las HH evaluadas. Considerando los tres tipos de HH directa y la HH Indirecta, la ecuación sería la siguiente:

$$HH \text{ Sector } (2) = HH \text{ Azul} + HH \text{ Gris} + HH \text{ Verde} + HH \text{ Indirecta}$$

Las características de metodología de cuantificación aplicadas en los sectores identificados están detalladas en las siguientes secciones.

Huella Hídrica Azul

La HH Azul está definida por la siguiente ecuación:

$$HH \text{ Azul } (3.a) = Incorp. + Evap. + Perdida \text{ de flujo de retorno}$$

Dónde:

- Incorp. : Volumen de agua incorporada
- Evap.: Volumen de agua evaporada
- Perdida de flujo de retorno, se refiere al volumen de agua que no regresa a la misma cuenca.

Es decir, se contempla el volumen de agua que se incorpora y que se evapora.

Si se conocen los volúmenes de incorporación y evaporación, esta ecuación puede utilizarse para cuantificar la HH Azul. Sin embargo, si alguno de los sectores o subsectores no contaran con datos exactos del volumen de agua incorporada o evaporada, se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$HH \text{ Azul } (3.b) = Afluente - Efluente$$

Dónde:

- El afluente es el volumen de agua usada en la actividad evaluada, como aparece en la factura de servicios de agua potable⁶
- El efluente es el volumen de agua calculada.

Las ecuaciones 3.a, 3.b, 3.c reflejan el volumen de agua que se pierde de la cuenca, que se incorpora o se evapora, con variables diferentes.

⁶ En el caso de que dos o más unidades municipales compartan un solo medidor o suministro de agua, se debe prorratear el volumen facturado en función al número de funcionarios de cada unidad municipal, a menos que existan actividades distintas a las administrativas en alguna de ellas (p.ej. uso de agua para recarga de camiones cisternas), en cuyo caso debe intentarse dimensionar el volumen de agua que representan estas actividades operativas.

Finalmente, la HH Azul de un sector se puede cuantificar multiplicando la HH Azul per cápita determinada por la Water Footprint Network por la cantidad de habitantes o funcionarios dentro del sector evaluado (Ecuación 3.c).

$$HH\ Azul\ (3.c) = HH\ Azul_{per\ cápita} * N^o\ de\ habitantes$$

El orden de prioridad es el presentado en el documento, es decir, si no se encuentran los datos para la cuantificación de la HH Azul con la ecuación 3.a, entonces se prosigue a la 3.b, y usando finalmente, en último caso, la ecuación 3.c.

Huella Hídrica Gris

La ecuación de la HH Gris que se considera para todos los casos es:

$$HH\ Gris\ (4) = \frac{(Vol_{efl} * C_{efl}) - (Vol_{afl} * C_{afl})}{C_{max} - C_{nat}}$$

Dónde:

- Volefl. : Volumen del efluente
- Vol afl.: Volumen del afluente
- Cefl: Concentración en el efluente en base al parámetro utilizado para la cuantificación
- Cafl: Concentración en el afluente en base al parámetro utilizado para la cuantificación
- Cmax: Concentración máxima del parámetro utilizado para la cuantificación en el cuerpo receptor según la normativa ambiental
- Cnat.: Concentración natural libre de impactos antropogénicos del parámetro utilizado para la cuantificación.

La HH Gris puede medirse con diferentes parámetros de calidad. La HH Gris total será la máxima entre las HH Grises calculadas en base a distintos parámetros.

Ej. 3. Si se cuantifica la HH Gris con 3 parámetros (DBO5, DQO y sólidos suspendidos-SS), y los resultados son los siguientes:

$$\begin{aligned} HH\ Gris_{DBO5} &= X \\ HH\ Gris_{DQO} &= 2X \\ HH\ Gris_{SS} &= \frac{X}{2} \end{aligned}$$

La HH Gris total a considerar sería la HH Gris cuantificada con base en el parámetro DQO, por ser la mayor de las tres. Las otras dos quedarían descartadas.

- ✓ El volumen de agua del afluente como del efluente, son los volúmenes descritos en la ecuación 3.b para la cuantificación de la HH Azul.
- ✓ La concentración del afluente se refiere a la calidad de agua potable que es distribuida en la ciudad tomando en cuenta el parámetro estudiado.
- ✓ La concentración en el efluente se refiere a la calidad de agua del efluente con respecto al parámetro estudiado.
- ✓ La concentración del efluente, se refiere a la calidad de agua en el efluente de la actividad respecto a los parámetros estudiado.
- ✓ La concentración máxima, es la concentración por parámetros establecida en la normativa local como estándar ambiental en el cuerpo receptor.
- ✓ La concentración natural es la concentración del parámetro estudiado, que tendría un cuerpo de agua sin los impactos ambientales antropológicos.

Huella Hídrica Verde

Para la cuantificación de la HH Verde, se necesitan los siguientes datos:

- Superficie de cobertura de áreas verdes en la ciudad
- Tipo de cobertura (pastos, arbustos, árboles, etc.)

La HH Verde es cuantificada con los programas **CROPWAT**⁷ y **CLIMWAT**⁸. CROPWAT requiere datos de precipitación, temperatura media, tipo de suelo, etc., que, de no estar disponibles, pueden ser obtenidos de su propia base de datos, dentro del mismo programa, como se explica a continuación.

CROPWAT para cuantificación de HH Verde

El programa CROPWAT que se utiliza para la cuantificación de HH Verde, es un programa informático desarrollado por la FAO para determinar el volumen de agua evapotranspirada por una serie de cultivos en distintas locaciones y contextos climáticos alrededor del mundo. Es utilizado por los investigadores de la WFN para la cuantificación de la HH Verde y su uso es gratuito.

En su página de inicio, CROPWAT pide datos de entrada sobre el clima, incluyendo variables como temperatura mínima, máxima, humedad, precipitación, etc. Si se dispone de estos datos (p.ej. de estaciones

⁷ Disponible en www.cropwat.com

⁸ Disponible en www.climwat.com

meteorológicas locales), pueden introducirse manualmente, caso contrario, pueden obtenerse del programa CLIMWAT, también de la FAO.

El CLIMWAT, es un programa gratuito, que la igual que el CROPWAT puede descargarse de la página de la FAO. Este programa permite descargar datos de precipitación media, temperatura, etc., de diferentes estaciones de un país alrededor del mundo.

Posteriormente pide datos sobre el tipo de cultivo, días por etapa de crecimiento, fecha de siembra, fecha de cosecha, profundidad de raíz, etc. Al igual que para el ingreso de datos sobre el clima, CROPWAT tiene un base de datos que se puede utilizar para la cuantificación. Sin embargo, de ser posible, se recomienda ingresar datos propios de las especies utilizadas en la cobertura de áreas verdes.

Finalmente se debe ingresar datos sobre el suelo, como humedad disponible, tasa máxima de precipitación, etc. Estos parámetros pueden obtenerse en la base de datos del CROPWAT si es que no se los tiene registrados y/o estudiados.

CROPWAT ofrece la opción de exportar los resultados obtenidos a una tabla Excel para el posterior cálculo de la HH Verde. El procesamiento de estos resultados para obtener la HH verde se explica a continuación.

Cálculo de la HH Verde

La HH Verde total de la ciudad es la suma de las HH Verdes cuantificadas de las diferentes especies tomadas en cuenta.

$$HH\ Verde\ (5) = HH\ Verde_{pasto} + HH\ Verde_{arbustos} + \dots + HH\ Verde_N$$

Para la cuantificación de la HH verde de cualquiera de las especies consideradas, se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$HH\ Verde\ (6) = CWU_{Verde}\ (14) * Superficie\ Áreas\ Verdes$$

$$HH\ Azul\ (7) = CWU_{Azul}\ (16) * Superficie\ Áreas\ Verdes$$

Dónde:

- La CWU_{verde} es el uso de agua de lluvia de la cobertura cuantificada.
- La CWU_{azul} es el uso de agua extra (riego) de la cobertura cuantificada.
- La superficie de áreas verdes (ha), de la cobertura cuantificada.

El valor de CWU_{verde} y CWU_{azul} se calculó con la siguiente fórmula:

$$CWU_{Verde}(8) = 10 \times \sum_{d=1}^{lgp} ET_{Verde} \quad (16)$$

$$CWU_{Azul}(9) = 10 \times \sum_{d=1}^{lgp} ET_{Azul} \quad (17)$$

Dónde:

- CWU_{Verde} , es el componente verde en el uso de agua de las plantas, es decir, el aprovechamiento de agua de la lluvia por parte de las plantas.
- CWU_{Azul} , es el componente azul en el uso de agua de las plantas, es decir, el aprovechamiento⁹ de agua azul, en muchos casos potable, por parte de las plantas.
- ET_{verde} , es la evapotranspiración del agua verde, agua de lluvia, y está definida por la siguiente relación:
- Lgp , se refiere a la longitud del tiempo evaluado en días, es decir, si se cuantifica un mes, entonces lgp será 30 días.

$$ET_{Verde}(10) = \min(ET_c, P_{eff})$$

Dónde:

- ET_c , evapotranspiración verde acumulada en base a P_{eff}
- P_{eff} , se refiere a la precipitación pluvial efectiva.
- ET_{Azul} , es la evapotranspiración del agua azul, agua dulce de la cuenca, y está definida por la siguiente relación:

$$ET_{Azul}(11) = \max(0, ET_c - P_{eff})$$

Dónde:

- ET_c , evapotranspiración azul acumulada en base a P_{eff}
- P_{eff} , se refiere a la precipitación pluvial efectiva.

Huella Hídrica Indirecta

Para la cuantificación de la HH Indirecta se necesita la cantidad productos consumidos sus equivalencias hídricas correspondientes. La ecuación que se debe aplicar es la siguiente:

⁹ El aprovechamiento de agua azul para áreas verdes, se refiere a la incorporación, es decir a la HH Azul de incorporación.

$$HH_{Indirecta}(13) = \sum_p (C_p * HH_{Prod})$$

Dónde:

- Cp: Cantidad de productos consumidos (unidad/tiempo)
- HHprod: Huella Hídrica equivalente del producto (volumen de agua)

Es decir, la HH Indirecta total, es la suma de la multiplicación de los materiales y productos consumidos por sus respectivas equivalencias hídricas.

La HH Indirecta del sector residencial, está relacionada al consumo de los productos de la canasta familiar.

Huella Hídrica Sector Residencial

El sector residencial es evaluado desde el enfoque consumidor, esto se debe a que las actividades propias del sector, no son productivas ni de procesos, son actividades de consumo. La evaluación está basada en la cantidad de habitantes por división político-administrativa (p.ej. distrito, macrodistrito, zona).

Huella Hídrica Azul

La HH Azul del sector residencial puede cuantificarse de dos maneras:

- i. En base a la HH Azul per cápita de la base de datos de la WaterFootprint Network.
- ii. En base a las investigaciones realizadas por la WFN y la FAO, la HH Azul per cápita corresponde al 10% del total del volumen de agua facturado.

Ambas opciones son descritas a continuación.

En base a HH Azul per cápita: Si se considera que la HH Azul per cápita determinada por la investigación de la Water Footprint Network para países, se debe multiplicar el número de habitantes por la HH Azul per cápita. El resultado que se obtiene es la HH Azul por división político-administrativa.

Ej. 4. Si la HH per cápita de país en el que la ciudad evaluada se encuentra evaluada es de $2 \text{ m}^3 \cdot \text{habitante/año}$, la multiplicación entre la población por distrito y el valor mencionado daría los resultados de la siguiente tabla:

Tabla 5: Ejemplo Cuantificación HH Azul – 1ra Opción

Distrito	Nº de habitantes	HH Azul
Distrito 1	300.000	600.000
Distrito 2	305.000	610.000
Distrito 3	280.750	561.500
Distrito 4	210.000	420.000
Distrito 5	122.500	245.000
Total	1.218.250	2.436.500

La suma de las HH Azules obtenidas por distrito es la HH Azul total del sector residencial.

En base a estudios WFN-FAO: El volumen facturado por el sector, debe ser primero distribuido a cada uno de las divisiones político-administrativas. La distribución mencionada es realizada en base al volumen de agua per cápita que se usa por distrito. Dichos valores son obtenidos por la empresa de agua potable.

Ej. 5. Usando el anterior ejemplo, la ciudad evaluada tiene 5 distritos, y cuenta con las siguientes características:

Tabla 6: Ejemplo de uso per cápita de agua

(A) Distrito	(B) Nº de habitantes	(C) Volumen de Agua Facturada per cápita ($\text{hab} \cdot \text{m}^3/\text{año}$) ¹⁰
Distrito 1	300.000	50
Distrito 2	305.000	30
Distrito 3	280.750	70
Distrito 4	210.000	100
Distrito 5	122.500	65
Total	1.218.250	

Realizando la multiplicación entre el número de habitantes por distrito (B) y el volumen per cápita (C), se obtiene el volumen de agua facturado teórico (D). Si se obtiene el porcentaje de agua del total teórico por distrito (E), se puede obtener el porcentaje de distribución del agua dividiendo el total parcial del distrito entre total del sector.

¹⁰ Los valores de uso de agua per cápita o volumen facturado de agua per cápita, son obtenidos de la empresa de agua potable y saneamiento local.

Tabla 7: Ejemplo de estimación de uso de agua por zona, distrito, macrodistrito

(A) Distrito	(B) N° de habitantes	(C) Volumen de Agua Facturada per cápita (hab *m ³ /año)	(D) Volumen de Agua Facturado Teórico (m ³ /año)	(E) Porcentaje de distribución de agua potable
Distrito 1	300.000	50	15.000.000	21%
Distrito 2	305.000	30	9.150.000	13%
Distrito 3	280.750	70	19.652.500	27%
Distrito 4	210.000	100	21.000.000	29%
Distrito 5	122.500	65	7.962.500	11%
Total	1.218.250		72.765.000	

Ej 6. Suponiendo que el volumen de agua del sector facturado durante el año de evaluación es de 70.000.000 m³, la distribución de volumen sería la siguiente:

Tabla 8: Ejemplo de distribución de afluente facturado por distrito, zona o macrodistrito

(A) Distrito	(B) N° de habitantes	(C) Volumen de Agua Facturada per cápita (hab *m ³ /año)	(D) Volumen de Agua Facturado Teórico (m ³ /año)	(E) Porcentaje de distribución de agua potable	(F) Volumen de agua facturado ajustado (m ³ /año)
Distrito 1	300.000	50	15.000.000	21%	14.430.014
Distrito 2	305.000	30	9.150.000	13%	8.802.309
Distrito 3	280.750	70	19.652.500	27%	18.905.724
Distrito 4	210.000	100	21.000.000	29%	20.202.020
Distrito 5	122.500	65	7.962.500	11%	7.659.933
Total	1.218.250		72.765.000		70.000.000

Ej. 7. De forma alterna, en el caso de que no se conozca el consumo per cápita por distrito, la distribución puede realizarse en base al número de habitantes (B) en cada distrito. En la siguiente tabla se pueden observar los resultados (G) utilizando la segunda opción:

Tabla 9: Ejemplo de distribución de agua potable

(A) Distrito	(B) Nº de habitantes	(C) Porcentaje de distribución de población	(G) Volumen de agua facturado (m3/año)
Distrito 1	300.000	25%	17.237.841
Distrito 2	305.000	25%	17.525.139
Distrito 3	280.750	23%	16.131.746
Distrito 4	210.000	17%	12.066.489
Distrito 5	122.500	10%	7.038.785
Total	1.218.250		70.000.000

La HH Azul en esta opción es el resultado de la multiplicación del volumen de agua facturado por el 10% que corresponde a la HH Azul, según WFN-FAO. La suma de las HH Azules obtenidas por distrito es la HH Azul total del sector residencial. Alternativamente, la HH Azul total del sector residencial, puede calcularse como el 10% del volumen de agua facturado (G). En la siguiente tabla se pueden observar los resultados aplicando el porcentaje a ambos resultados obtenidos (F) y (G):

Tabla 10: Ejemplo Cuantificación HH Azul – 1ra Opción

Distrito	Nº de habitantes	Opción 1 HH Azul en base a consumo per cápita (F)	Opción 2 HH Azul en base a población (G)
Distrito 1	300.000	1.443.001	1.723.784
Distrito 2	305.000	880.231	1.752.514
Distrito 3	280.750	1.890.572	1.613.175
Distrito 4	210.000	2.020.202	1.206.649
Distrito 5	122.500	765.993	703.879
Total	1.218.250	7.000.000	7.000.000

Huella Hídrica Gris

La HH Gris es el resultado de la aplicación de la ecuación 4. El afluente debe ser distribuido como se explica en la segunda opción de la sección 0 del presente documento.

El efluente es el resultado de la resta de la HH Azul del afluente, es decir, se aplica la siguiente ecuación:

$$(14) \text{Efluente} = \text{Afluente} - \text{HH Azul}$$

La concentración del efluente doméstico puede ser obtenida de bibliografía o resultados de análisis de laboratorios de muestras de aguas residuales domésticas colectadas para este fin.

Huella Hídrica Indirecta

Los datos para la cuantificación de la HH Indirecta son obtenidos de la canasta familiar. Las equivalencias hídricas se encuentran en la base de datos de la Water Footprint Network. Se debe aplicar la ecuación 13.

Ej. 8. Si se cuantifica la HH indirecta correspondiente al consumo del plátano y la naranja. En la columna (B) se tiene la cantidad en toneladas y en la columna (C) se tiene la HH equivalente del producto. Aplicando la ecuación 13, es decir, multiplicando la cantidad del producto por su correspondiente HH equivalente, se obtiene la HH indirecta (Columna (D)). La suma de las HH Indirectas es la HH Indirecta Total.

Tabla 11: Ejemplo HH indirecta

(A) Producto	(B) Cantidad de producto (ton)	(C) Huella Hídrica Equivalente (m ³ /ton)	(D) Huella Hídrica Indirecta (m ³)
Plátano	15	3.000	45.000
Naranja	30	2500	75.000
TOTAL			120000

Huella Hídrica Sector Comercial

El sector comercial se evalúa desde el punto de vista de consumidor, por qué. La evaluación se basa en el número de funcionarios ya que no se tienen los datos detallados de las actividades por subsector. En el caso de que se tuvieran los datos de las operaciones dentro de cada uno de los subsectores, entonces se debe realizar la evaluación a nivel de procesos y de consumidores. Es decir, se debe aplicar la metodología del sector industrial y la que se presenta a continuación.

Huella Hídrica Azul

En el sector comercial se aplicó la ecuación 3.c. Se realizó la distribución del volumen facturado por el sector a los diferentes subsectores en base a la cantidad de funcionarios.

Ej. 9. Es decir, por ejemplo, en la siguiente tabla se tiene una lista de subsectores con la cantidad de funcionarios en cada uno. Por ejemplo, si la HH Azul per cápita es de 2 m³/año¹¹, los resultados serían los siguientes:

Tabla 12: Ejemplo HH Azul – Sector comercial

Subsector	Cantidad de funcionarios	HH Azul (m ³ /año)
Comercio al por mayor y al por menor	500	1.000,00
Artes, entretenimiento y recreación.	720	1.440,00
Información y comunicación.	309	618,00
Educación	843	1.686,00
Asistencia Social	489	978,00

Huella Hídrica Gris

Los volúmenes de afluente y efluente del sector fueron cuantificados en base a los resultados de la HH Azul.

El volumen del afluente es distribuido por la cantidad de funcionarios en cada uno de los subsectores evaluados.

Siguiendo con el ejemplo previo, en la siguiente tabla se presenta una lista de subsectores, la cantidad de funcionarios y el porcentaje que representan.

¹¹ Este valor puede ser obtenido de la base de datos de Huella Hídrica por países de la Water Footprint Network.

Ej. 10.

Tabla 13: Ejemplo porcentaje de distribución – Sector comercial

Sub Sector	Cantidad de funcionarios	Porcentaje del total
Comercio al por mayor y al por menor	500	17%
Artes, entretenimiento y recreación.	720	25%
Información y comunicación.	309	11%
Educación	843	29%
Asistencia Social	489	17%

Por lo tanto, del total del volumen de agua anual facturado por el sector, el 17% corresponderá al sub sector de comercio al por mayor y al por menor. Se deben reconocer las limitaciones de esta forma de abordaje por la forma por la falta de información específica de los subsectores, sin embargo, es importante evaluar el sector por la cantidad de población que es parte de este.

El efluente es la el resultado entre diferencia del volumen de agua facturada (afluente) y la HH Azul cuantificada anteriormente.

$$(14) \text{ Vol Efluente} = \text{Afluente} - \text{HH Azul}$$

Obteniendo los datos del afluente y la HH Azul, se aplica la ecuación 4 para cada subsector evaluado.

Huella Hídrica Sector Industrial

La cuantificación de la HH del sector industrial es realizada en base a la cantidad y tipo de industrias que se encuentran dentro de los límites geográficos establecidos. Los datos de uso, consumo de agua, efluente generado, concentración de parámetros en el efluente, etc., se pueden obtener de las unidades municipales encargadas de regular la actividad en el sector industrial.

Se debe obtener el balance hídrico de los procesos realizados en las industrias identificadas. Es posible utilizar balances hídricos estándares de bibliográfica que se pueden determinar en base a planos de las industrias y cantidad de producción, así como es posible que las propias industrias tengan un registro del consumo de agua por proceso, lo cual permita esbozar un balance que compare entrada y salida de agua.

Huella Hídrica Azul

La HH Azul es el resultado de la diferencia entre el agua entrante (afluente) y saliente (efluente) de cada industria (ecuación 3.b). Se debe poder diferenciar entre el volumen de agua incorporada y el volumen de agua evaporada.

Si se utiliza la ecuación 3.b, del total de la HH Azul cuantificada, un porcentaje puede ser agua evaporada. Este dato se lo puede obtener del balance hídrico realizado al inicio de la evaluación.

Huella Hídrica Gris

La cuantificación de la HH Gris para cada una de las industrias es el resultado de la aplicación de la ecuación 4. Las concentraciones de los efluentes pueden ser obtenidas de los documentos entregados por las industrias a las autoridades del municipio encargadas del control de las actividades industriales. Si no se pueden obtener los datos de calidad de efluentes de las autoridades, se pueden buscar resultados de laboratorios en informes de control de calidad del efluente de la industria a cuantificar.

En el caso de que no haya ninguno de estos datos, se debe considerar no incluir la industria a la evaluación, esto porque no se puede considerar una concentración estándar de procesos por la diferencia de tecnología utilizada en cada una de las industrias.

Huella Hídrica Sector Pública

La HH del sector público es la HH cuantificada en la primera fase del proyecto, la HH del Gobierno Municipal. Esta puede ser complementada con la cuantificación de la HH de unidades municipales que no se hayan tomado en cuenta en la primera fase por las características de sus actividades (usualmente operativas o de servicios a la ciudadanía, cuya huella corresponde más a la ciudad).

Asimismo, es importante agregar la HH correspondiente a las áreas verdes, que se explica a continuación.

Huella Hídrica Verde

La cuantificación de la HH Verde es realizada en base a los pasos descritos en la sección 0 del presente documento.

Huella Hídrica Sector Construcción

La HH del sector construcción se cuantifica en base a la HH indirecta de los materiales utilizados en el mismo. Mínimamente se debe contabilizar la HH del cemento¹² como principal insumo en la construcción, y mejor aún si se toman en cuenta más insumos (p.ej. madera, pintura, etc., y se realiza el estudio de la HH equivalente). Es decir, se multiplica la cantidad de cemento vendido en la ciudad por la equivalencia hídrica cuantificada para el cemento¹³.

$$HH_{\text{Construcción}} (15) = \text{Insumo } X * HH_{\text{equivalente}} \text{ Insumo } X$$

2.2.3 Análisis de la Sostenibilidad de la Huella Hídrica

El análisis de sostenibilidad es efectuado para la HH Azul y la HH Gris. La Water Footprint Network, realiza el análisis de la sostenibilidad de la HH Verde, en base a la cantidad de lluvia que cae y los cultivos cuantificados en la evaluación. Esta evaluación no se la realiza porque la HH Verde cuantificada corresponde a espacios de recreación y ornamento urbano, por lo que su análisis no es significativo comparando al resto de las actividades de la ciudad y los volúmenes de la HH Azul y Verde. Para el análisis de sostenibilidad de la HH Azul y Gris requieren los datos del escurrimiento natural de la cuenca que dota de agua a la ciudad evaluada. Estos datos deben ser mensuales para la identificación de “hot spots” o puntos críticos. Estos datos pueden ser obtenidos de las organizaciones municipales o gubernamentales responsable de la disponibilidad de agua en la cuenca, o de organizaciones relacionadas con la gestión de agua en las cuencas que abastecen a la ciudad.

El requerimiento natural del ecosistema está definido como el 80%¹⁴ del volumen total de escurrimiento de agua en la cuenca, dejando la disponibilidad real de agua para el uso y consumo de agua. Se debe aplicar la siguiente ecuación:

$$\text{Requerimiento natural (16.a)} = \text{Disponibilidad natural} * 80\%$$

$$\begin{aligned} \text{Disponibilidad real de agua (16.b))} \\ = \text{Disponibilidad Natural} - \text{Requerimiento natural} \end{aligned}$$

¹² Cuantificación de la Huella Hídrica del Cemento. Rodrigo Loayza Ardaya. 2013.

¹³ Fruto de una investigación en un Proyecto de Grado Cuantificación de la Huella Hídrica del cemento.

¹⁴ En base a A.Y. Hoekstra y M.M. Mekonnen. Global Water Scarcity: The Monthly Blue Water Footprint Compared to Blue Water Availability for The World's Major River Basins. Report Nº53.

2.2.3.1 Análisis de Sostenibilidad Huella Hídrica Azul

La HH Azul Total de la ciudad es la suma de las HH cuantificadas de los sectores evaluados. Su sostenibilidad es cuantificada comparando la disponibilidad de agua azul mensual (agua disponible real) de la cuenca de la que se extrae agua para el uso y consumo en la ciudad con el uso y consumo de agua en la ciudad.

Para determinar la escasez de agua y la sostenibilidad de agua, se debe dividir la HH Azul cuantificada de la ciudad por el volumen de agua disponible real (agua azul) (ecuación 17). Si la división es menor a 1, entonces se puede concluir que el impacto ambiental en cuanto al consumo de agua no existe o no es significativo. Cuanto mayor sea a 1, la situación es peor, como se puede ver en la

Tabla 14.

$$\text{Sostenibilidad HH Azul (17)} = \frac{\sum HH \text{ Azul}}{\text{Disponibilidad Natural}}$$

En la siguiente tabla se pueden observar los niveles de impacto ambiental sobre la cuenca.

Tabla 14: Rango de evaluación de impactos sobre los requerimientos ambientales de la cuenca

Mayor a 4		Mayor a 1,5	
Mayor a 2		Mayor a 1	

Fuente: En base al estudio Hoekstra, A.Y. and Mekonnen, M.M. (2011)

Ej. 11. La ciudad evaluada tiene una HH Azul total de 340 Mm³ anual, y se tiene los siguientes datos de escurrimiento natural en la cuenca evaluada:

Tabla 15: Ejemplo datos Sostenibilidad HH Azul

Mes	Escurrecimiento natural (m ³) (A)	Requerimiento ambiental de la cuenca (m ³) (B)	Disponibilidad real de la cuenca (m ³)(C) = A- B
Enero	209,24	167,39	41,85
Febrero	250,79	200,63	50,16
Marzo	266,39	213,11	53,28
Abril	304,54	243,63	60,91
Mayo	268,44	214,75	53,69
Junio	227,19	181,75	45,44
Julio	201,64	161,31	40,33
Agosto	154,34	123,47	30,87
Septiembre	138,29	110,63	27,66
Octubre	171,94	137,55	34,39
Noviembre	226,29	181,03	45,26
Diciembre	219,89	175,91	43,98

Total	2638,97	2111,18	527,79
-------	---------	---------	--------

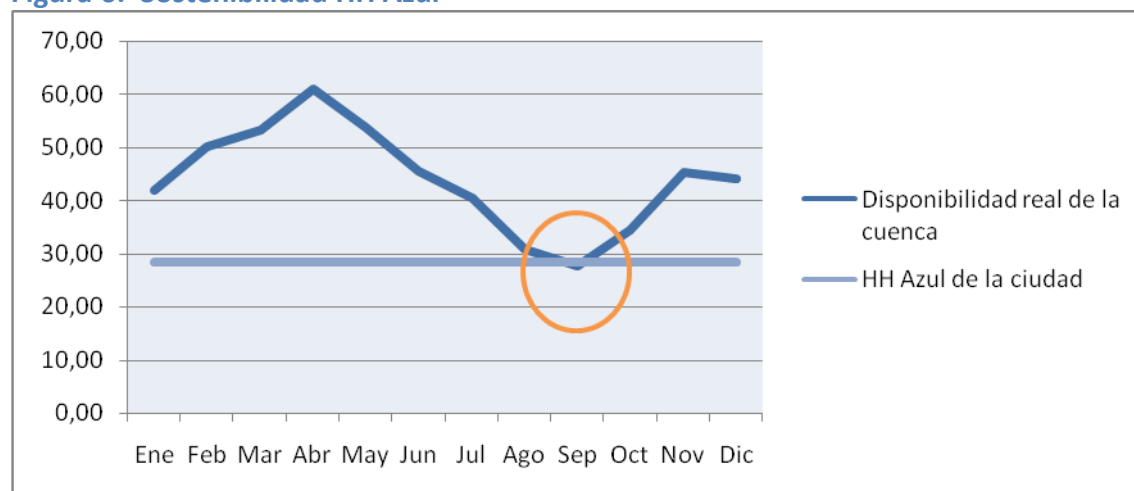
Distribuyendo la HH azul entre los doce meses, es decir dividiendo la HH Azul entre doce, se tiene la siguiente distribución y los siguientes índices de escasez:

Tabla 16: Resultados de la Sostenibilidad de la HH Azul

Mes	Disponibilidad real de la cuenca (m ³)	HH Azul de la ciudad (m ³)	Índice de Escases
Enero	41,85	28,33	0,68
Febrero	50,16	28,33	0,56
Marzo	53,28	28,33	0,53
Abril	60,91	28,33	0,47
Mayo	53,69	28,33	0,53
Junio	45,44	28,33	0,62
Julio	40,33	28,33	0,70
Agosto	30,87	28,33	0,92
Septiembre	27,66	28,33	1,02
Octubre	34,39	28,33	0,82
Noviembre	45,26	28,33	0,63
Diciembre	43,98	28,33	0,64
Total	527,79	340,00	

Como se puede observar en los resultados obtenidos en la Tabla 16, la escasez de agua durante el año sobrepasa los caudales naturales en septiembre. En agosto y en octubre el índice de escasez está cercano a 1. En la siguiente ilustración, se puede observar de manera gráfica cómo en el mes de septiembre la HH azul de la ciudad es mayor al caudal disponible de la cuenca.

Figura 6: Sostenibilidad HH Azul



Fuente: Elaboración propia

2.2.3.2 Análisis de Sostenibilidad Huella Hídrica Gris

La HH Gris total de la ciudad, es la suma de las HH Grises cuantificadas en los diferentes sectores de la misma. La sostenibilidad de la HH Gris, se cuantifica

con el volumen de agua natural (ecuación 16) y la HH Gris total de la ciudad; este valor se denomina *índice de contaminación hídrica*.

$$\text{Índice de Contaminación Hídrica} = \frac{\sum \text{HH Gris sectores}}{\text{Disponibilidad real del agua en cuenca}}$$

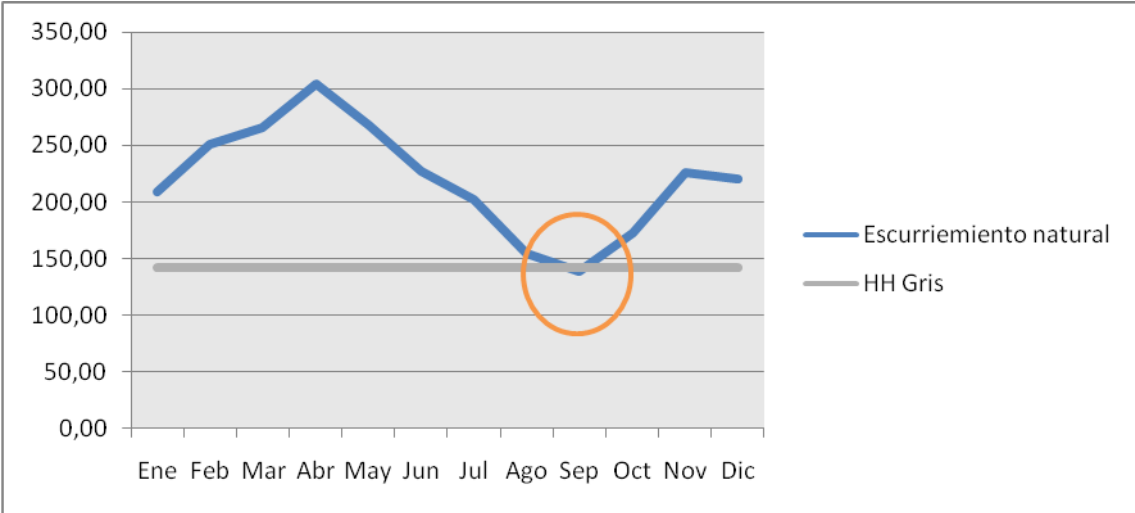
Ej. 12. Siguiendo con el ejemplo anterior, en la siguiente tabla se encuentran los valores de escurrimiento natural. Suponiendo que la HH Gris de la ciudad es de 1700 m³/año, se distribuye en 141,7 m³/mes de manera homogénea, ya que la HH Gris a nivel de ciudad no se cuantifica de manera mensual. Los resultados del nivel de contaminación se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 17: Ejemplo Sostenibilidad de la HH Gris

Mes	Escurreimiento natural (m³)	HH Gris (m³)	Nivel de Contaminación
Enero	209,24	141,7	68%
Febrero	250,79	141,7	56%
Marzo	266,39	141,7	53%
Abril	304,54	141,7	47%
Mayo	268,44	141,7	53%
Junio	227,19	141,7	62%
Julio	201,64	141,7	70%
Agosto	154,34	141,7	92%
Septiembre	138,29	141,7	102%
Octubre	171,94	141,7	82%
Noviembre	226,29	141,7	63%
Diciembre	219,89	141,7	64%
Total	2638,97	1700	

Como se pueden observar, durante el mes de septiembre se sobrepasa la capacidad de la cuenca de depurar por si sola la contaminación hídrica generada por las actividades de la ciudad. Para tener una mejor comprensión, los resultados pueden observarse en la siguiente ilustración.

Figura 7: Sostenibilidad HH Gris



Fuente: Elaboración propia

2.2.4 Respuesta a la Huella Hídrica

La formulación de respuestas, es un proceso participativo que debe involucrar a todos los actores relevantes de todos los sectores identificados en la ciudad. Se puede iniciar al finalizar la etapa de cuantificación de Huella Hídrica a nivel de ciudad, y mejor aún si se lo hace después de terminar el análisis de sostenibilidad. La formulación de respuestas puede incluir políticas, planes, programas y proyectos a largo, mediano y corto plazo con distintos niveles de inversión, que conforman un portafolio para que una ciudad reduzca su Huella Hídrica. Se pueden incluir los arreglos institucionales a nivel de ciudad necesarios para llevar a cabo iniciativas de respuesta a, o reducción de, la Huella Hídrica, así como potenciales fuentes de financiamiento.

Anexo 1: Datos para la evaluación de la Huella Hídrica por sector

Sector	HH Azul		HH Gris		HH Verde		HH indirecta	
	Información	Fuente	Información	Fuente	Información	Fuente	Información	Fuente
Todos	Volumen de agua facturada del sector	Empresa de agua potable y saneamiento	Concentración afluente	Empresa de agua potable y saneamiento				
			Concentración natural	Estudios realizados al inicio de la cuenca				
			Concentración máxima por normativa	Normativa en materia hídrica local				
Residencial	Uso per cápita de agua	Empresa de agua potable y saneamiento Estadísticas realizadas por instituciones relacionadas con gestión de agua	Concentración en el efluente	Toma de muestras analizadas en laboratorio. Estudios realizados en efluentes domésticos. Estudios realizados en cuerpos receptores de efluentes domésticos.			Consumo de productos	Canasta familiar
	Consumo de agua per cápita	Base de datos de la WFN						
	Población total y por división político - administrativa	Instituto de estadística						

Público	Resultados de la HH del GM cuantificados en la primera fase del proyecto				Superficie de áreas verdes	Unidad encargada del mantenimiento de áreas verdes		
					Tipo de cobertura en áreas verdes	Unidad encargada del mantenimiento de áreas verdes		
					Datos de evapotranspiración y precipitación.	Datos bibliográficos de las especies utilizadas en la cobertura de áreas verdes		
	Unidades complementarias	Datos del GM de la ciudad evaluada	Concentración en el efluente	Datos del GM de la ciudad evaluada				